

Valorisation de la biomasse par fermentation : biométhanisation et biohydrogène

Comment tirer profit des déchets organiques



Centre Wallon de Biologie Industrielle

S. HILIGSMANN, Ph. THONART



ULB-Microbiologie Appliquée -- MA1 Bio-ingénieurs
12 mai 2015



Le Centre Wallon de Biologie Industrielle

Centre de recherche et développement en
microbiologie et biochimie industrielle.

Le CWBI étudie

- la biochimie des microorganismes
- la production de biomasse
- la production de métabolites
- le conditionnement des starters
ou des produits finis

pour des applications diverses
dans les secteurs agro-alimentaire,
pharmaceutique, agriculture,
environnement



Le Centre Wallon de Biologie Industrielle

Application des biotechnologies au domaine de l'environnement

- **Bioremédiation**
 - traitement des sols contaminés (PCB, HC, ...)
 - bioconversion du gypse (sous-produit industriel)
 - traitement des biomasses (compost, effluents d'élevage,...)
 - traitement des eaux usées (fosses septiques,...)
- **Valorisation énergétique des biomasses**
 - biométhanisation, bioéthanol
 - production de biohydrogène (dark fermentation)
- **Etude des décharges et centres d'enfouissement technique (CET)**
 - activité biologique, impact environnemental, potentiel de méthanisation et optimisation
 - développement de modèles d'évolution
 - mise au point de bioréacteurs pilotes

Les avantages de la biotechnologie

- **grande « biodiversité » de processus**
- **spécificité des réactions pour le substrat et le produit**
- **processus peu énergivores**
- **conservation de l'énergie. Le rendement énergétique est proche de 95%**

La variabilité des biomasses valorisables

Matière biodégradable = matière organique

- Nombreuses origines : ménages, industries, agriculture, ...
- Nature diverse :
 - solide/semi-solide : déchets, sous-produits, invendus, ...
 - déchets liquides : eaux usées, produits non conformes, ...
- Composition variable : selon l'origine, dans le temps, ...
- Production variable : selon l'origine, dans le temps, ...

La variabilité des déchets organiques solides

- **Déchets des ménages et collectivités :**

mélange non maîtrisable, contaminants (emballages, verres, métaux, ...), toxiques/métaux lourds (encres, piles, couleurs, ...)

- **Invendus/déchets agroalimentaires des commerces :**

mélange davantage maîtrisable, emballages, métaux lourds (encres)

- **Déchets des marchés :**

mélange maîtrisable, peu de contaminants et métaux lourds (encres)

- **Déchets/sous-produits agroalimentaires :**

composition stable, quantités parfois importantes
peu de contaminants et métaux lourds (encres)

- **Déchets agricoles/verts et productions énergétiques :**

composition stable, peu de contaminants et métaux lourds (encres)

La variabilité des déchets organiques liquides

- **Eaux usées des ménages et collectivités :**

mélange non maîtrisable, charge stable, contaminants toxiques/bio-non compatibles (produits d'entretien, pharmaceutiques, ...)

- **Eaux usées/de process des industries agroalimentaires :**

mélange relativement maîtrisable, charge stable, contaminants (détergents, ...)

- **Produits déclassés et sous-produits agroalimentaires :**

composition stable, charge élevée et quantités parfois importantes, contaminants potentiels (microorganismes)

- **Lisiers agricoles :**

composition stable (azote), peu de contaminants

Intérêt (rentabilité, coût, ...)

Les applications biotechnologiques pour valoriser des biomasses

- **Valorisation de la matière : "le bon sens"**



- **Bioraffinerie (potentialité de transformation) :**

Ex. : glycérol en matière grasse, amidon en précurseurs de matières plastiques biodégradables, ...

Bioraffinerie amyliacée : Point de départ de nouveaux matériaux de performance

Ressources végétales
(blé, maïs, pomme de terre, pois)

+ mat. hemicellulosiques

Amidon

Fonctionnalisation

hémicelluloses

Résines Végétales

Glucose

+ autres C₆ et C₅

BIOHUB

Intermédiaires chimiques et molécules

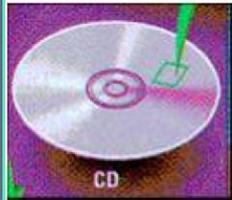
Chimie

Biotechnologies

Sorbitol

+ autres

PROPRIETES NOUVELLES,
ADDITIONNELLES, ...



23

Les applications biotechnologiques pour valoriser des biomasses

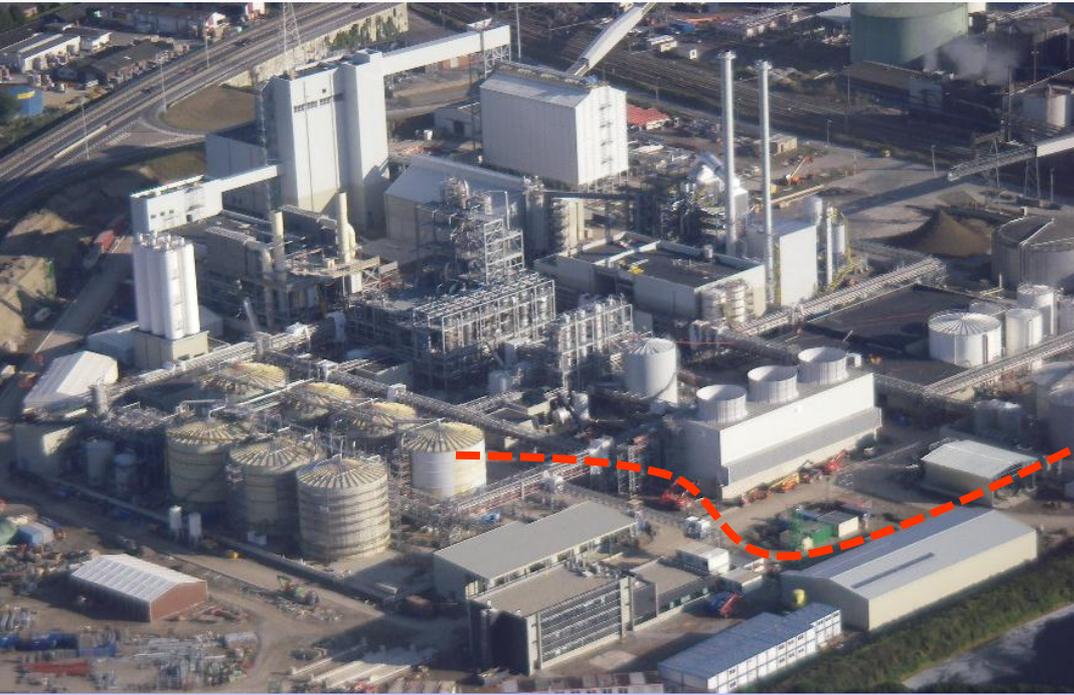
- Valorisation de la matière : "le bon sens" 
- Biofaçonnement (potentialité de transformation) :
Ex. : glycérol en matière grasse, précurseurs de matières plastiques biodégradables, ...
- Énergétiques :
 - (bio)éthanol,
 - CH₄,
 - H₂,
 - Électricité (microbial fuel cells)

Intérêt socio-économique



- Valorisation des déchets
- Source d'énergie renouvelable
- Assurer un certain niveau d'indépendance énergétique

Bioéthanol versus biométhane = Goliath versus David



Cuves de 4000 m³

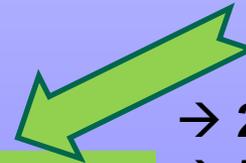


- 1 Mio t/an de biomasse
(froment, maïs, betterave, ...)
- 300 000 m³ éthanol/an = 5500 MWh/j
- 150 – 300 Mios € invest.

- Biométhanisation 1MWe**
(taille intermédiaire 0,1 - 3 MWe)
- 50 000 t/an de biomasse
(fumier, déchets d'abattoires, maïs, énergétique, lisiers, ...)
 - 2 Mios m³ CH₄/an = 60 MWh/j
 - 5 Mios € invest.

Carbohydrates, surtout les C₆, un peu les C₅

Toute Matière Organique

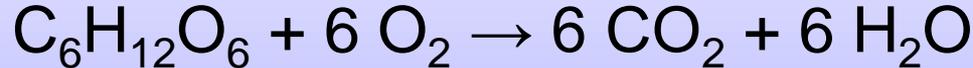


Plan de l'exposé

1. **Variabilité des déchets biodégradables et généralités sur les processus de biodégradation**
2. **Technologies de biométhanisation – maîtrise des paramètres**
3. **Biométhanisation en phase solide : CET – biométhaniseur**
4. **Biométhanisation en phase liquide : exemples, coûts**
5. **Perspectives : digestion anaérobie en 2 étages \rightarrow $H_2 + CH_4$**
6. **Conclusions**

Les possibilités de biodégradation de la matière organique

- **aérobie** : - relativement rapide (quelques heures à quelques jours),
 - conditions de mise en œuvre peu exigeantes
 - Exemples : épuration aérobie, compostage, ...



1kg + 1,1 kg = 0,5 kWh électrique consommé dans step

- **anaérobie** : - relativement lente (plusieurs jours à dizaines de jours)
 - conditions de mise en œuvre parfois très exigeantes
 - souches particulières,
 - conditions physico-chimiques contrôlées,
 - ...
 - Exemples : fermentation alcoolique, biométhanisation, ...



1kg → 374 374 Litres = 3,7 kWh total



Chaleur

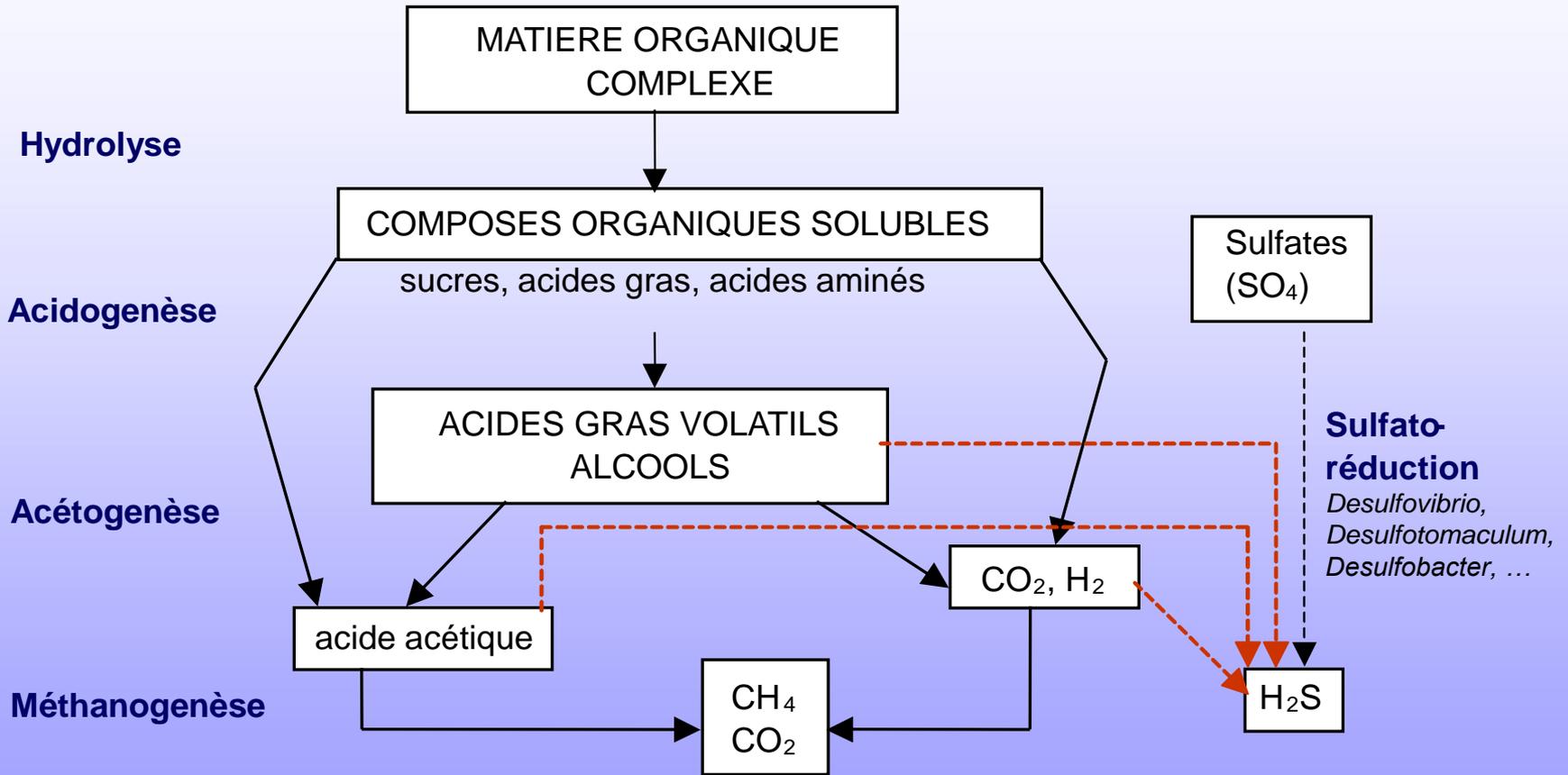


Electricité

TECHNOLOGIE DES TURBINES D'AERATION



Les phénomènes de biodégradation de la matière organique



Les Archaeobactéries méthanogènes

Genre : *Methano- sarcina
bacterium
coccus*

...

Archéobactéries

- Famille microbienne telle que les bactéries sulfato-réductrices, bactéries nitrifiantes, ...
- Rôle important lors de l'apparition de la vie sur terre
- Anaerobiose stricte : $rH < -400 \text{ mV}$
- Conditions de culture basiques : $6.8 < \text{pH optimum} < 8.5$
- Mésophiles 25 – 40 °C; Thermophiles 40 – 65 °C

Les Archaeobactéries méthanogènes

Substrats énergétiques simples et en nombre limité

Hydrogène + CO₂ ; Acetate; Methanol; Formiate; Methylated amine



{ *Methanobrevibacter,*
Methanobacterium, ...



{ *Methanosarcina,*
Methanococcus,
Methanosaeta, ...



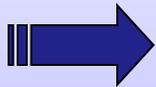
Plan de l'exposé

1. Variabilité des déchets méthanisables et généralités sur les processus de biodégradation
2. **Technologies de biométhanisation – maîtrise des paramètres**
3. Biométhanisation en phase solide : CET – biométhaniseur
4. Biométhanisation en phase liquide : exemples, coûts
5. Perspectives : digestion anaérobie en 2 étages $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_4$
6. Conclusions

La méthanisation : technologie au point

- procédés

- en phase liquide : < 15% MS (teneur en matière sèche)
- en phase sèche : 20 - 50 % MS

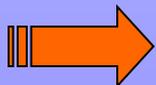


- en bioréacteur → 10 - 10 000 m³
- en CET (centre d'enfouissement technique) → Millions m³

- procédés

- mésophiles : 30 – 40°C
- thermophiles : 50 – 60°C

- importance de la biomasse : 1MWh_e / tonne DCO



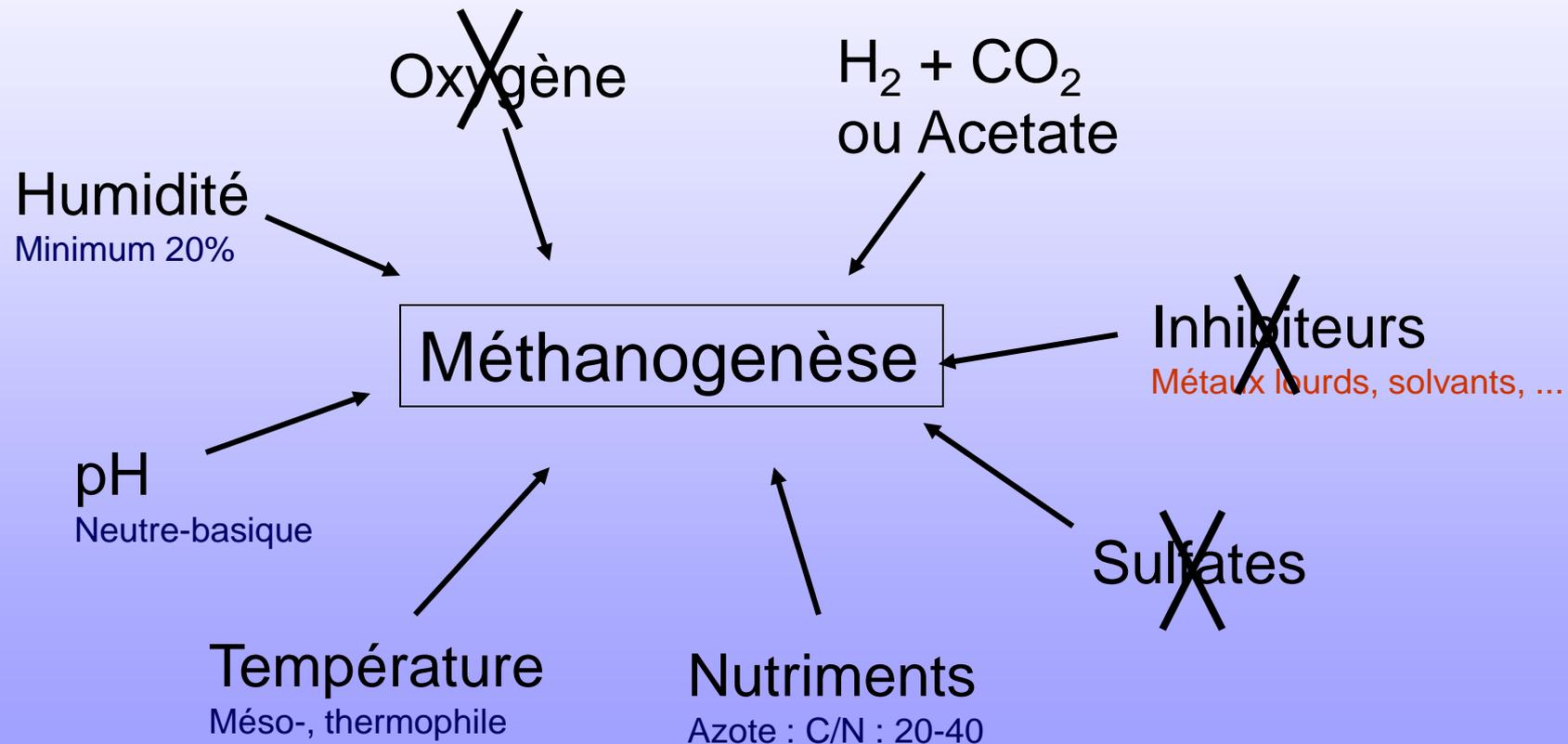
+ cogénération 10 kWe – 2 MWe
 250 kg – 48 t DCO/j

La biométhanisation de la matière organique

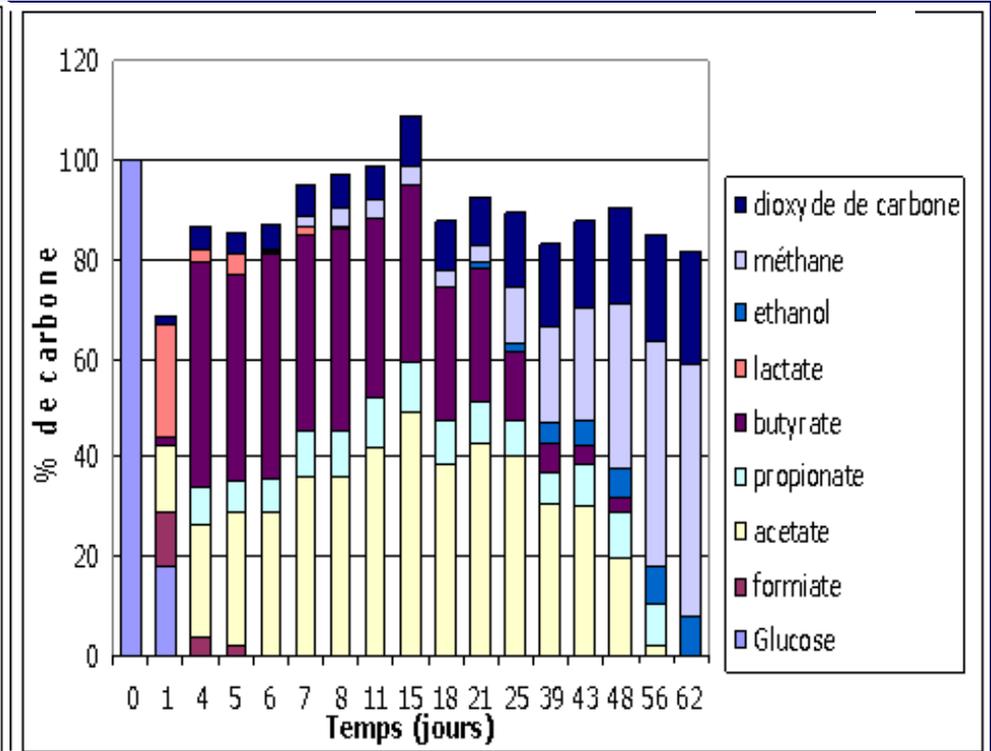
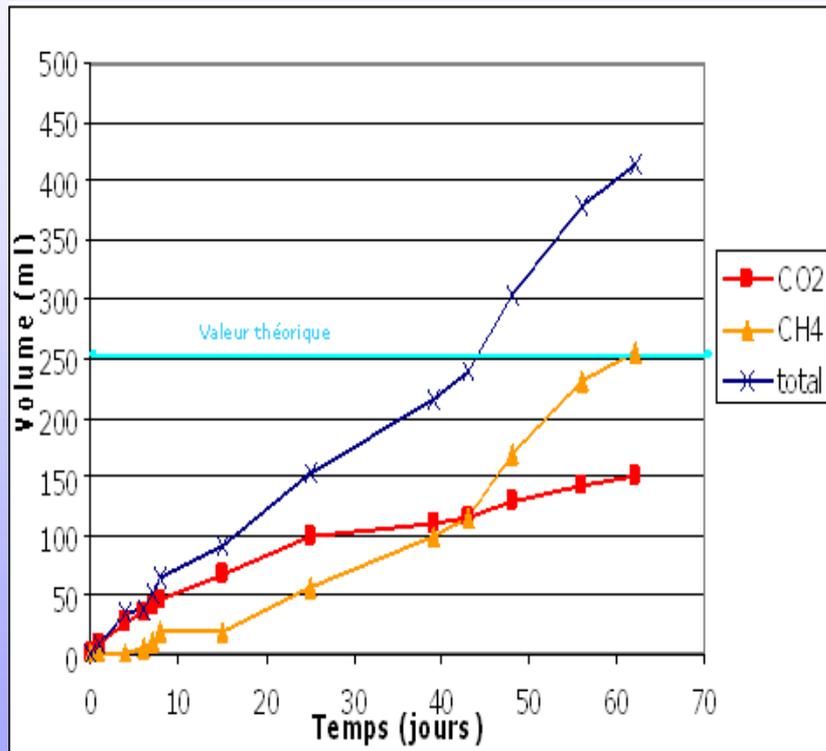


Critères	Bioréacteur	Décharge
Matières premières	- substrat établi comme optimum par rapport au micro-organisme donné	- substrat très variable
Micro-organisme	- micro-organisme choisi en fonction de la production - le milieu est déterminé en fonction du micro-organisme	- population microbienne complexe déterminée par la nature du milieu
Paramètres (pH, t°, aération)	- régulés	- évolution naturelle rem : pas d'aération ni d'agitation
Produits finaux	- biomasse + milieu + produit	- biomasse + lixiviats + biogaz

Les paramètres physico-chimiques à contrôler pour permettre la méthanogenèse



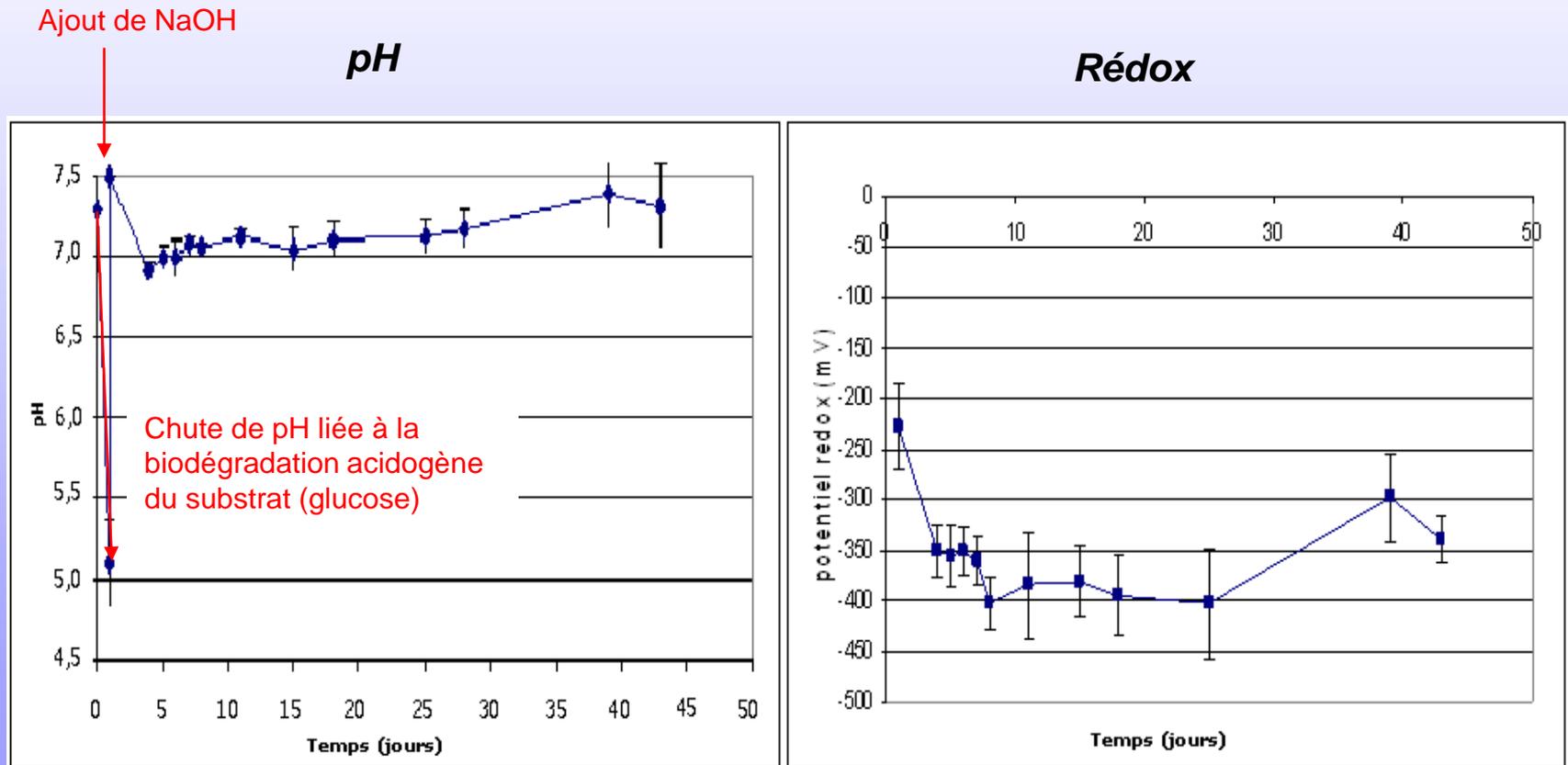
Evolution de la composition du biogaz et du milieu liquide



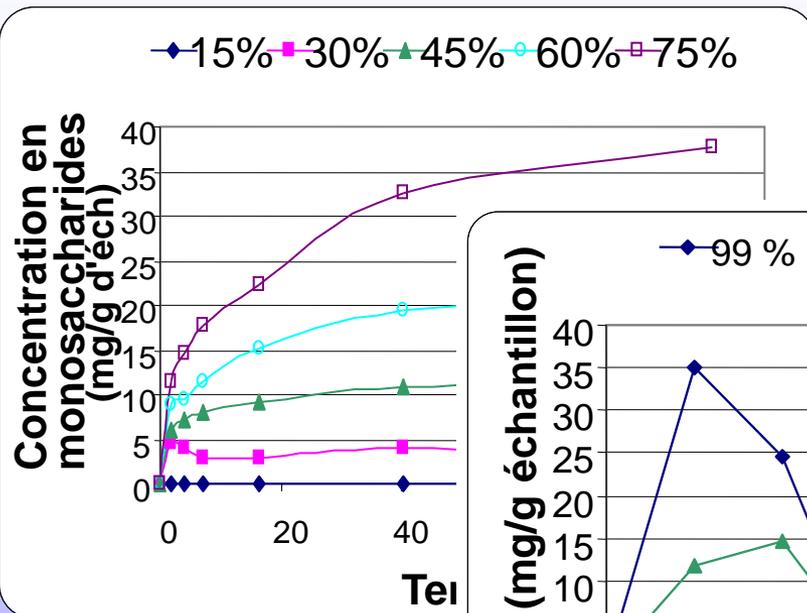
Biométhanisation à partir de glucose : substrat facilement biodégradable

Influence du pH et du potentiel d'oxydo-réduction (redox)

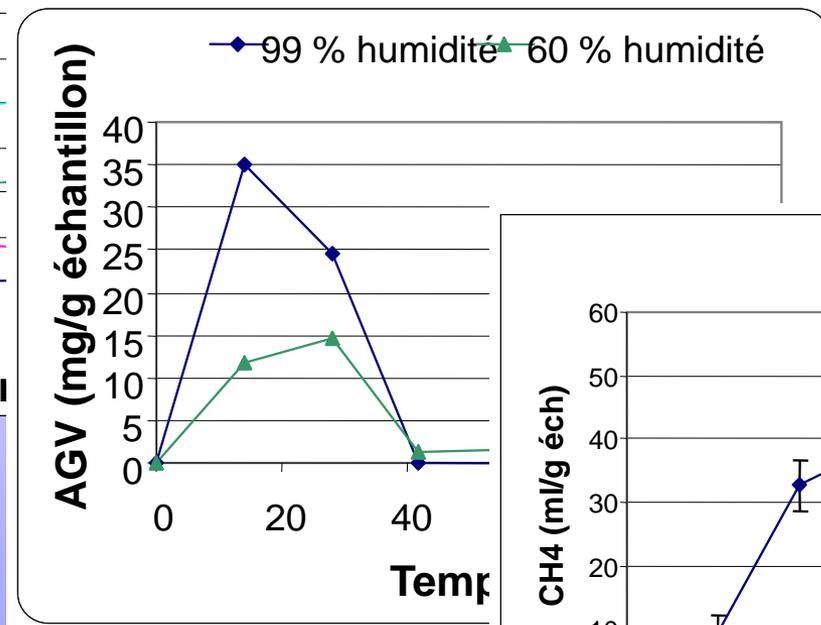
Ces paramètres permettent de vérifier les conditions et le bon fonctionnement de la méthanogenèse à la suite de l'acidogenèse



Influence de la teneur en eau des déchets sur les processus de biodégradation

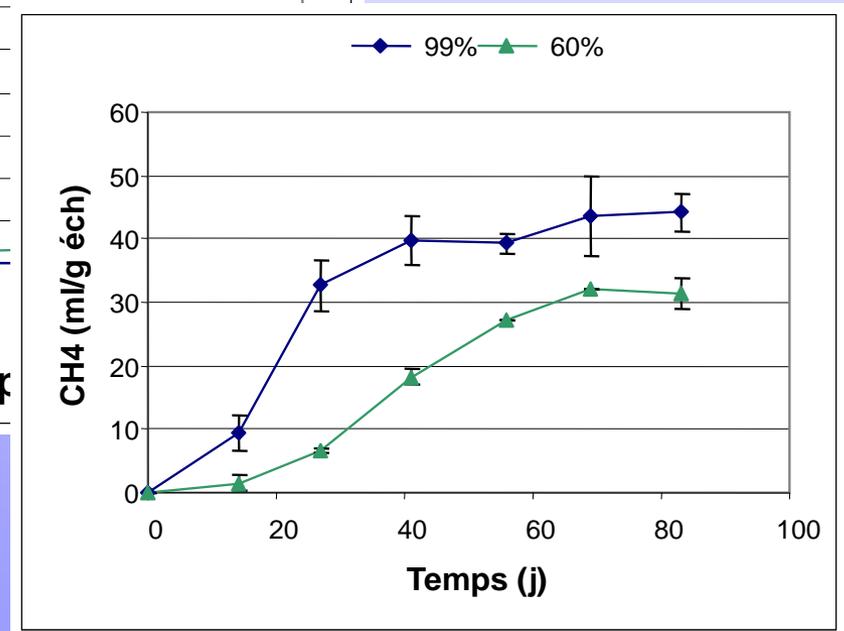


Hydrolyse enzymatique



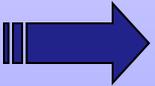
Acidogenèse

Déchets à 20% cellulose
production théorique de CH₄: 75 ml/g



Méthanogenèse

Maîtrise des intrants en biométhanisation

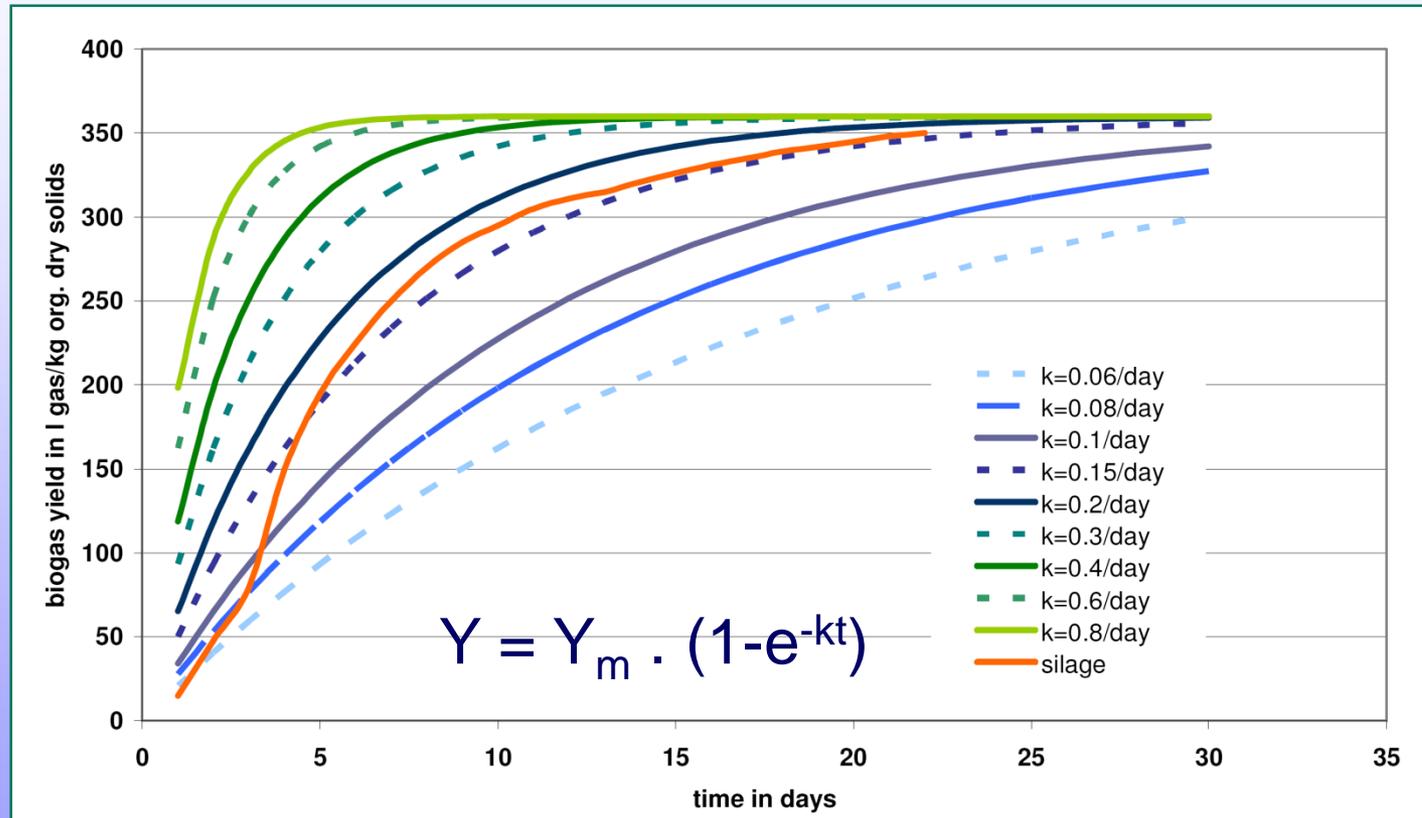
- prétraitement
 - si possible pour séparer/éliminer les contaminants
 - approprié sur le plan technologique, économique
- composition variable  association de matières
 - équilibre carbone/azote (C/N)
 - teneur en eau optimale
 - apports stables dans le temps

Maîtrise des intrants en biométhanisation

Matière organique	Equation de conversion chimique	Potentiel de production (L /kg DCO)			Biogaz 70% CH ₄
		CH ₄	CO ₂	Total	
Glucose	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CH_4 + 3 CO_2$	349	349	698	498
Cellulose/amidon	$(C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3 CH_4 + 3 CO_2)_n$	349	349	698	498
Protéine	$C_4H_6ON + 2,75 H_2O \rightarrow 2,13 CH_4 + 1,88 CO_2$	298	263	561	426
Matière grasse	$C_{55}H_{106}O_6 + 25,5 H_2O \rightarrow 39,25 CH_4 + 15,75 CO_2$	350	141	491	501

Maîtrise de la cinétique de production de CH₄

Temps de séjour défini en fonction des matières



Hydrolysis (extracellular enzymes)

Kepp U. (2010). 15th Eur. Biosolids ...Conf., Leeds

Carbohydrates

K = 0.5 – 2 / day

Lipids

K = 0.1 – 0.7 / day

Proteins

K = 0.25 – 0.8 / day

Différentes matières

→ données accessibles dans la littérature

→ tests d'évaluation du potentiel
méthanogène (tests BMP)

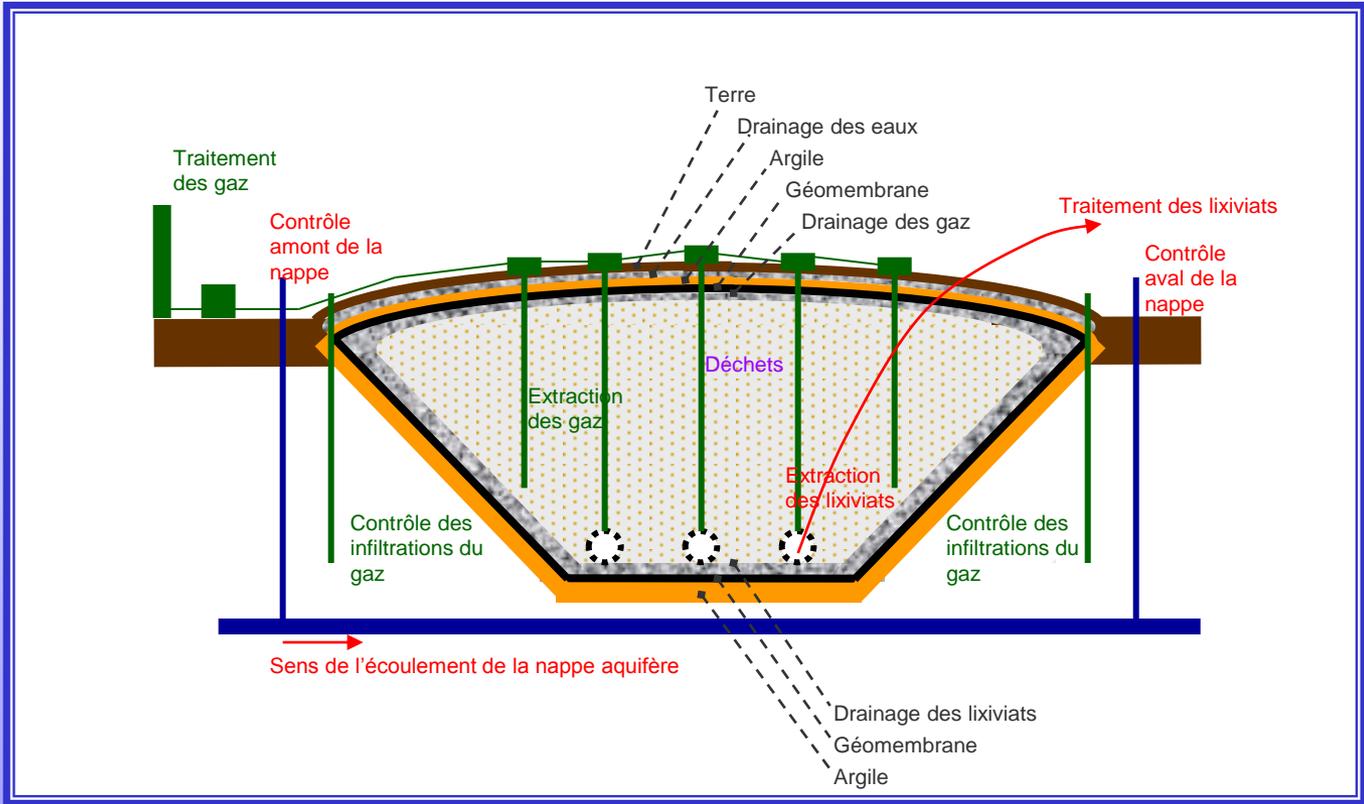
		Biogas yield in m ³ CH ₄ /kg VS	Kinetic coefficient in 1/day
Owens and Chynoweth (1993)	Office paper	0.369	0.136
	Corrugated box	0.278	0.058
	Magazines	0.209	0.116
	Newspaper	0.100	0.069
	Food packaging	0.318 – 0.349	0.083 – 0.141
	Waxed paper	0.34	0.083
	Grass	0.209	0.084
	Leaves	0.123	0.084
	Branches	0.134	0.035
	Yard waste	0.143	0.067
Veeken and Hamelers (1999)	Wholemeal bread		0.195
	Leaves		0.215
	Bark		0.076
	Straw		0.087
	Orange peelings		0.264
	Grass		0.09
Budiyono (2010)	Manure with rumen	0.085	0.11
	Manure, no rumen	0.032	0.224
Maehnert (2006) [#]	Maize silage	0.44	0.15
	Beet silage	0.55	0.3
	Rye silage	0.48	0.1
	Cattle slurry	0.32	0.15

[#] values calculated by the author from graphs

Plan de l'exposé

1. Variabilité des déchets méthanisables et généralités sur les processus de biodégradation
2. Technologies de biométhanisation – maîtrise des paramètres
3. **Biométhanisation en phase solide : CET – biométhaniseur**
4. Biométhanisation en phase liquide : exemples, coûts
5. Perspectives : digestion anaérobie en 2 étages $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_4$
6. Conclusions

Le CET : un bioréacteur à gérer



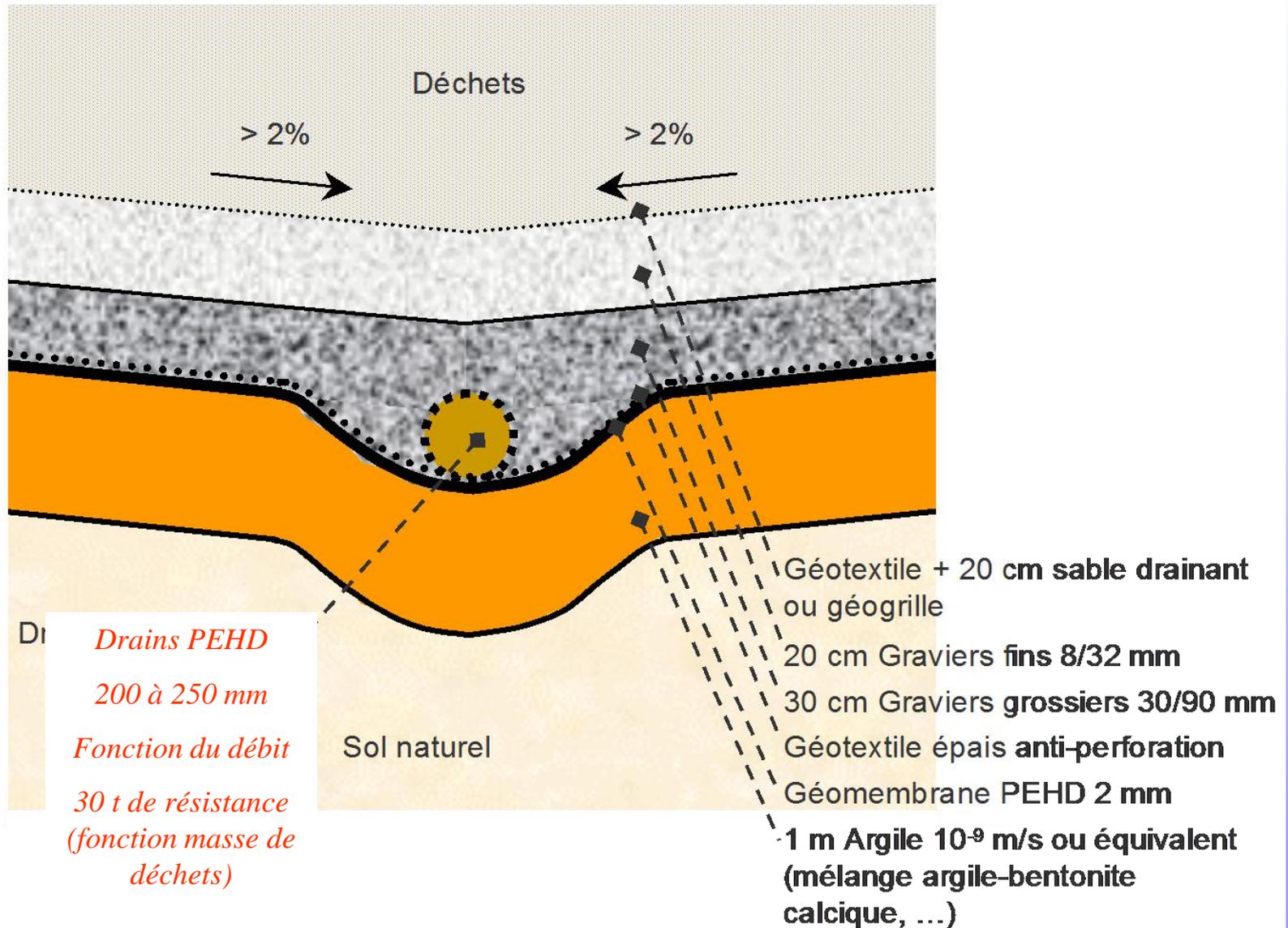
La gestion des CET en Région wallonne (similaire dans les autres régions d'Europe)

- population de 4 millions d'habitants
- 1 kg/hab/j de déchets produits
- 5 à 6 grands CET exploités depuis les années '70

Exemple pour un CET

- 27 ha – 35 à 45 m de profondeur
- **10 millions de tonnes** de déchets enfouis
- potentiel de 600 millions de m³ de méthane = 6000 GWh (sur 20 à 30 ans)
- 13 moteurs de 750 KW de puissance électrique
- **80 GWh d'électricité par an** (idem 20 éoliennes de 2 MW à 25% du fct continu)
- **140 GWh de calories valorisables** (chauffage central, ...)

Base du CET





Matériaux et vue d'ensemble du système de drainage des lixiviats dans un CET

*Sur les flancs : étanchéité
et drains de reprise
des lixiviats + géotextile*

CET en vision réelle



*Etanchéité de base,
collecte des lixiviats*



CET en exploitation

1. Déversements

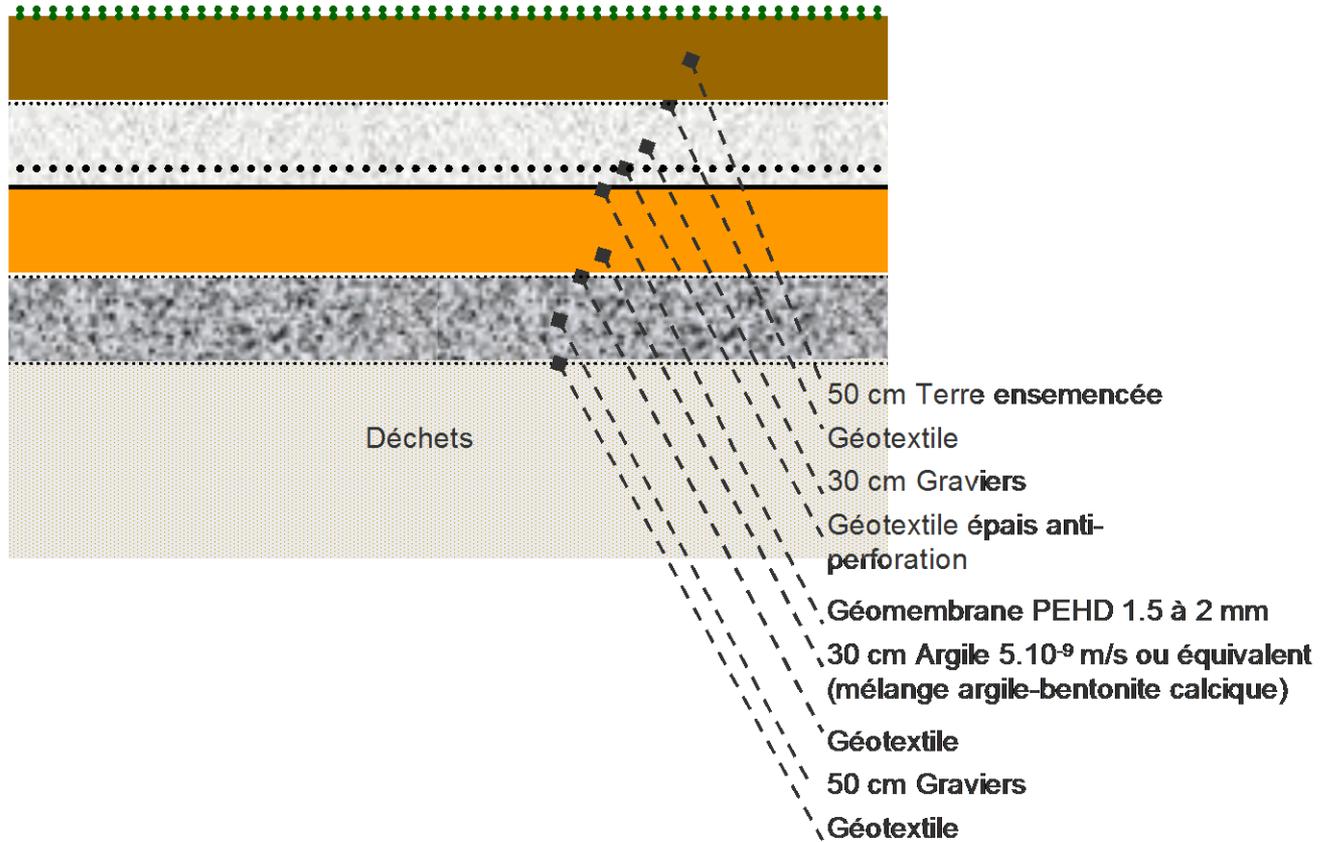
3. Compactage (25-40 tonnes)

2. Épandage



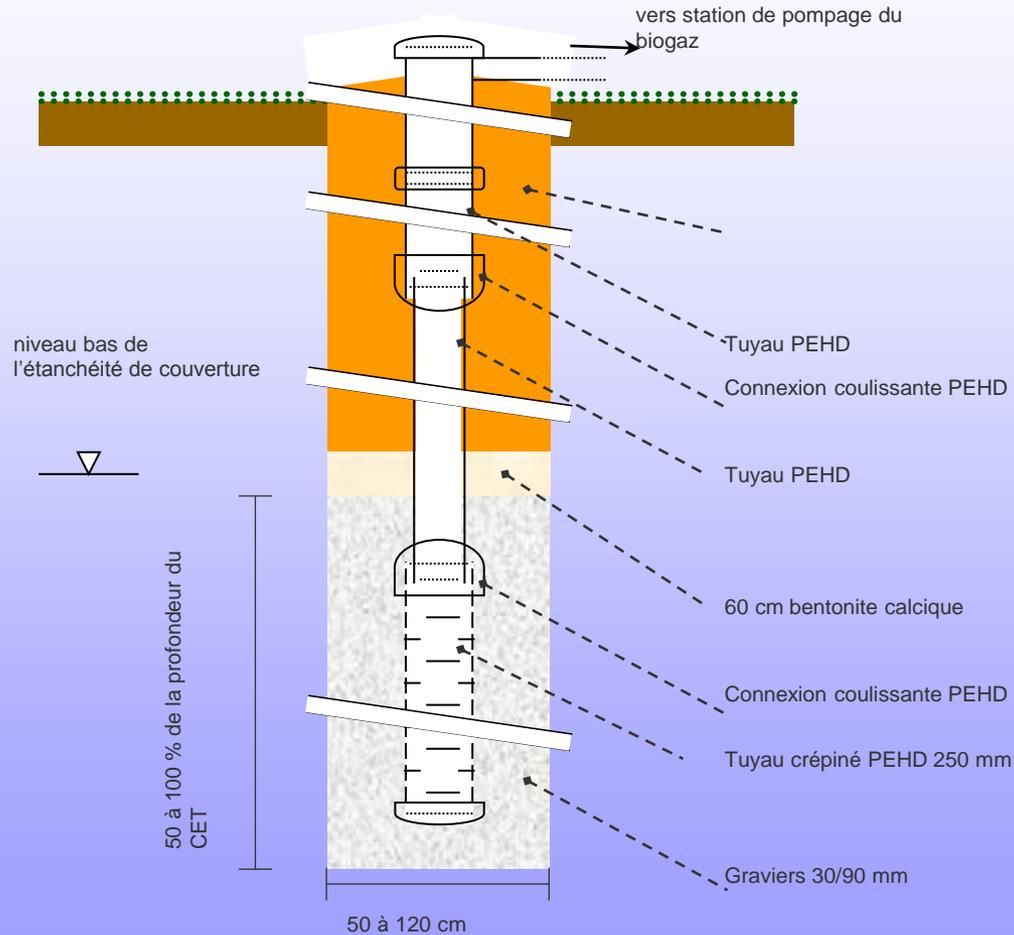


Description de l'étanchéité de couverture d'une décharge

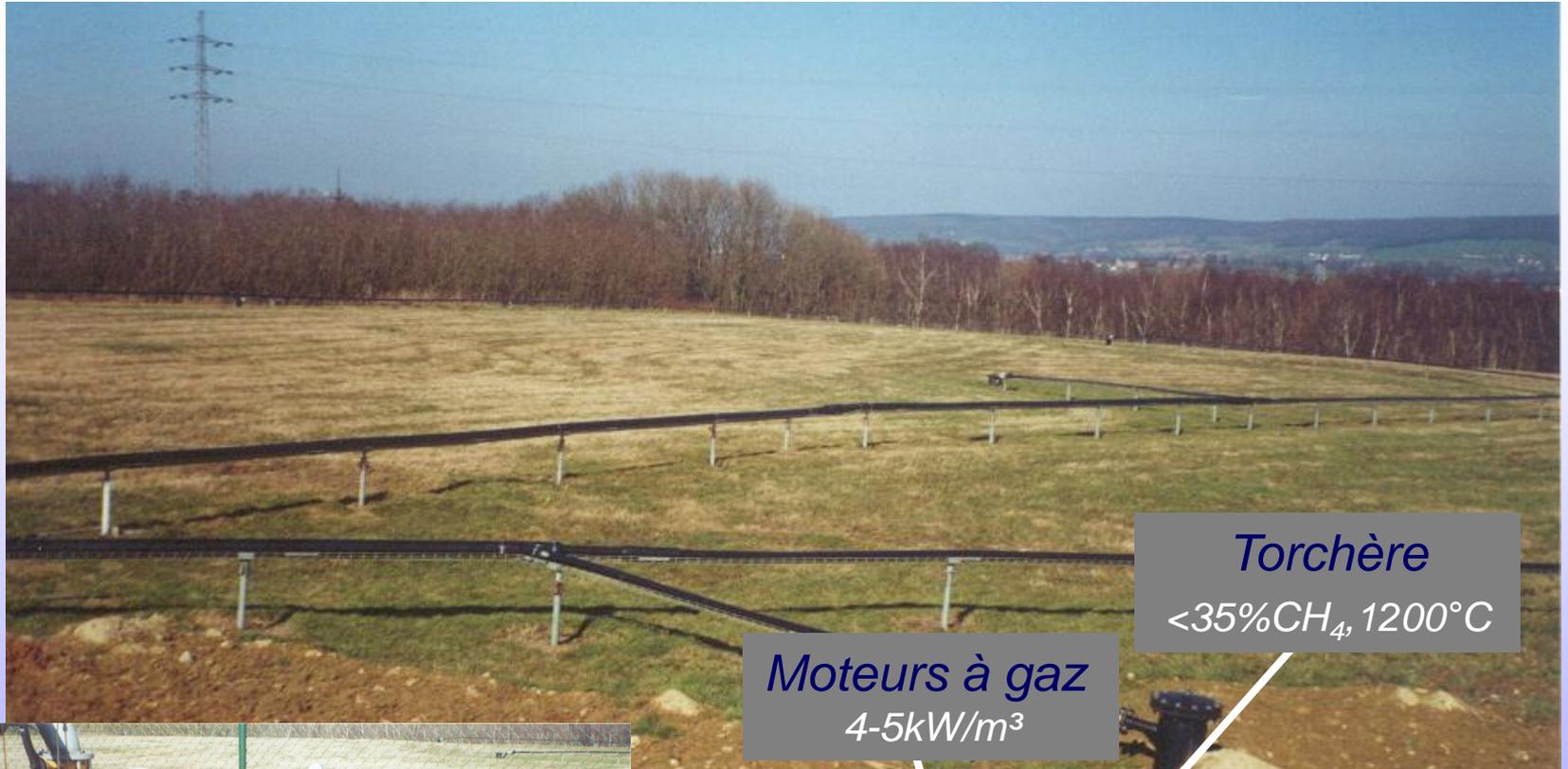


Description des puits de dégazage

- Éviter les poches de gaz sous pression
- Éviter les nappes de lixiviats perchées



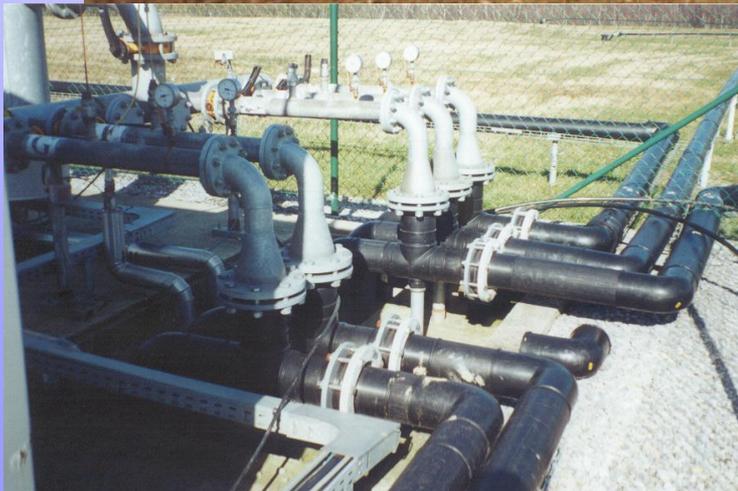
Réseau de collecte et traitement des gaz



Torchère

$<35\%CH_4, 1200^{\circ}C$

Moteurs à gaz
 $4-5kW/m^3$



Rendements de production de biogaz inférieurs en décharge

Biogaz produit par la **décomposition biologique** de la matière organique des déchets

- **10%** produit par une **décomposition aérobie** (déchets frais) ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)

- **90%** produit par une **décomposition anaérobie** ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 (+ \text{H}_2\text{S}) + \dots$)

dont **90 %** à partir de la cellulose qui sera dégradée à **70 – 77 %**

Remarque : Pour développer une activité méthanogène, il faut des conditions anaérobies (sans oxygène)

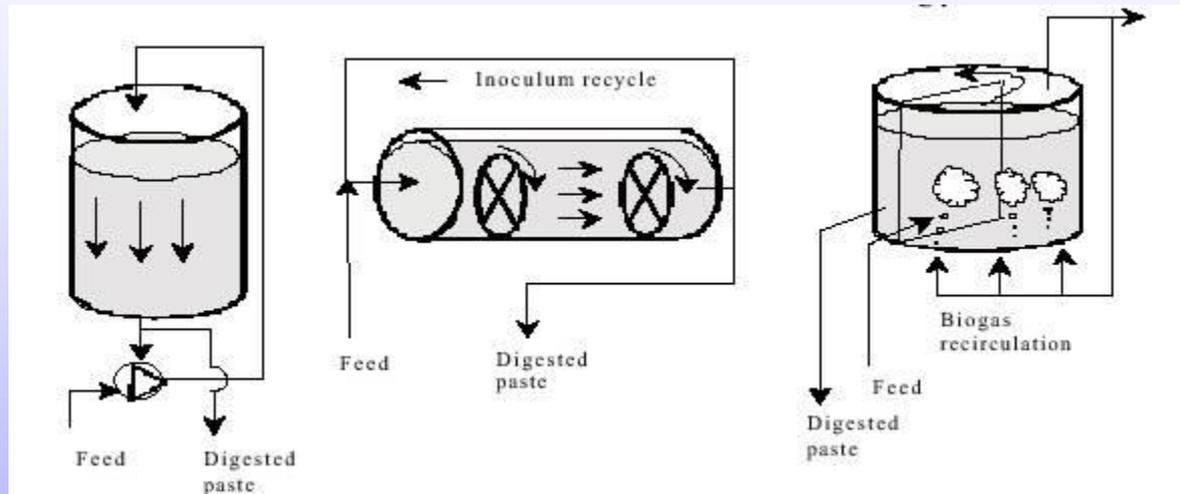
=> Le massif de déchet doit être assez important!
(quelques mètres d'épaisseur)

La biométhanisation en phase sèche

Procédés : Dranco

Kompogas et BRV

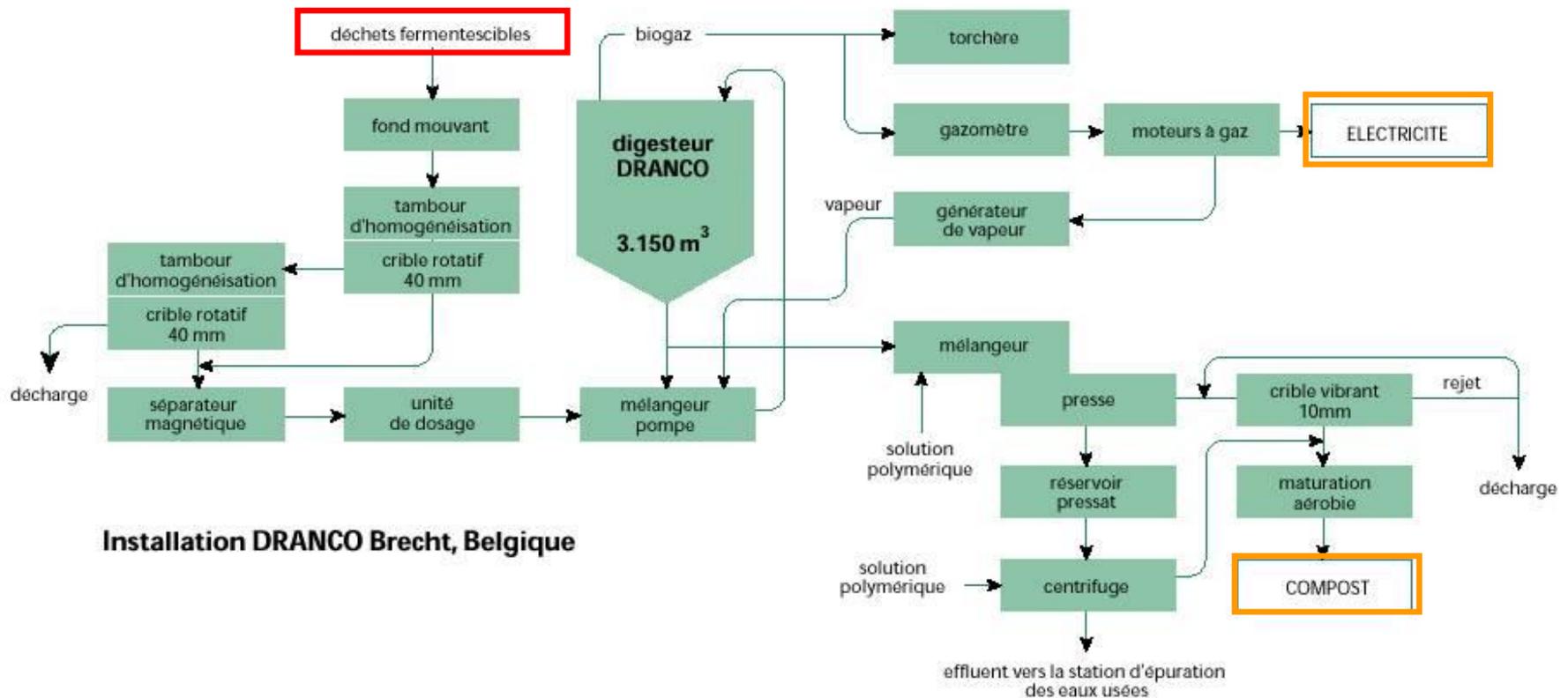
Valorga



~60 grandes installations en Europe (Ex. Idelux Tenneville) traitant

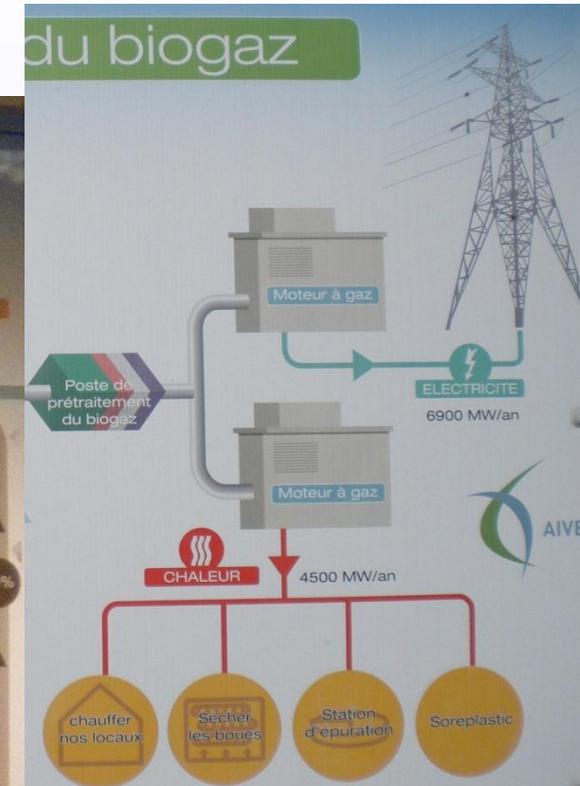
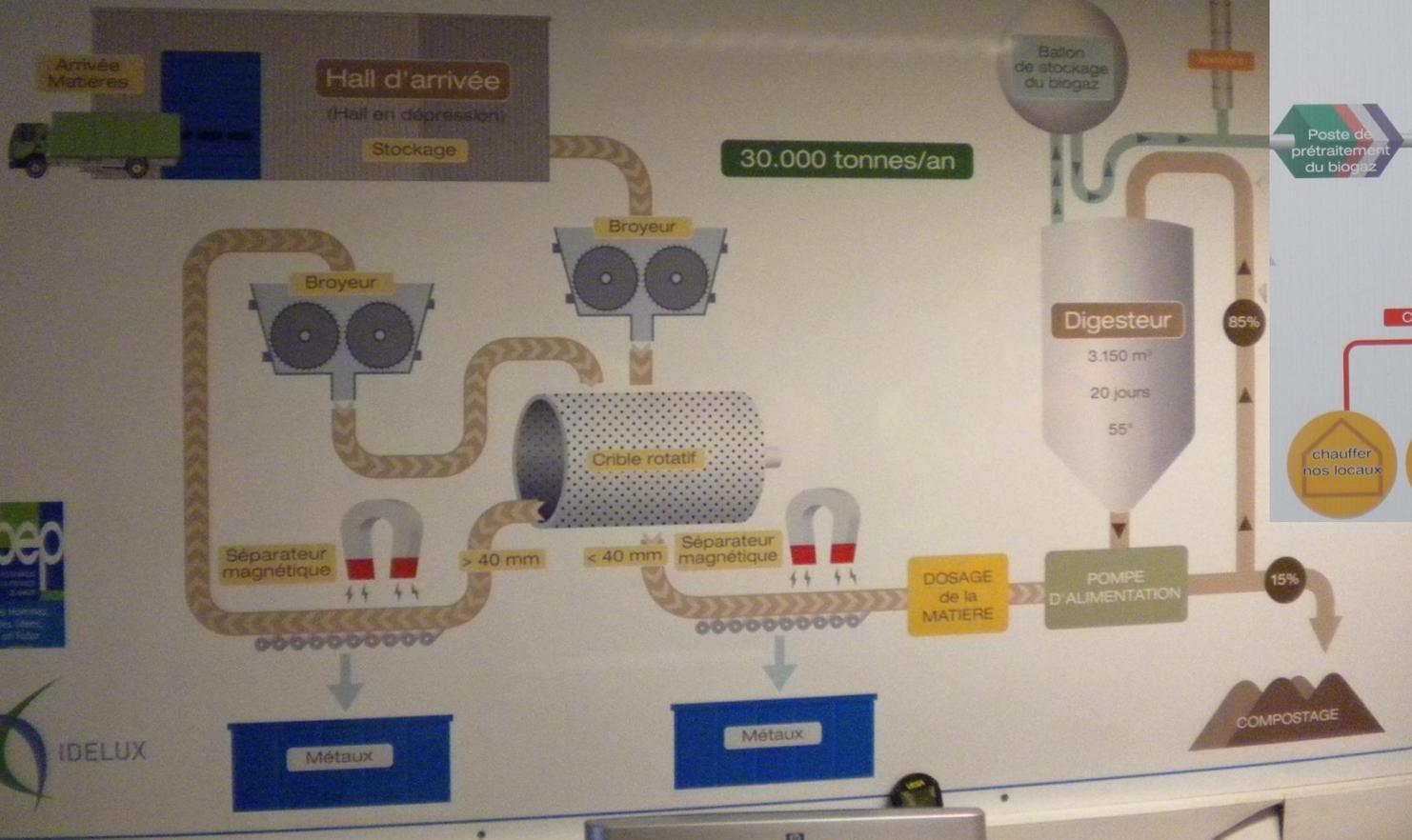
- cuves d'environ 3000 m³
- 10 000 à 50 000 tonnes de biomasse / année
- Input : 5 - 25 kg de DCO / m³ . j
- 10 – 20 jours de temps de rétention, C/N > 20
- 50 – 70 % de conversion de DCO
- Output : 1 - 8 m³ de CH₄ / m³ . j

Flowsheet complet : procédé Dranco



Installation DRANCO Brecht, Belgique

La BIOMETHANISATION







Plan de l'exposé

1. Variabilité des déchets méthanisables et généralités sur les processus de biodégradation
2. Technologies de biométhanisation – maîtrise des paramètres
3. Biométhanisation en phase solide : CET – biométhaniseur
4. Biométhanisation en phase liquide : exemples, coûts
5. Perspectives : digestion anaérobie en 2 étages $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_4$
6. Conclusions

La biométhanisation en phase liquide

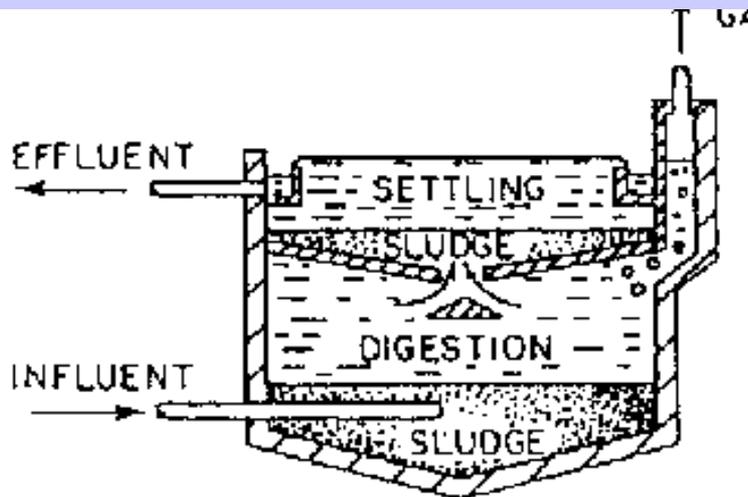
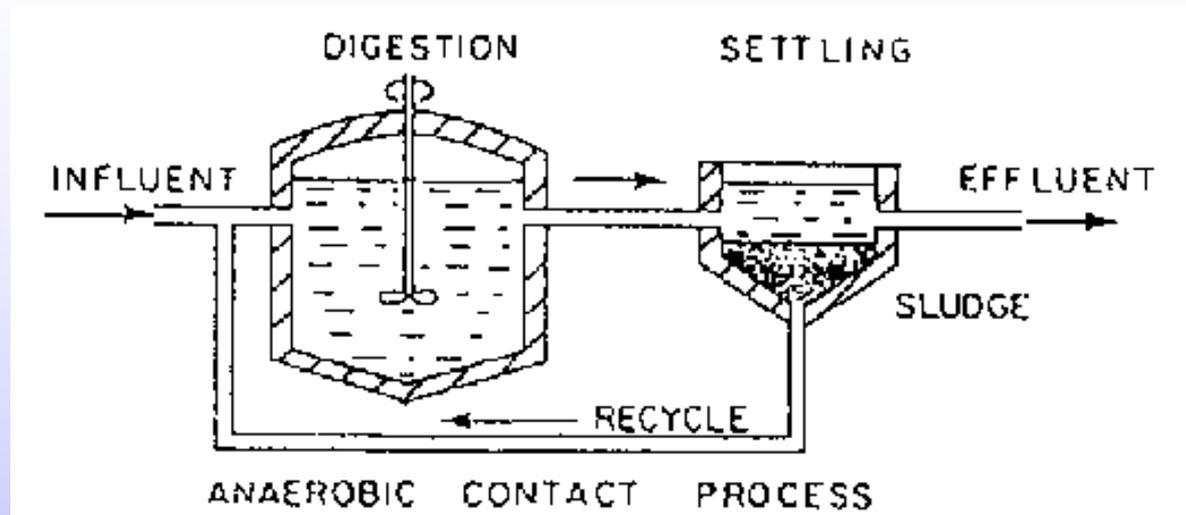
Fermentation en phase liquide continu (classique)

1 kg de DCO par $m^3_{\text{bior.}}$ par jour ($t_s \sim 5 - 8 \text{ j}$)
 1 m^3 de méthane - 1 kg de boues par m^3 input

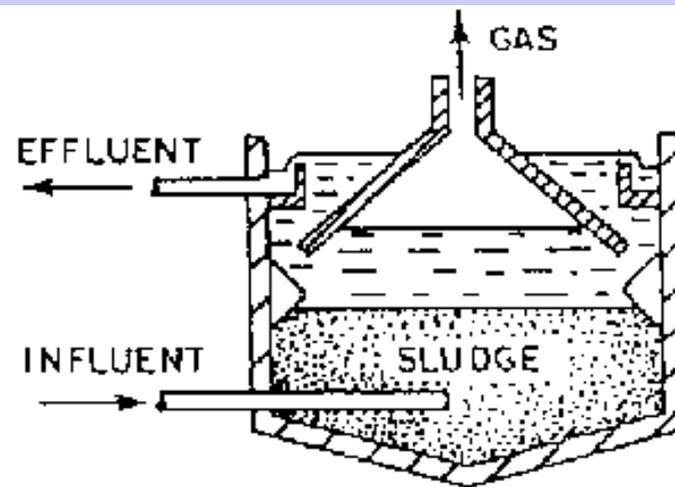
Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor (UASB et dérivés)

- 10 - 20 kg de DCO par $m^3_{\text{bior.}}$ par jour
à partir d'une charge de 0.5-5 kg DCO/ m^3
- 0,5 - 1 $KW_e/m^3_{\text{bior.}}$ (P_{inst} ; rendement > 35%)

Biométhanisation en phase liquide

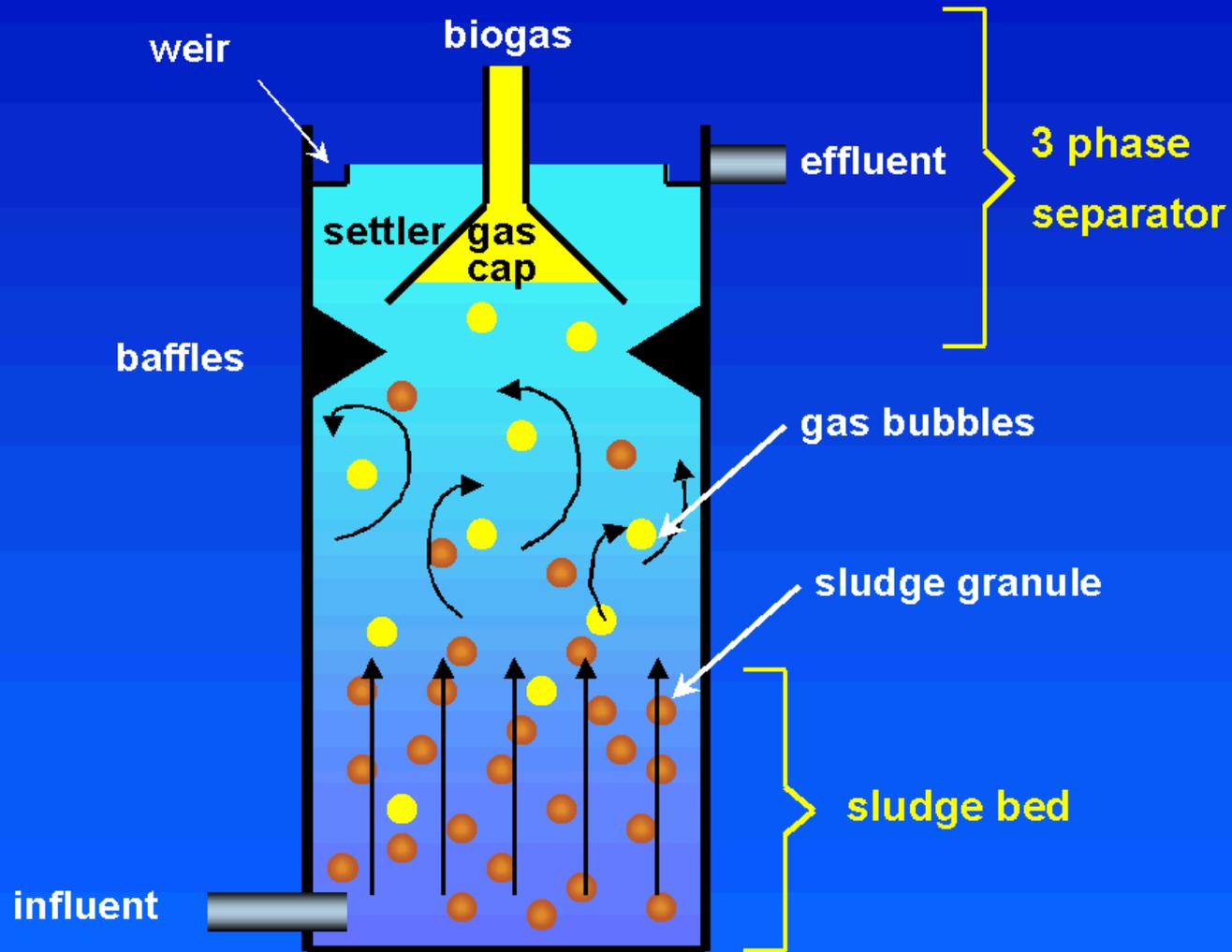


ANAEROBIC CLARIGESTER

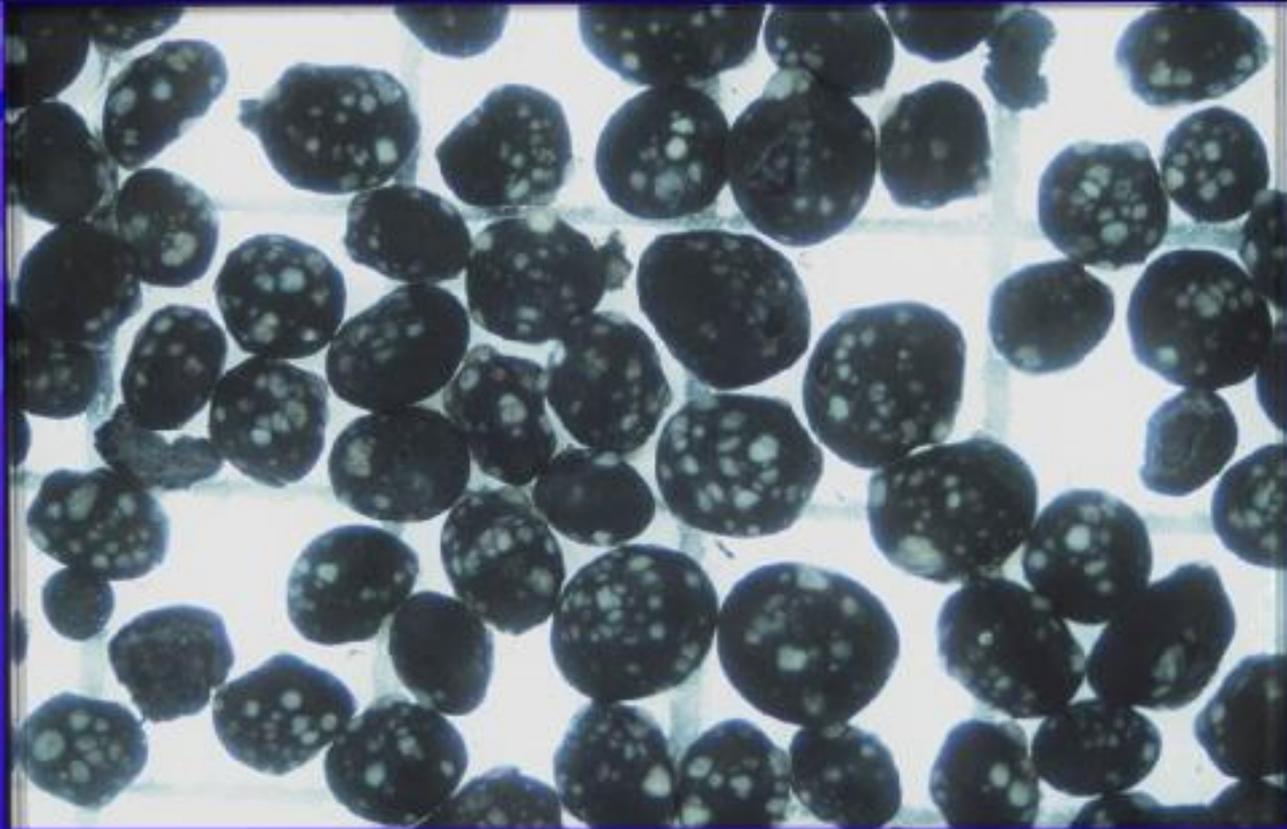


UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET

Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket



Anaerobic Sludge Granules

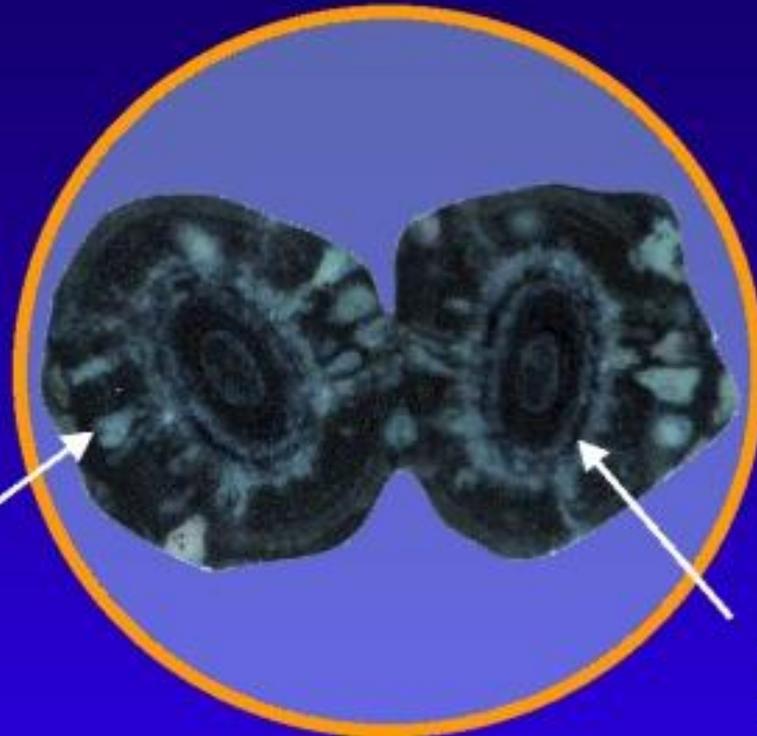


diameter 0.5 to 2 mm

Cross-Section Granules

mottled

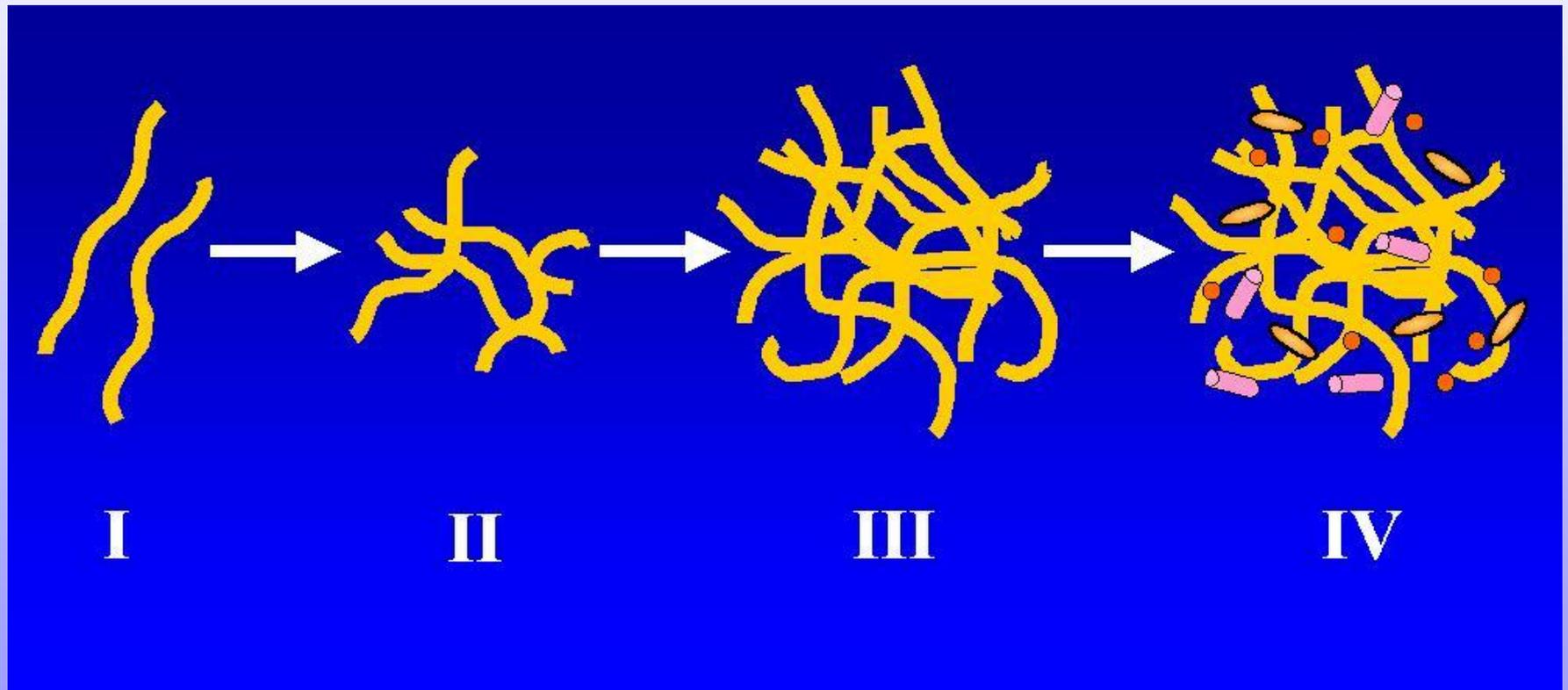
layered structure



**Close look at *Methanosaeta*
filaments on outer edge of granule**



Processus de granulation (bactéries filamenteuses *Methanosaeta*) : théorie du spaghetti

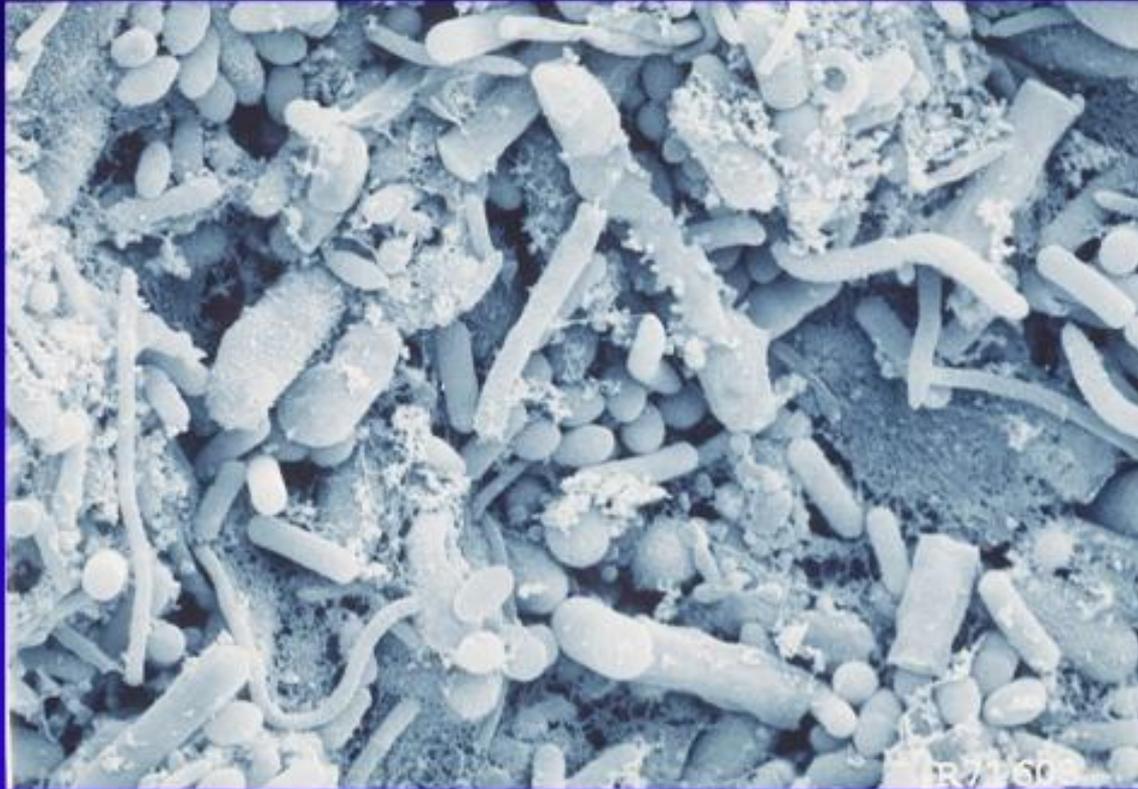


A Methanosaeta Granule



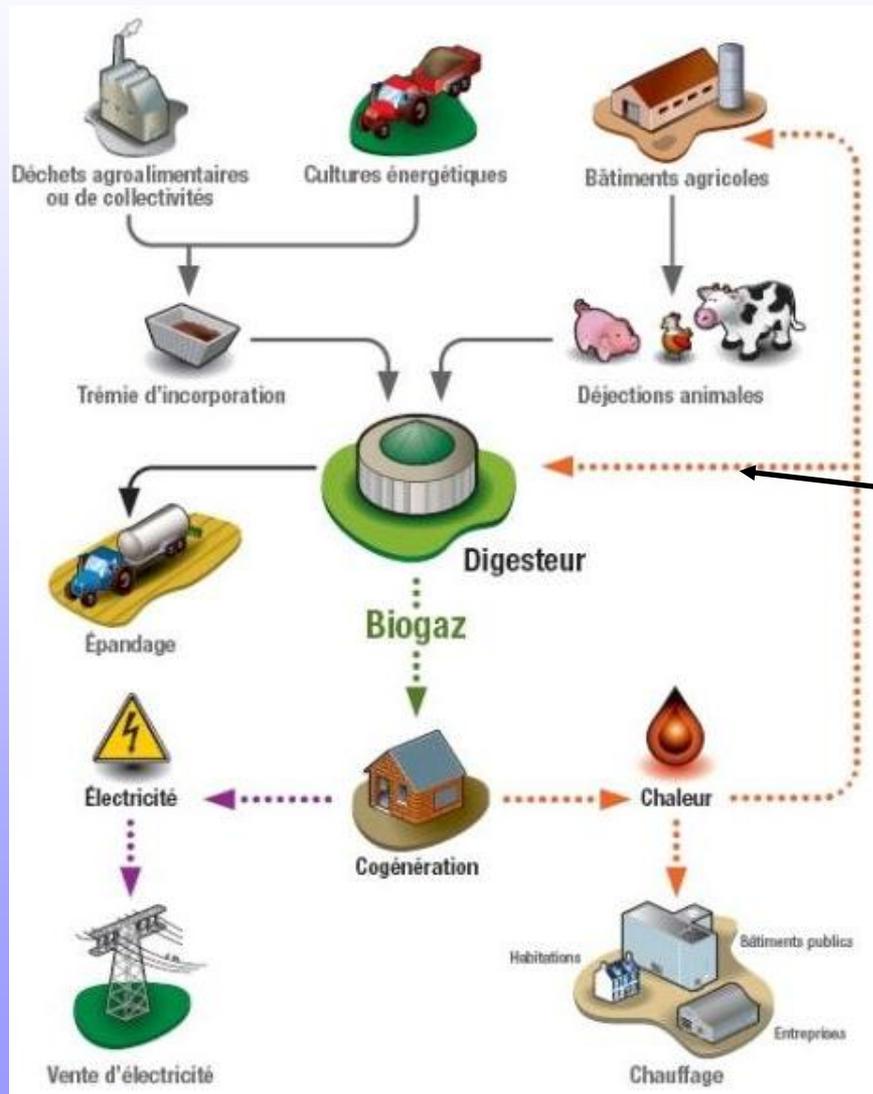
Cultivated in a UASB with Acetate

A “Mixed Culture” Granule



Cultivated in a UASB with Sucrose

Description d'implantation



Autoconsommation de l'unité: 15 à 30% de la production

Nombreux exemples en Allemagne, P-B, Flandres,...

Développements en Wallonie (env. 10 installations actuelles agricoles ou mixtes)

Éléments principaux d'une installation de 1 MWe



Incorporation des matières (semi-) solides



stockage biogaz

1 digesteur 4000 m³ pour t_s 20 jours

1 post-digesteur 2000 m³

Cogénération



Ependage des digestats liquides



Séparation S/L des digestats



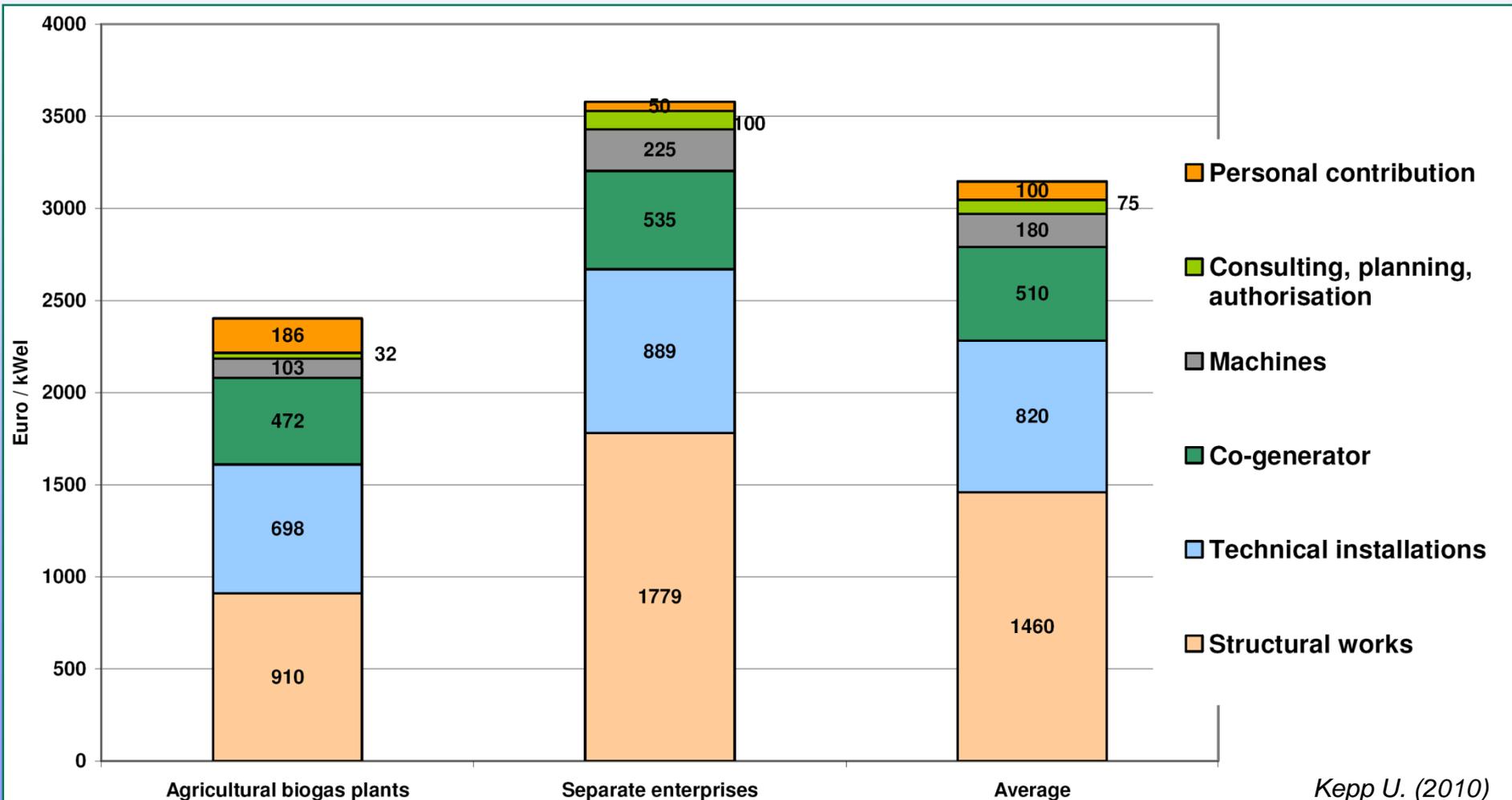
La biométhanisation en phase liquide

Investissements et coûts de fonctionnement (en Europe)

- Digesteur à cuve mélangée : 60-300 €/m³
- Equipements (électromec, cogen, ...) : ~ 650 000 € pour une puissance installée de 1 MWe (~ 8000 MWhe/an)

La biométhanisation en phase liquide

Ventilation des coûts d'investissement (en Europe)



La biométhanisation en phase liquide

Investissements et coûts de fonctionnement (en Europe)

- Digesteur à cuve mélangée : 60-300 €/m³
- Equipements (électromec, cogen, ...) : ~ 650 000 € pour une puissance installée de 1 MWe (~ 8000 MWhe/an)
- Coût annuel d'exploitation : 10 % de l'investissement
(50 % de coûts en personnel)

Gains potentiels sur la vente (en Belgique)

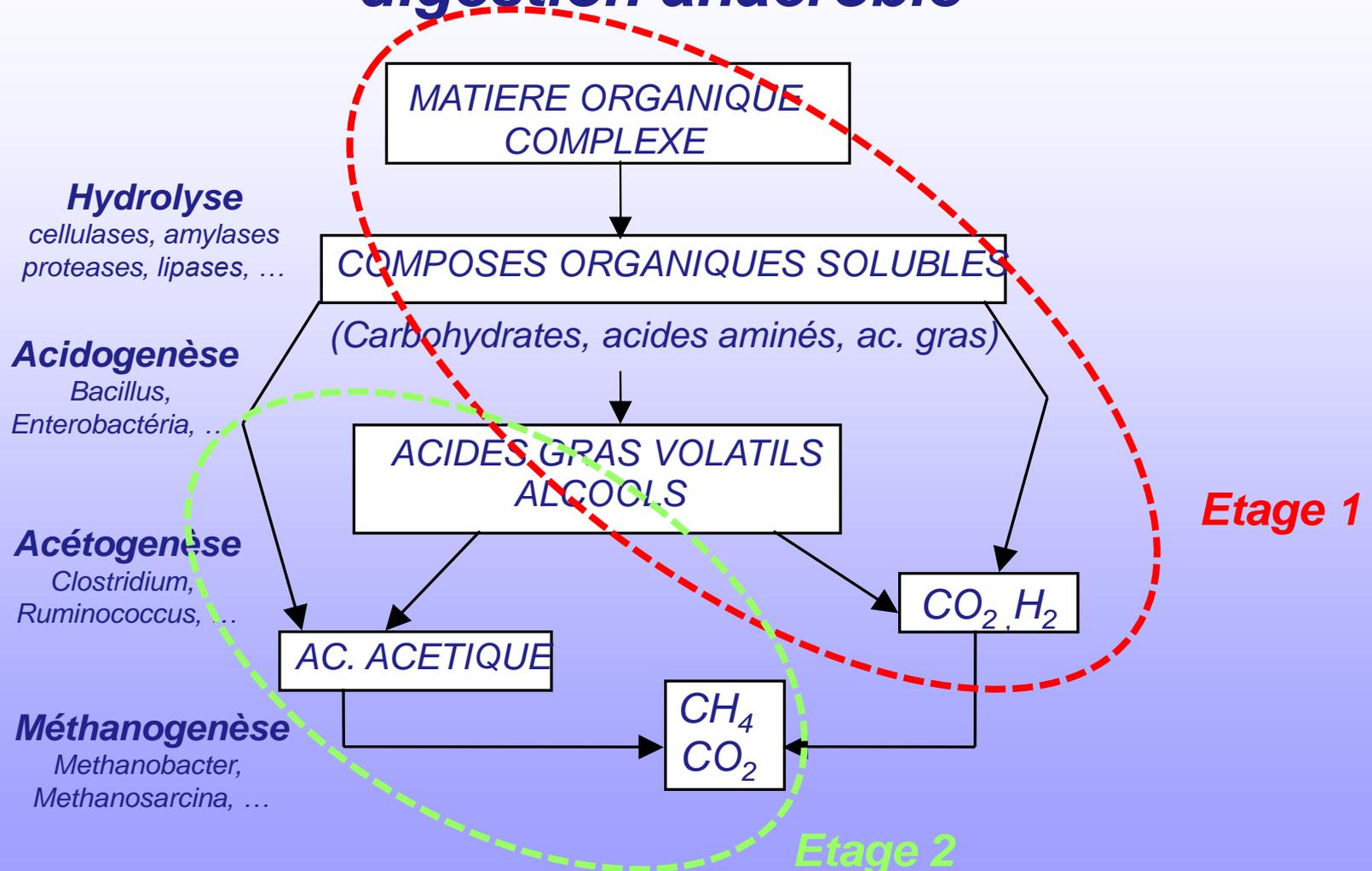
- 1,5 à 2 Certificats Verts par MWhe vendu pendant 15 ans
(65-85 € / CV)
- 40 € / MWhe vendu¹ (+ éventuellement 30 € / MWh calorifique)

(¹) Prix d'achat de l'électricité : ~100 € / Mwhe en industrie; ~200 € / MWhe domestique

Plan de l'exposé

1. Variabilité des déchets méthanisables et généralités sur les processus de biodégradation
2. Technologies de biométhanisation – maîtrise des paramètres
3. Biométhanisation en phase solide : CET – biométhaniseur
4. Biométhanisation en phase liquide : exemples, coûts
5. Perspectives : digestion anaérobie en 2 étages $\rightarrow H_2 + CH_4$
6. Conclusions

Processus de biodégradation digestion anaérobie



Perspectives : Digestion anaérobie en 2 étages → H₂ + CH₄

→ **Amélioration du procédé** / intégration dans les agro-industries

- *Resistance aux chocs d'alimentation (déjà éprouvé : Pohland 1971)*
- *Production rapide d'un fuel (acidogenèse plus rapide que methanog.)*
- *Rendement énergétique accru 10-30% selon le procédé, ...*

→ **Diversité des fuels énergétiques – avantages de l'H₂**

- *Densité d'énergie : $DE_{H_2} = 33 \text{ kWh/kg } H_2 = 2.4 DE_{CH_4}$*
- *Combustion : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ $CO_2 = \emptyset$*
- *Potentialités des piles à combust. : $Yields_{FC} > Yields_{engine}$*

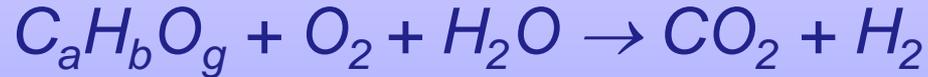
Production d'hydrogène

- *Reformage du méthane (800 °C)*



- *Oxydation partielle des hydrocarbures*

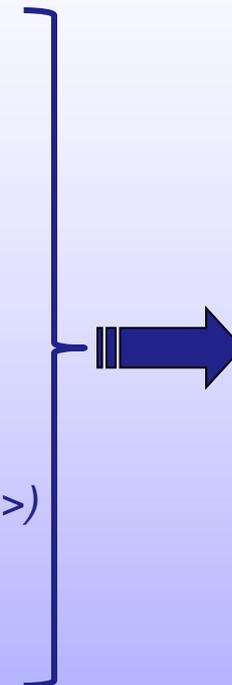
- *Gazéification du charbon/biomasse (%MS>>)*



- *Electrolyse de l'eau*



- *Production par voie microbiologique*

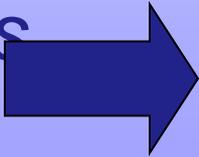


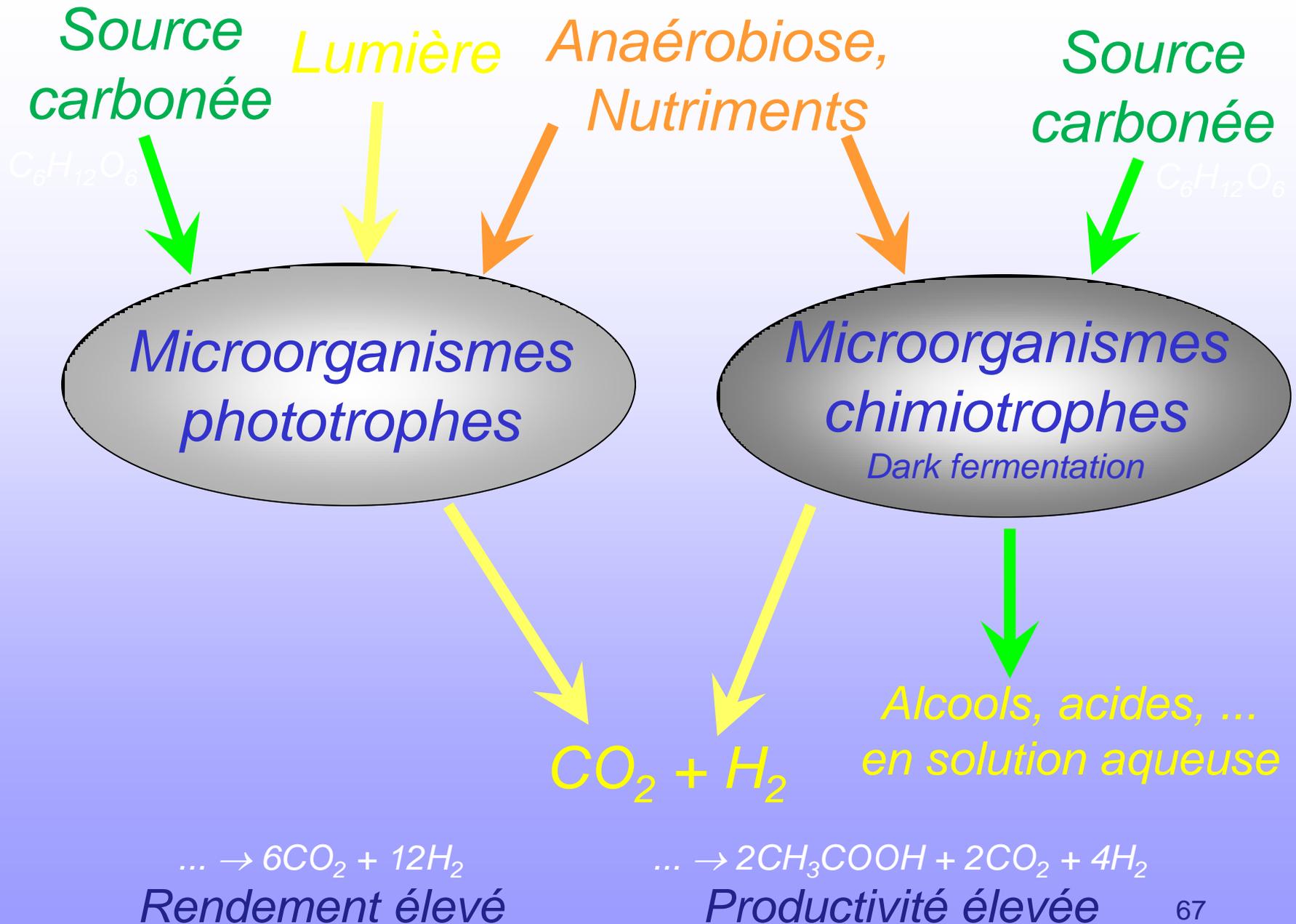
*95% H₂ - production industrielle
(500 10⁹ Nm³/year)*

Voie microbiologique de production d'H₂

Clostridium, Ruminococcus, Aeromonas, Bacillus, Escherichia, Citrobacter, Chlorobium, Rhodospirillum, Chromatium, Chlamydomonas ...

Microorganismes :

- *Bactéries*
 - *Algues*
- 
- *phototrophes*
 - *chimiotrophes*

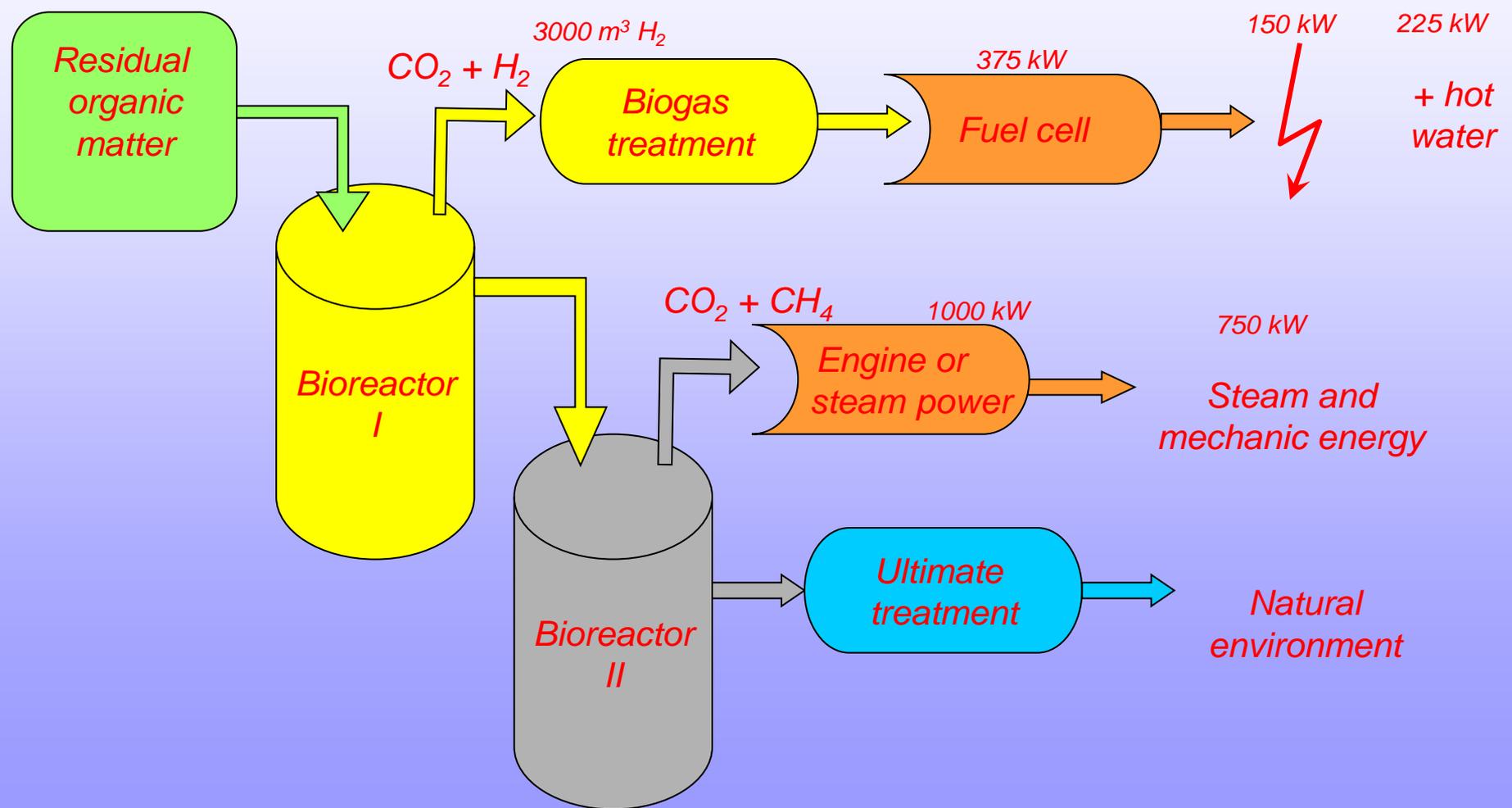


Production de biohydrogène par dark-fermentation

- *mieux adapté que les autres bioprocédés pour des applications industrielles à partir de biomasse et eaux usées*
→ *réduction de pollution + production d'énergie*
- *70 - 250 m³ H₂ par tonne de DCO*
- *3 - 12 m³ H₂ par m³_{bior.} par jour*
(*digestion anaérobie classique: 0,3 – 6 m³ CH₄ / m³.j*)
- *substrats = résidus liquides ou solides contenant des carbohydrates (amidon, saccharose, lactose, ...)*
- *poursuivie par une biométhanisation efficace*

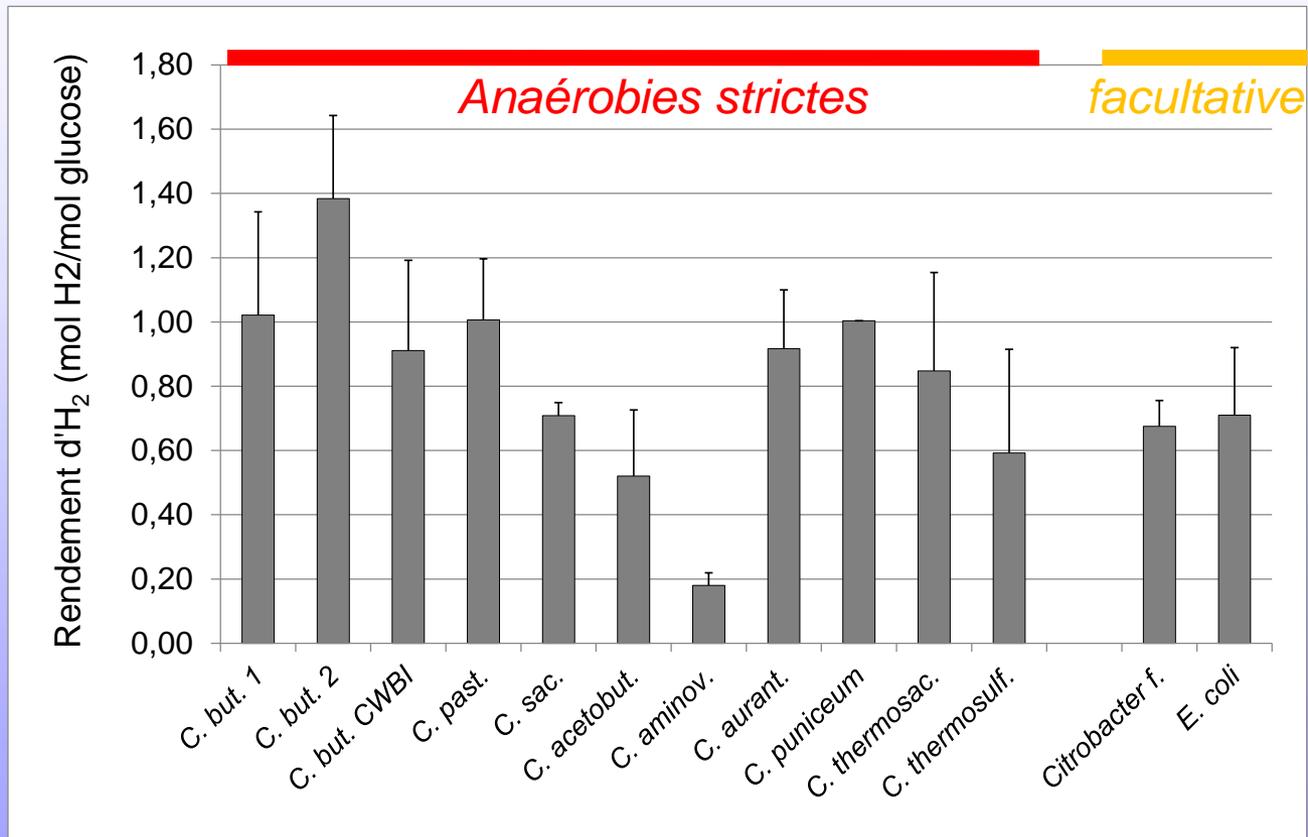
Brewery effluents
 10 000 m³/d wastewaters
 1400 mg/L DBO₅

Exemple d'installation de ~1,5 MW



BioH₂ - 1.1. : screening en fioles

Comparaison des rendements de production d'H₂

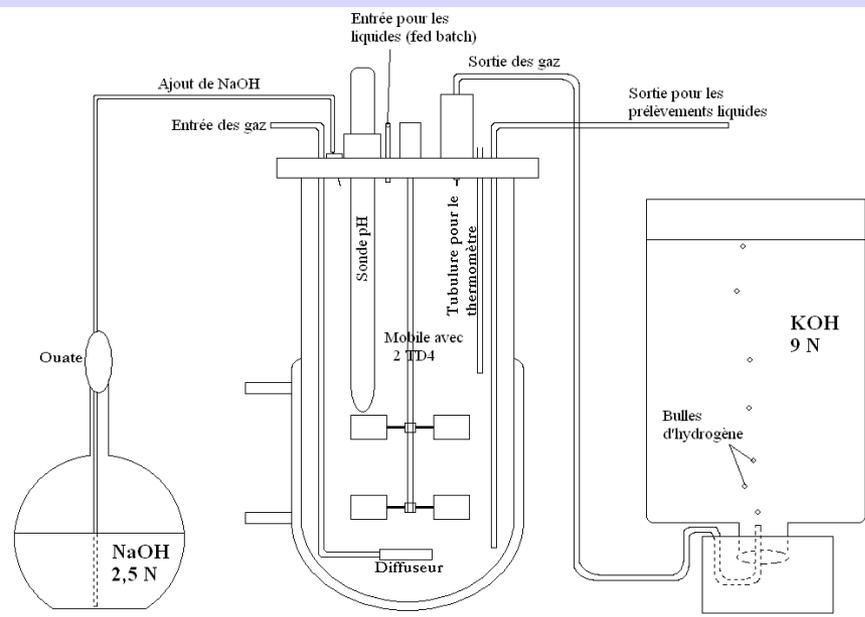


→ performances variables : - Clostridium > anaérobies facultatives
- C. butyricum > autres Clostridium spp.
> souches thermophiles

BioH₂ - 1.2. : screening en bioréacteur

Comparaison des souches retenues en bioréacteurs

→ confirmation de l'**intérêt du screening** et des performances des souches retenues en **conditions régulées**

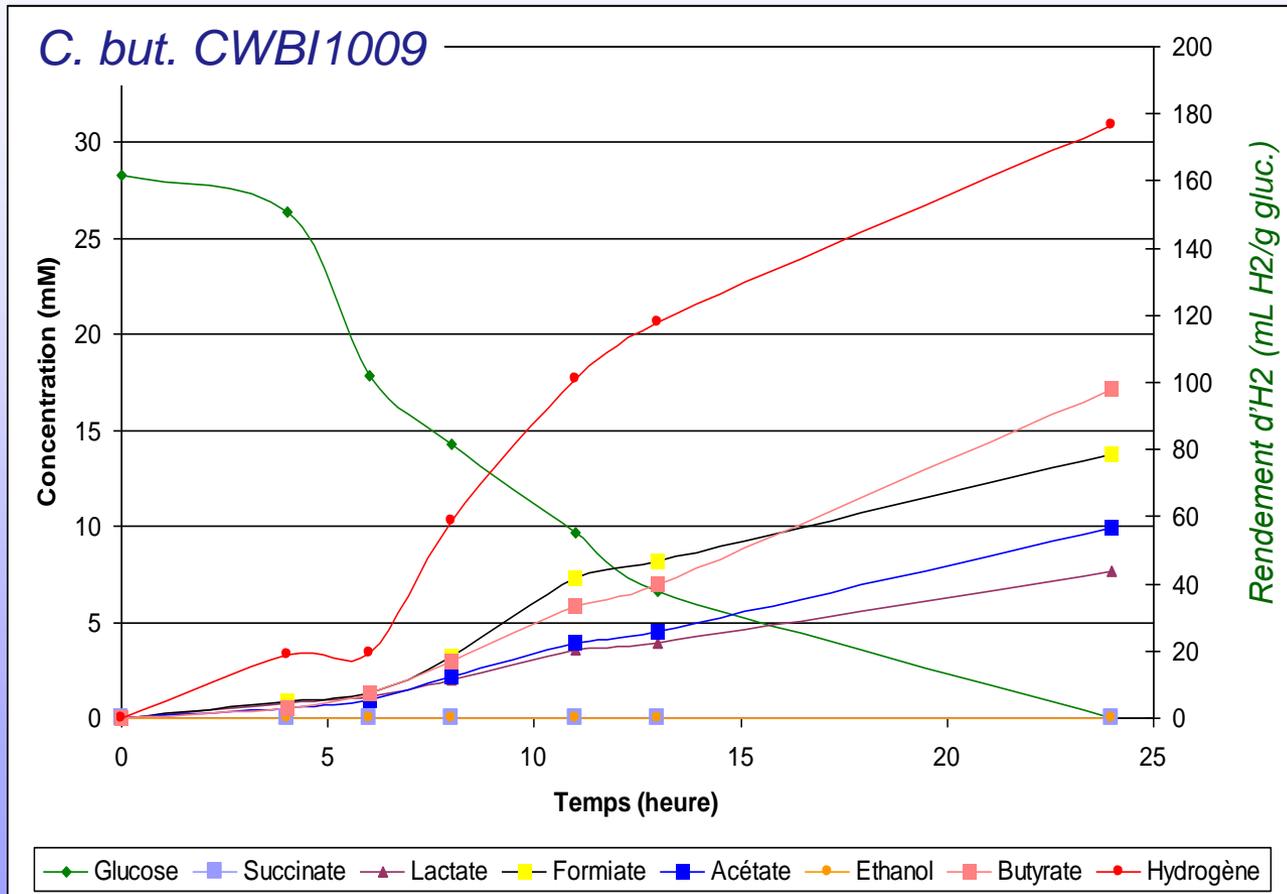


bioréacteur de 2,3 L

- **pression atmosphérique**
→ suivi régulier du volume cumulé d'H₂
- **pH régulé**
→ pH optimum
- 1 souche anaérobie facultative
→ *Citrob. freundii* CWBI952
- 1 souche anaérobie stricte
→ ***C butyricum*** CWBI1009
- 1 population mixte
→ UASB 80°C / 30 min

BioH₂ - 1.2. : screening en bioréacteur

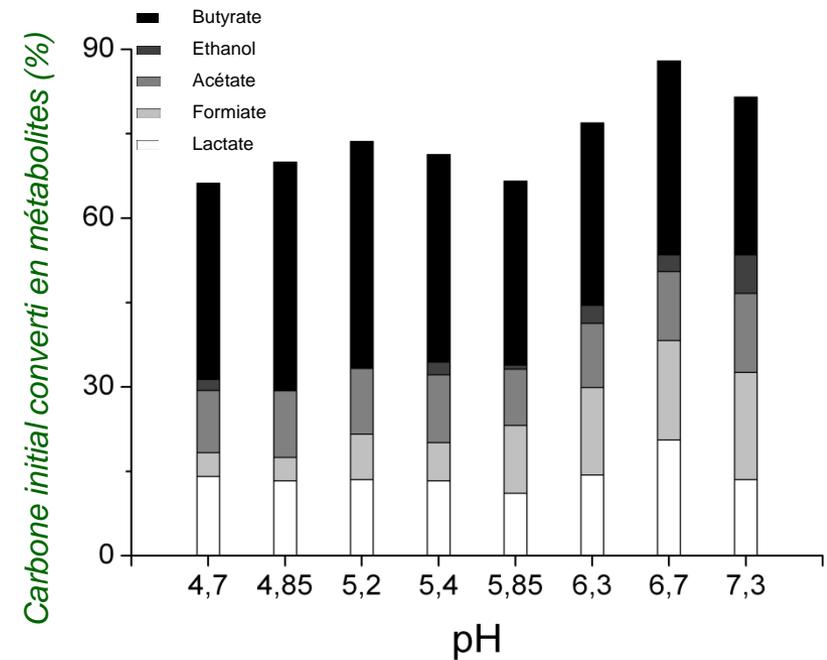
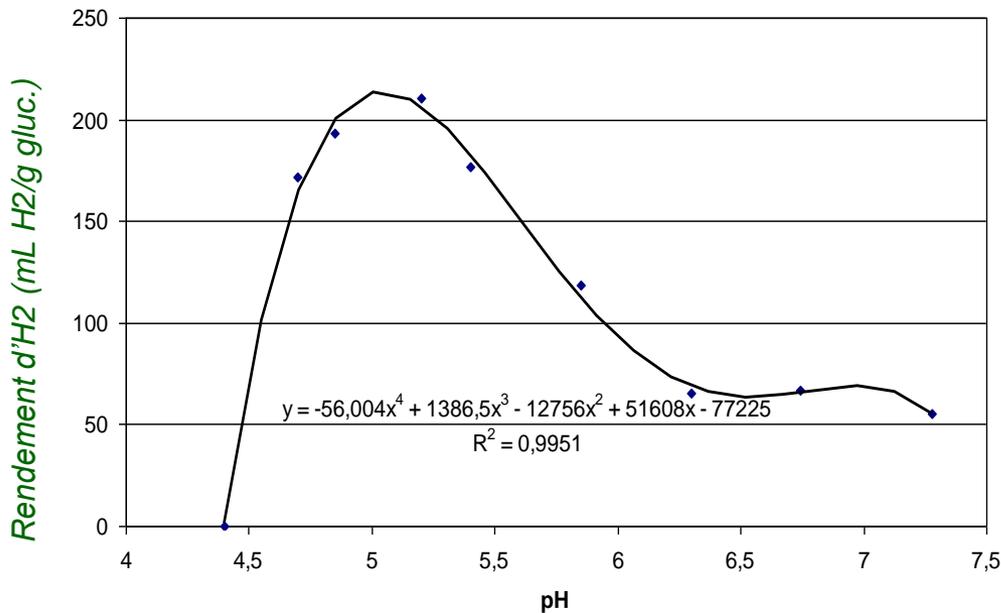
Suivi de la production d'H₂ en fonction du temps d'incubation



→ H₂, acides et éthanol = métabolites primaires

BioH₂ - 2.1. : effet du pH

Rendements de production d'H₂ et autres métabolites

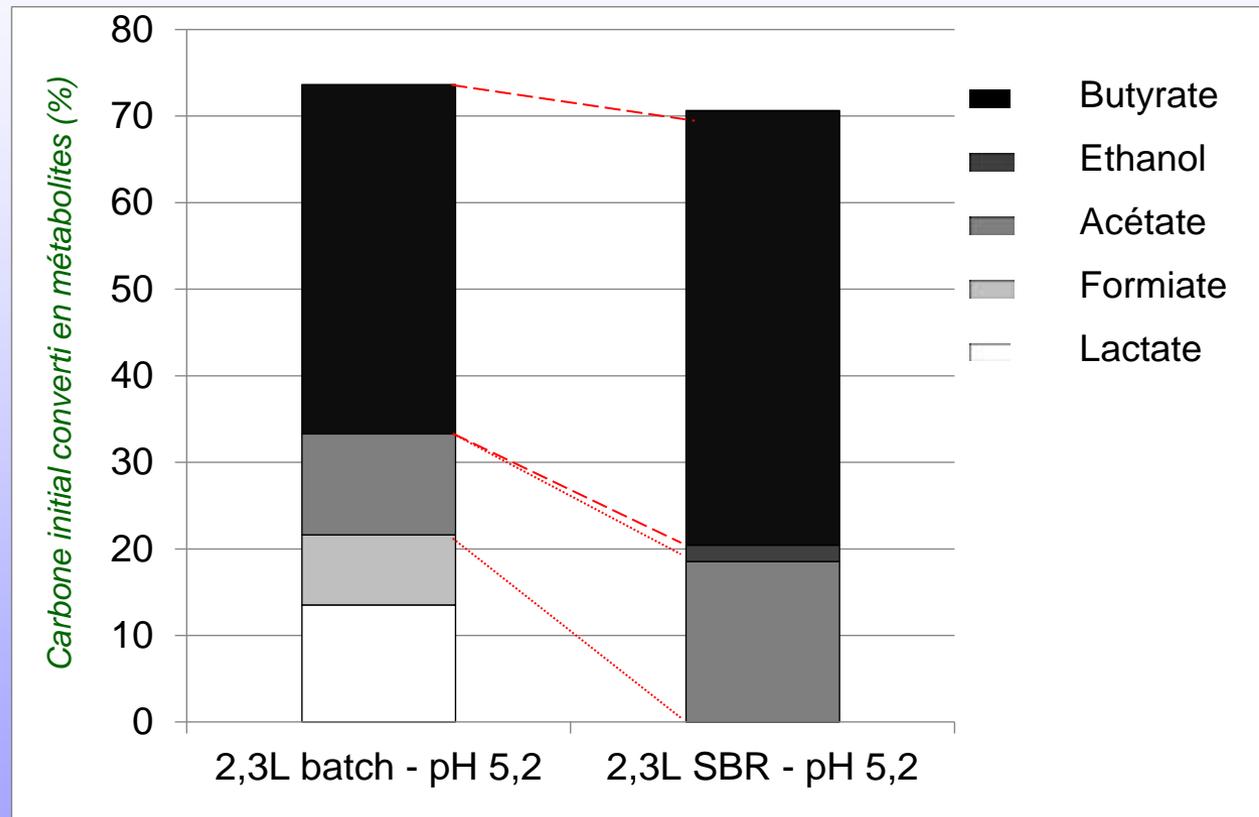
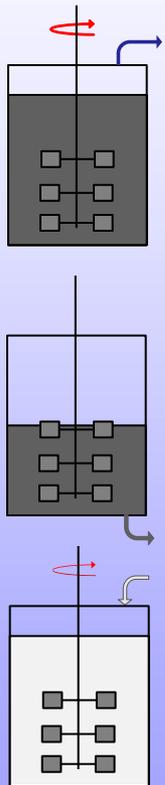


pH 5,2 → optimum pour production H₂

→ butyrate >> et formiate << pH [6-7,5]

BioH₂ - 2.2. : orientation métabolique

Culture en mode séquentiel (SBR) : analyse du bilan carboné

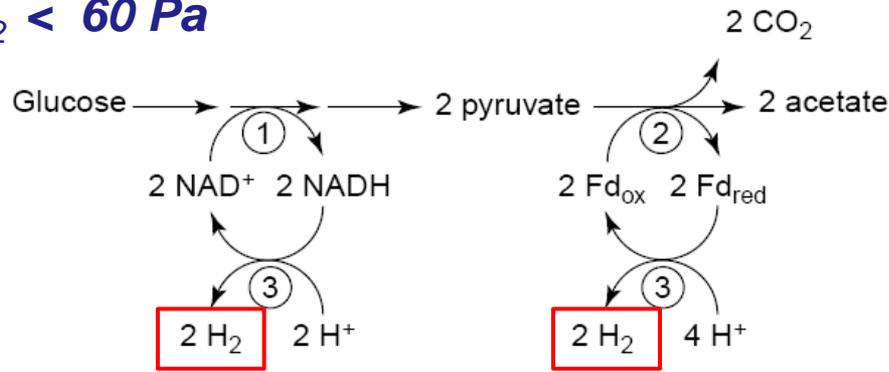


Renouvellement 40% du milieu → butyrate et acétate essentiellement
→ rendement d'H₂ + 35%

→ Orientation du métabolisme vers les voies productrices d'hydrogène

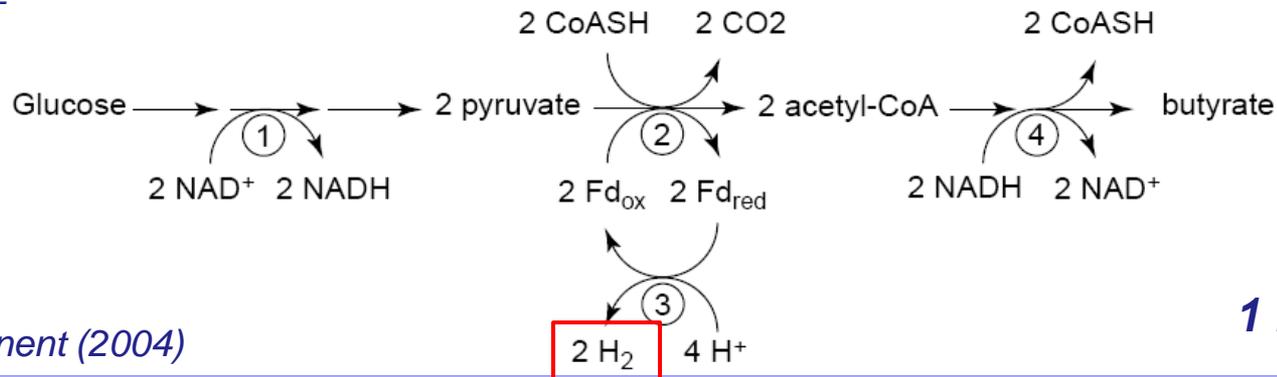
BioH₂ - 3.1. : effet de P_{H2}

P_{H2} < 60 Pa



**4 H₂ +
2 acetate**

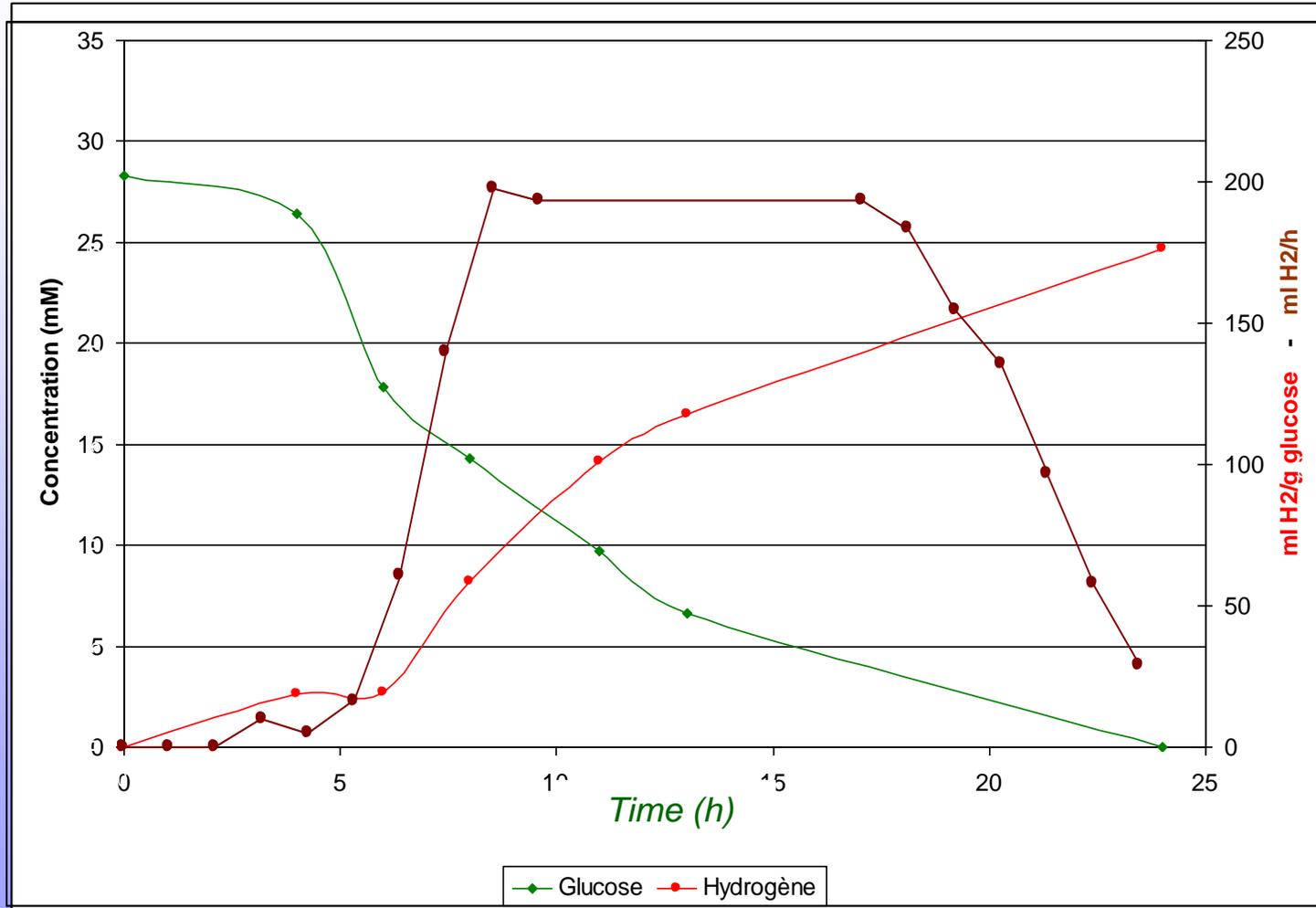
P_{H2} > 60 Pa



**2 H₂ +
1 butyrate**

Angenent (2004)

BioH₂ - 3.1. : effet de P_{H2}

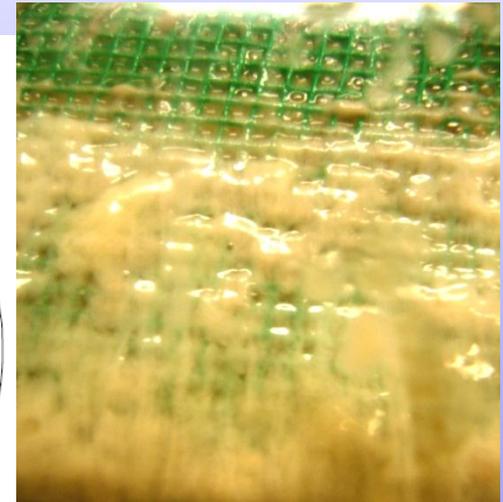
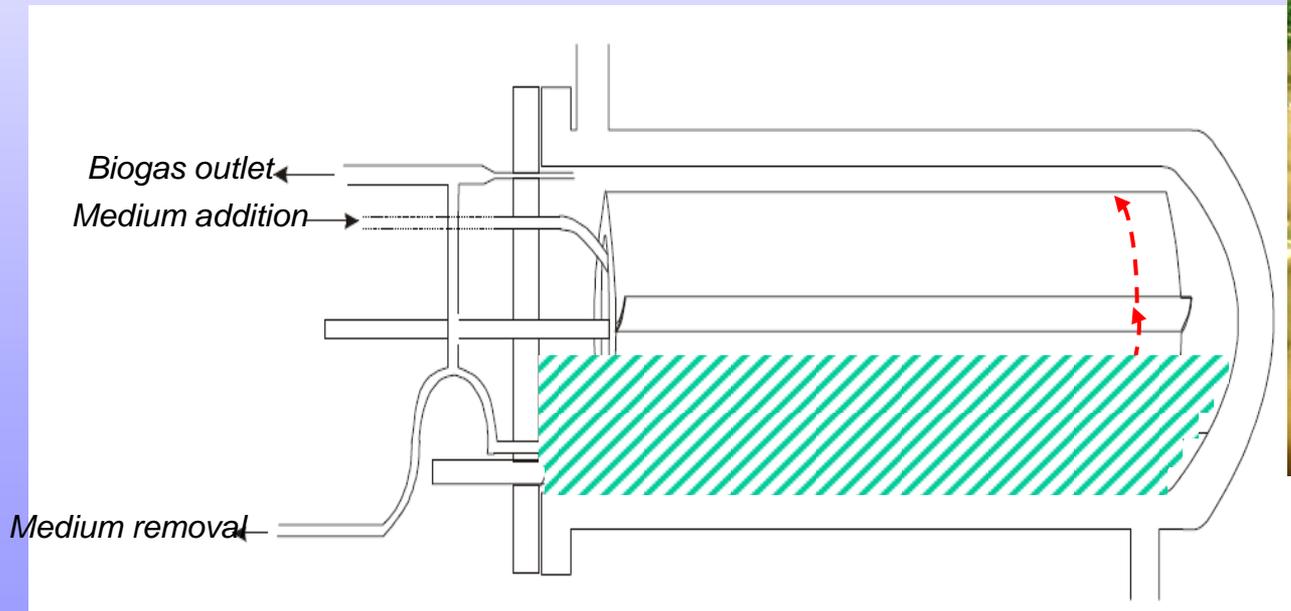


→ tester des bioréacteurs avec transfert L/G amélioré

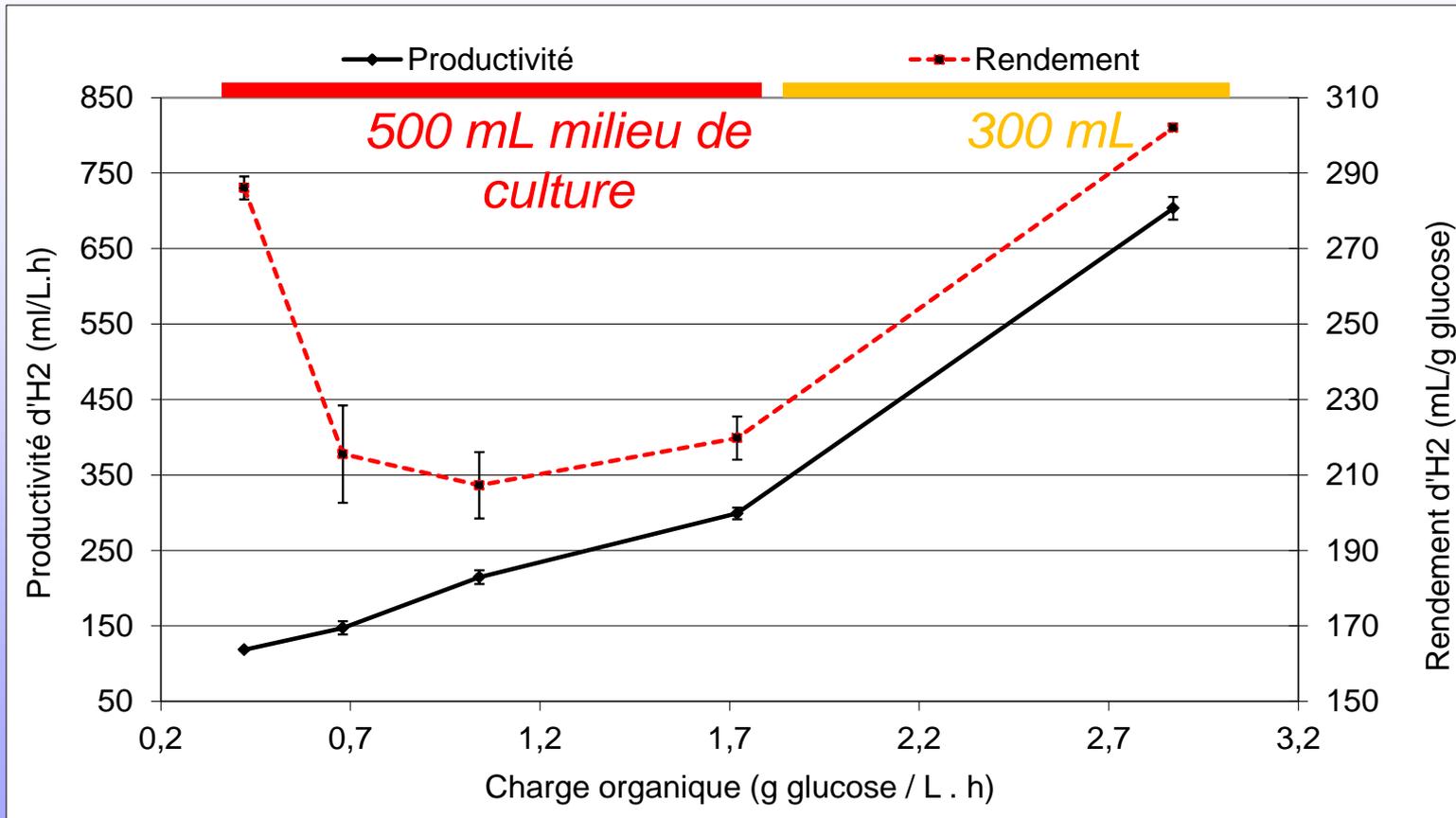
BioH₂ - 3.2. : effet de P_{H2}

Etude de la production d'H₂ en bioréacteur à « biodisque »

- surface d'échange L/G élevée
 - rétention cellulaire
- homogénéisation → conditions environnementales maîtrisables
 - prélèvement d'échantillons représentatifs
 - peu énergivore



BioH₂ - 3.2. : effet de P_{H2}



*500 mL → 300 mL vol. liquide ⇒ rendement d'H₂ + 30%
⇒ > 300 mL H₂ / g glucose consommé*

Conclusions

- **matière méthanisable = matière organique**
 - **variabilité des matières → association des matières**
 - **importance de la rentabilité économique**
 - **taille optimale (1 à 5 MWe)**
 - **synergies agro-industrielles → éco-zonings**
 - **traitement énergétique des résidus, invendus, refus, ...**
 - **utilisation de l'électricité (négociation directe du prix)**
 - **valorisation des calories (négocia° du prix, plus de CV)**
 - **valorisation des digestats liquides et solides**

(fertilisants éventuellement concentrés, texturants du sol)
- **intérêts environnementaux**

Merci de votre attention

s.hiligsmann@ulg.ac.be

www.microh2.ulg.ac.be

Publications avec accès gratuit

Guide IEPF sur la gestion des déchets : <http://hdl.handle.net/2268/12919>

[http://orbi.ulg.ac.be/simple-search?query="hiligsmann+serge"](http://orbi.ulg.ac.be/simple-search?query='hiligsmann+serge')

Video téléchargeables

- Méthanisation agricole énergie renouvelable par recyclage des déchets en énergie
<http://www.youtube.com/watch?v=ynSNibF79Z0>
<https://www.youtube.com/watch?v=34qEwCUPFkl>
<https://www.youtube.com/watch?v=j-vEQgwGfrM>
- Envitec Biogas : Visite virtuelle d'une installation de production de Biogaz
<http://www.youtube.com/watch?v=nNECNkVSXWY>
- PlanetBiogasGroup : Mise en place d'une installation biogaz <http://www.youtube.com/watch?v=Ef-YFw92PtY>
- Agrikomp biogastechnik : Principe et Fonctionnement d'une installation de Biogaz
https://www.youtube.com/watch?v=infmbjXsVRc&list=TLn5v-TwCjnI7AWu_u8Ke2vH47Eu_2LR2A
- Biogas du Haut-Geer :
<http://www.canalzoom.com/site/index.php?iddet=8698&quellePage=999&idcat=189>
 + Intégration énergétique et Valorisation chaleur <http://www.youtube.com/watch?v=ulHoYQkFMxw>
- Austep
 Biogas da Forsu <http://www.youtube.com/watch?v=GwPPU1xOOhg>
 AUSTEP - Anaerobic digestion of slaughterhouse waste http://www.youtube.com/watch?v=2Rn-2hzKp_A
- BioConstruct : How to build a biogas plant <http://www.youtube.com/watch?v=mCebM7a5XBQ>