



L'Institut
National de la
Recherche
Agronomique



INRA Transfert
Environnement



**BIOTECHNOLOGIES POUR LE
TRAITEMENT DE L'EAU ET DES DECHETS**
6-10 juin 2011, Narbonne

Méthanisation

Romain Cresson
INRA Transfert Environnement
UR50, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement
Avenue des Etangs, Narbonne, F-11100, France
Tel: +33 (0)4 68 42 51 51 (direct: 63) - fax: +33 (0)4 68 42 51 60
<http://www.montpellier.inra.fr/narbonne>
cresson@supagro.inra.fr

2

Plan

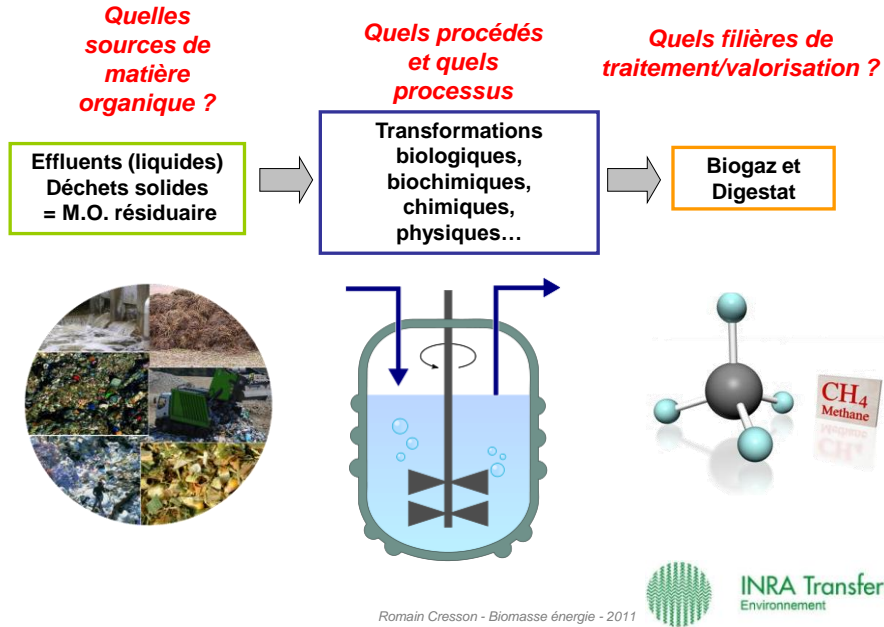
- **La Méthanisation**
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- **Problématique et enjeux**
 - Traitement des effluents
 - Traitement des déchets
 - Place de la méthanisation
- **Processus biologique**
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- **Les procédés**
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

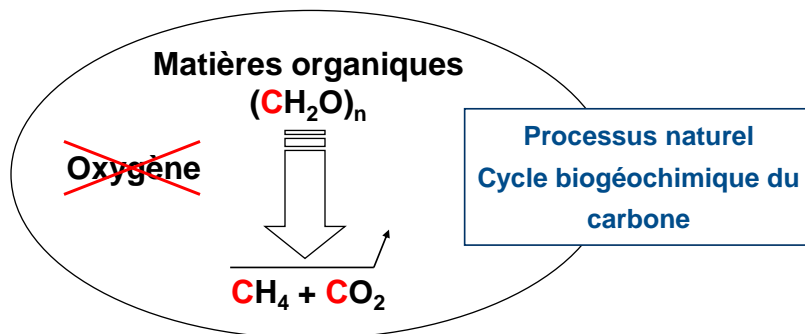
Comment produire du biogaz



La méthanisation ou digestion anaérobie

Définition

Dégradation des matières organiques, en absence d'oxygène, par une communauté microbienne produisant du méthane et du dioxyde de carbone

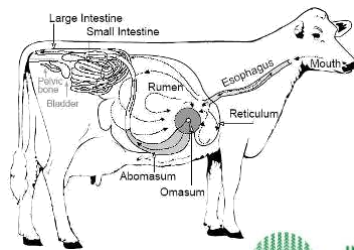
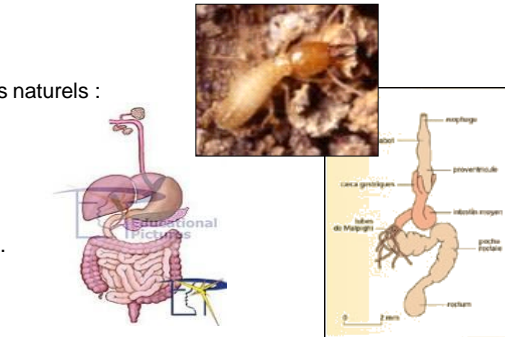
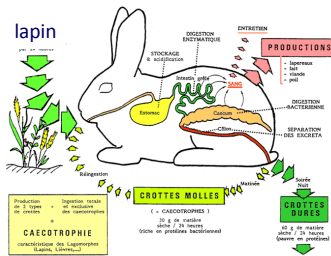


La méthanisation ou digestion anaérobie

Un processus naturel

Fermentation spontanée dans écosystèmes naturels :

- marais
- rizières
- sédiments lacustres et marins
- sol
- intestins de mammifères
- tractus intestinal de certains termites...



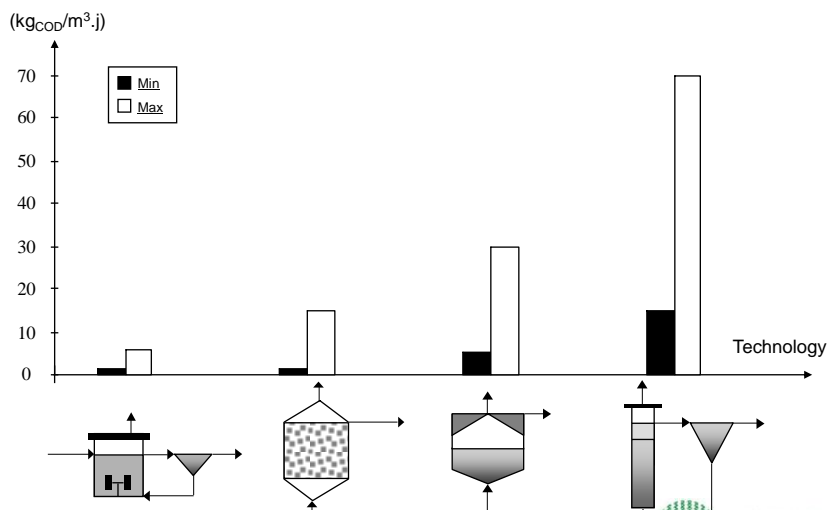
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



DANAC (ANR)

Performance of AD processes is related to the treated waste(water) and process design

Organic loading rate

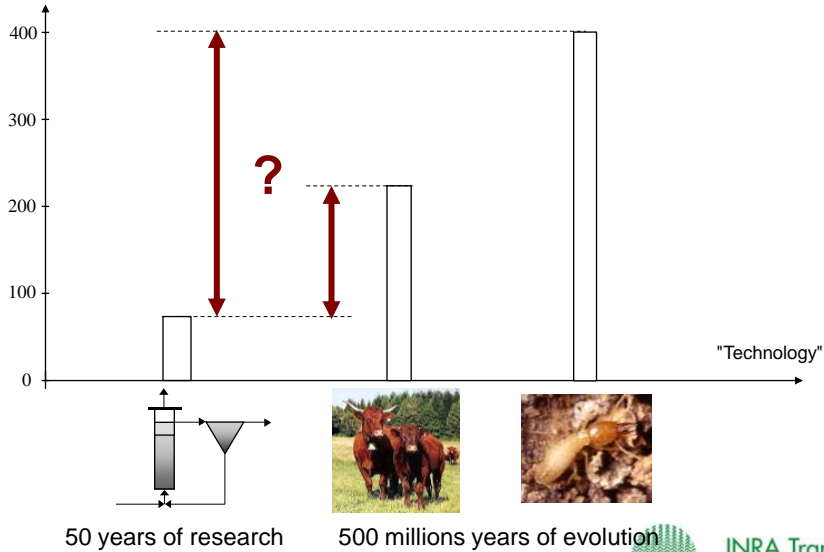


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Organic loading rate

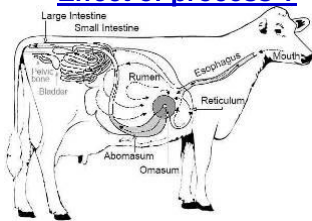
(kg_{COD}/m³.j)



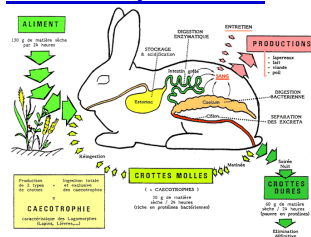
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



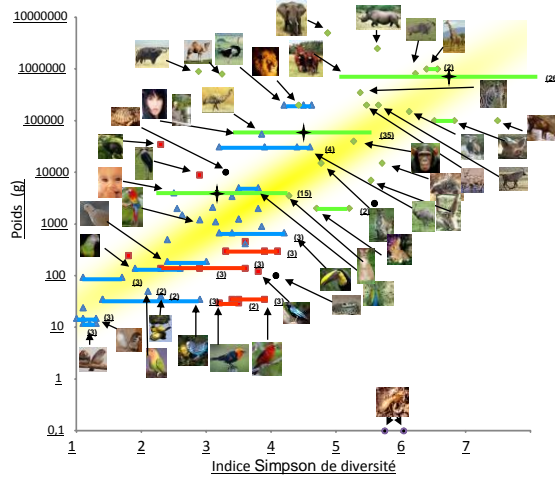
Effect of process ?



Effect of operation ?



Effect of microbiology ?



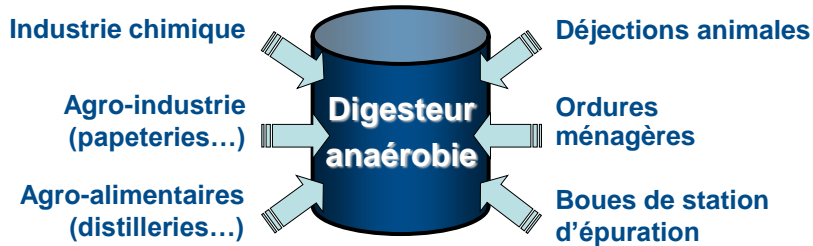
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



La méthanisation ou digestion anaérobie

Domaine d'application

Traitement des effluents liquides & Déchets solides

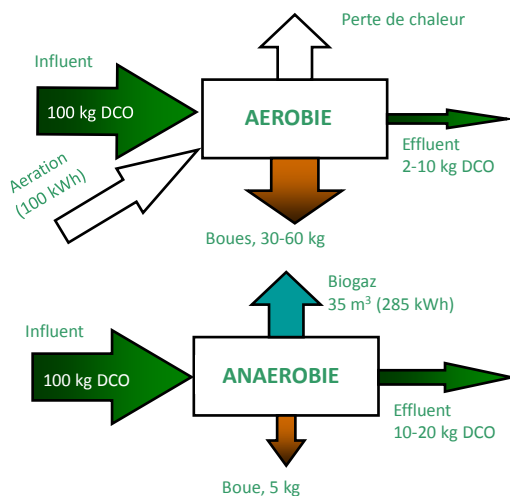


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Digestion anaérobie et dépollution



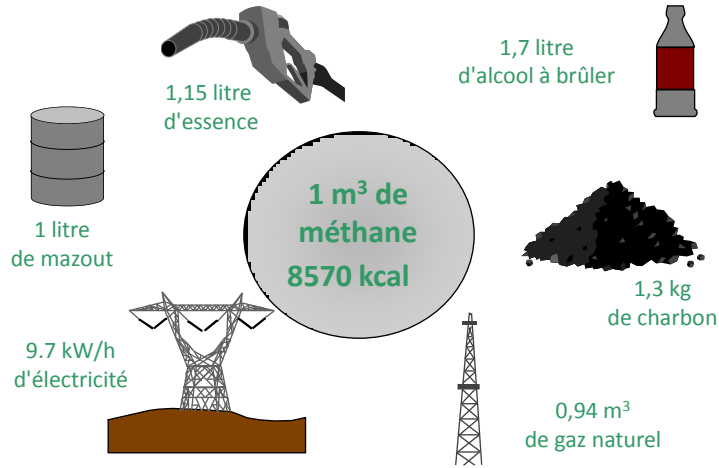
+ de 1 % de l'électricité mondiale sert à traiter la pollution humaine

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Digestion anaérobie et production d'énergie



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Pourquoi la filière anaérobie ?

	Mise en décharge	Incinération	Epandage	Compostage	Méthanisation
Acceptabilité sociale et image	☹	☹☹	☹	☺	☺☺
Gestion de la matière organique	☹	☹☹	☺	☺☺	☺☺
Effet sanitaire	☺	☺☺	☺	☺	☺☺
Production d'énergie	☺	☺☺	☹☹	☹☹	☺☺
Coûts	☺	☹☹	☺☺	☺	☹

Compostage: - 30-35 kWh par tonne de déchet ☹

Digestion anaérobie: + 100-150 kWh par tonne de déchet ☺

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Pourquoi la filière anaérobie ?

Analyse multicritère : aérobie vs anaérobie (FdZ-Polanco 2005)		ER Urbaines		ER Industrielles	
		Aérobie	Anaérobie	Aérobie	Anaérobie
Environnementaux	Production des boues	-	++	-	+++
	Surface utilisée	+	-	-	++
	Émission de CO ₂	+	-	-	+
Énergétiques	Énergie consommée / Volume ER traité	+	-	-	+
	Énergie consommée / DCO dégradée	+	-	-	+
	Volume biogaz produit / volume ER traité	-	+	-	++
Économiques	Coûts variables	-	+	-	+
	Coût à l'investissement	-	+	-	++
	Coût du traitement	-	+	-	+
	Valeur ajoutée	-	+		
Sociaux	Emplois directs	++	-	=	=

Traitement des effluents industriels

- ↗ Faible production de biomasse (boues)
- ↗ Pas de dépense liée à l'oxygénation
- ↗ Sous produit valorisable (Méthane + Digestat stabilisé → compost)

➔ **Avantages : environnementaux, énergétiques et économiques...**

La méthanisation ou digestion anaérobie

Le méthanisation permet :

- ✓ **Traiter des déchets organiques**
- ✓ **Produire une énergie renouvelable**
- ✓ **Réduire les impacts sur l'environnement**
 - Réduction des émissions de gaz à effet de serre
 - Réduction des nuisances et odeurs
 - Restitution de matière organique aux sols

• La Méthanisation

- Définition
- **Contexte**
 - Débouchés
- **Problématique et enjeux**
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- **Processus biologique**
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- **Les procédés**
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

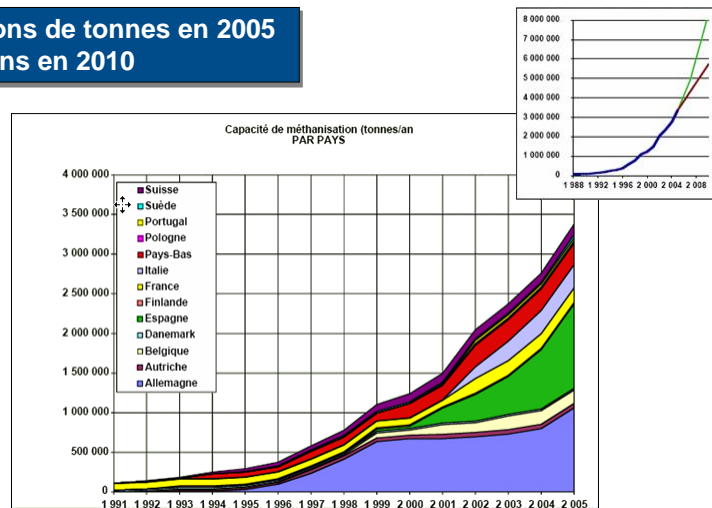
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

La méthanisation en Europe

**3,5 millions de tonnes en 2005
10 millions en 2010**



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Potentiel de production de biogaz en Europe à l'horizon 2020 (en milliers de tep)

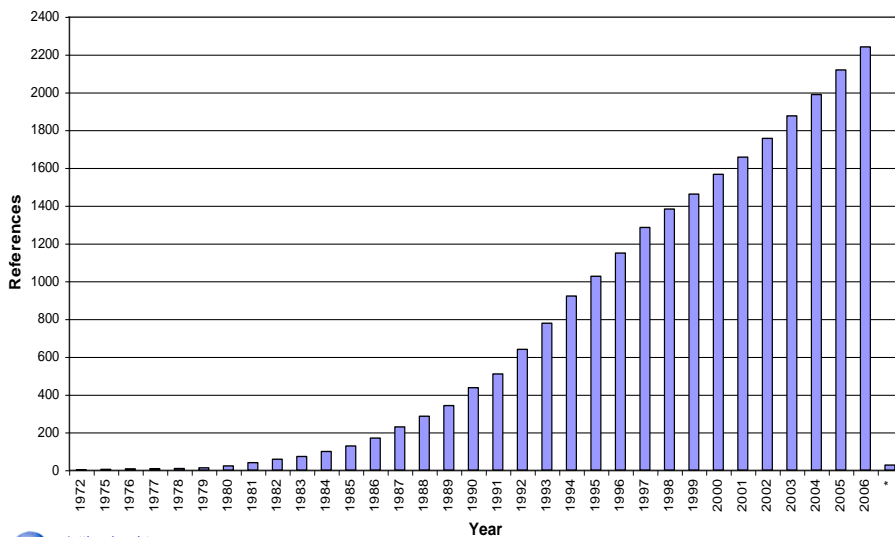
Pays	Potentiel
France	3 682
Allemagne	3 419
Grande-Bretagne	2 271
Italie	1 626
Espagne	1 578
Pays-Bas	1 172
Irlande	1 028
Belgique	765
Danemark	765
Autriche	526
Suède	383
Portugal	311
Finlande	263
Grèce	167
Luxembourg	31
TOTAL	17 987

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

A l'échelle des effluents industriels



Lettinga Associates
Foundation

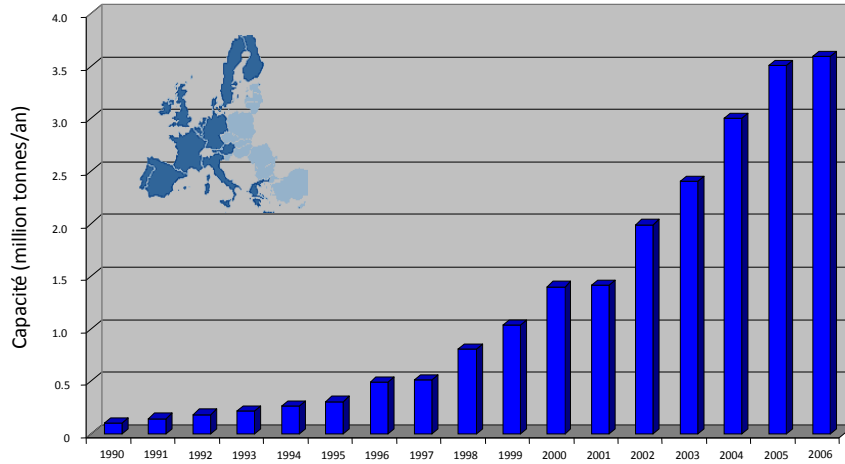
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Data collected by Yolanda Yspeert (2007)

A l'échelle des déchets urbains



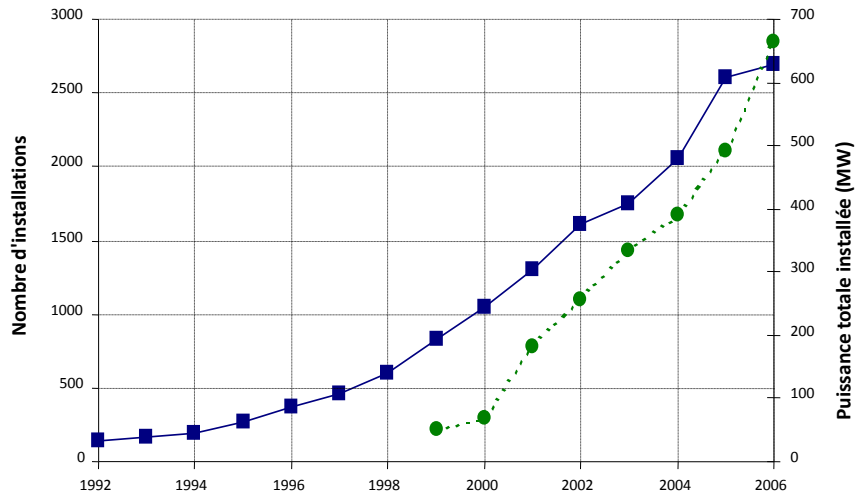
Source: De Baere, 2005

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



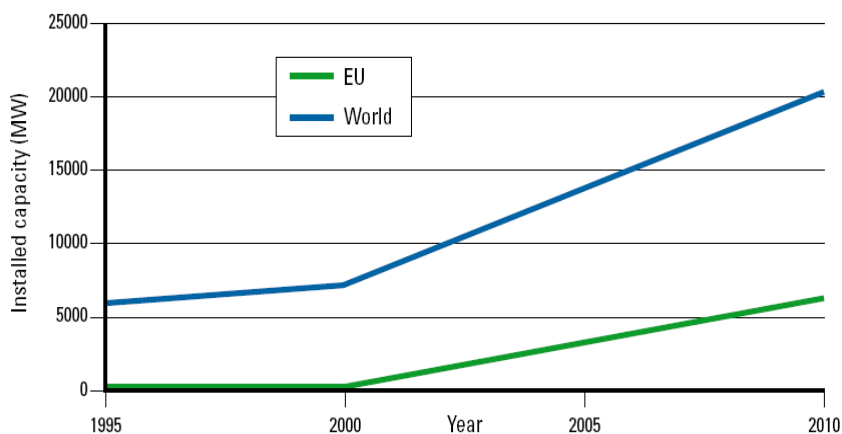
A l'échelle des résidus agricoles

L'exemple de l'Allemagne



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011





Sources:

1. http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/html/as.html - 'Biogas Market Undeveloped', 2003.
 2. Report on the European biogas market. *Renewable Energy World*, May-June 2003, p. 37.

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

De la capacité installée (Europe)

1991 à 1995 : +33 000 t/an

1996 à 2000 : +186 000 t/an

2001 à 2005 : + 428 000 t/an entre 2001 et 2005

De la capacité moyenne des installations

1991 à 1995 : 13 000 t/an

1996 à 2000 : 21 000 t/an

2001 à 2005 : 42 800 t/an

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

▪ La Méthanisation

- Définition
- Contexte

• Débouchés

▪ Problématique et enjeux

- Traitement des eaux résiduaires
- Traitement des résidus solides
- Place de la méthanisation

▪ Processus biologique

- Schéma réactionnel
- Potentiel méthanogène et ordres de grandeur

▪ Les procédés

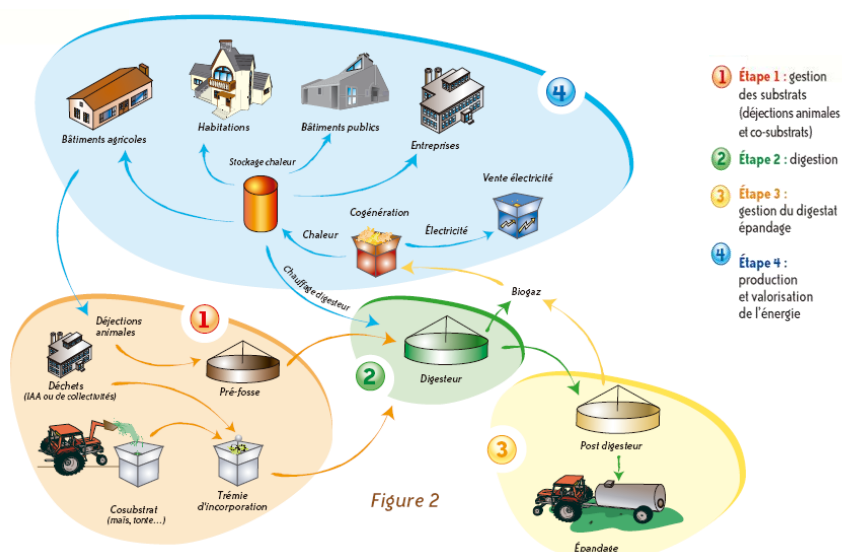
- Types, Performances, dimensionnement et contrôles
- Valorisation des sous-produits
- Données économiques
- Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Filière méthanisation à l'échelle territoriale



Les principales étapes de la méthanisation (source : ADEME)

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

L'exemple de la Scandinavie

Snertige, Danemark



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



L'exemple de la Scandinavie

AGRIGAS à Lund, Suède



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Business Region Göteborg (Ouest de la Suède, 2006)



3800 véhicules



23 stations biogaz

7 unités
de production
(12 500 tep)

Réduction GES: 35 000 tonnes CO2

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Business Region Göteborg (Ouest de la Suède, 2006)



Coût de production du biogaz en Suède





Procédé	€/ kWh
Boues d'épuration	0,034
Déchets ménagers, abattoirs	0,045
Cultures énergétiques	0,049

- ✓ Environ 40 entreprises dont l'activité, en partie ou en totalité, concerne le biogaz carburant
 - Entreprises de collecte et traitement des déchets
 - Producteurs et distributeurs de biogaz
 - Fournisseurs d'équipements
- ✓ +300 emplois exclusivement "biogaz carburant"
 - + les emplois lors de la construction des unités de production et de distribution
- ✓ Développement régional technologique et de compétences

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Le methane, un biocarburant performant

Biofuel	Diesequiv. l/ha	Operational range at 6l diesel per 100 km
Biodiesel	1.200	20.000 km 
Bioethanol	2.000	33.000 km 
BTL	3.800 ?	63.000 km 
Biomethane	4.000	66.000 km 

© W. Verstraete, Gent University, Belgique

Ratio production carburant/consommation énergie

→ Filière bioéthanol : 1,38

→ Filière biogaz : 2,5

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

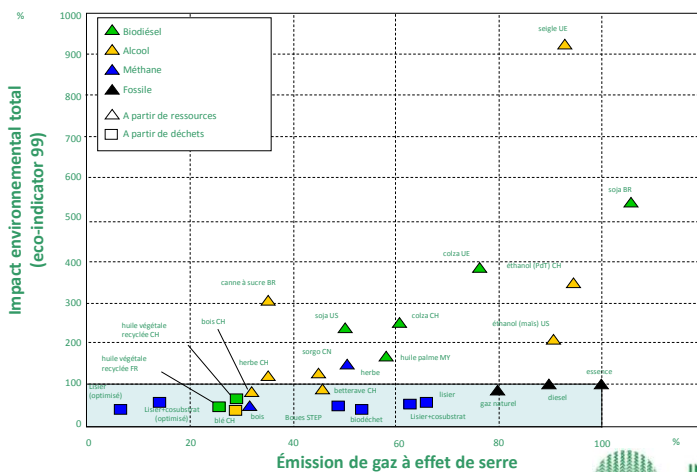


INRA Transfert
Environnement

Life Cycle Assessment of energy products:

Environmental impacts assessments of biofuels (EMPA, Suisse, 2007)

UF = remplir un réservoir de voiture avec une énergie de 1 MJ à une station Suisse



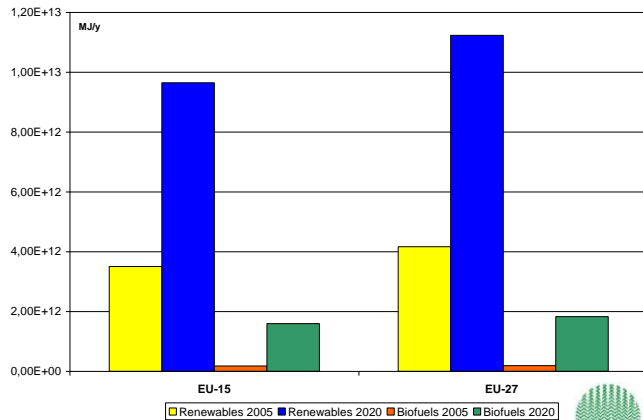
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

EU Objectifs fixés : distance à la cible

- Kyoto: reduction of GHG of **8%** (compared to 1990 base level)
- To reduce CO₂ emissions by **20%** (base year 1990) by 2020 and target of –60 to –80% by 2050
- To reach the binding target of **20%** of renewable energy by 2020
- To substitute **10%** of fossil fuels for transport with biofuels and other renewable energy sources by 2020
- Revised **Fuel Quality Directive**: **-10%** of greenhouse gases per unit of energy by 2020



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

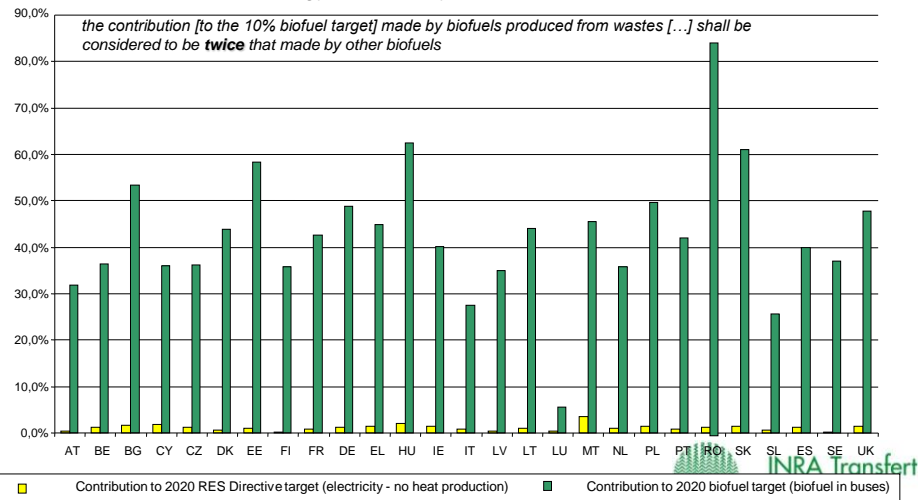


INRA Transfert
Environnement

Potentiel du biogaz en Europe

Contribution to EU targets

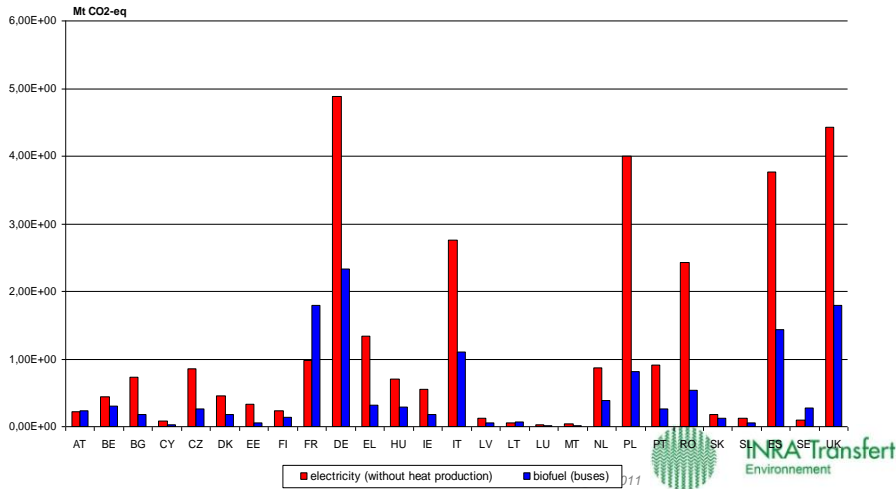
- To reach the binding target of **20%** of renewable energy by 2020
- To substitute **10%** of fossil fuels for transport with biofuels and other renewable energy sources by 2020



INRA Transfert
Environnement

Potentiel CO₂-eq savings

- Kyoto: reduction of GHG of **8%** (compared to 1990 base level)
- To reduce CO₂ emissions by **20%** (base year 1990) by 2020 and target of -60 to -80% by 2050
- Revised **Fuel Quality Directive**: **-10%** of greenhouse gases per unit of energy by 2020



Le CO₂ a une valeur "marchande"

- L'UE a adopté en 2003 une directive établissant un système d'échange (Emission Trading Scheme) pour la négociation de quotas d'émission de GES au sein de la Communauté
- L'ambition de l'ETS* est de parvenir à une réduction des émissions de GES de la manière la plus rentable
- La tonne de CO₂ est aujourd'hui autour de 14 € (2010). Cependant, pour notre calcul, nous avons utilisé son prix "avenir" actuellement négocié à environ 21 € / t

Valeur économique du CO₂-eq potentiellement évités grâce à la production d'électricité en 2020 **0.5-0.8** milliard Euro/an

Valeur économique du CO₂-eq potentiellement évités grâce à la production de biocarburant en 2020 **0.2-0.3** milliard Euro/an

* Le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) (en anglais Emission Trading System, ou European Union Emission Trading System (EU ETS) ou EU ETS) est un mécanisme de l'Union européenne visant à réduire l'émission globale de CO₂ et atteindre les objectifs de l'Union Européenne dans le cadre du protocole de Kyoto.

Conclusions

- L'intérêt pour la digestion anaérobie porte à nouveau sur l'énergie / GES
 - L'ACV montre un impact potentiel très élevé pour les biocarburant : 50% de l'objectif biocarburants accessible sans changement dans l'utilisation des terres
 - Si on ajoute les déchets agricoles, les boues de STEP et les déchets des IAA → on obtient environ 3 x le biométhane obtenu à partir de biodéchets (def.EU)
- ⇒ **Fort potentiel de la méthanisation pour atteindre les objectifs de biocarburants et de réduction des GES**



La pérennité des gisements

- Codigestion (boues + déchets agricoles et agro-industriels)
- Biodéchets : digestion + post-compostage
- OM « grises » : digestion des refus de tri mécanique + décharge
- Nouveaux gisements (agriculture, sylviculture)

L'évolution des enjeux sociaux et réglementaires

- **Valorisation énergétique** (électrique, thermique, **carburant...**)
 - Méthanisation → **réduction des gaz** à effet de serre (si récupération d'énergie)
 - Réglementation sur le **devenir des composts et digestats**
- ✓ **Réglementation claire et accessible**
- ✓ **Tarifification incitative du rachat de l'énergie**
- ✓ **Intégration dans une politique globale sur l'environnement et le climat**

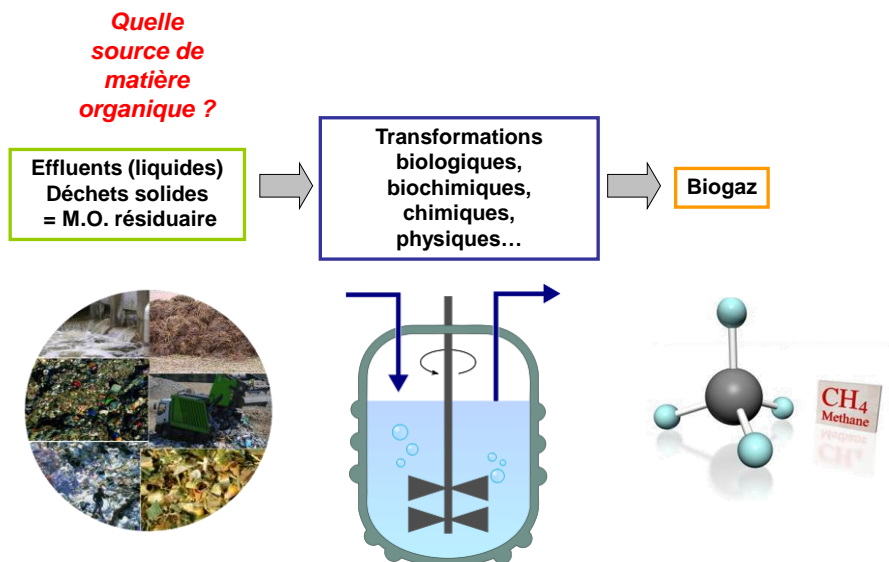


- La Méthanisation
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- **Problématique et enjeux**
 - **Traitement des effluents**
 - **Traitement des résidus solides**
 - **Place de la méthanisation**
- Processus biologique
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- Les procédés
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Comment produire du biogaz



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Matière organique « biodégradable »

Effluents (concentrés)

- IAA,
- industrie chimique, pharmaceutique, ...

Boues d'épuration

Déchets solides

- OM Après tri (élimination des plastiques, métaux,...),
- Biodéchets des ménages,
- Déchets agricoles et déchets verts,
- Déchets industriels...



A l'échelle des effluents industriels

AGRO - FOOD INDUSTRY 36%	BEVERAGE 29%	ALCOHOL DISTILLERY 10%	PULP & PAPER 11%	MISCELLANEOUS 14%	
Sugar Potato Starch Yeast Pectin Citric acid	Cannery Fruit Vegetable Dairy Bakery	Beer Malting Soft drink Fruit juice Wine Coffee	Sugar cane juice Sugar cane molasses Sugar beet molasses Grape wine Grain Fruit	Recycle paper Mechanical pulp NSSC Sulphite pulp Straw Bagasse	Chemical Pharmaceutical Sludge liquor Municipal sewage Landfill leachate Acid mine water

Yeast,
ItalyBeer,
BrazilDistillery,
JapanPaper,
NetherlandsChemical,
Netherlands

Lagune anaérobie sur vinasses



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Digester d'une industrie chimique



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Digesteur SAUZA à Tequila (Mexique)



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA transfert
Environnement

Exemple de STEP urbaine



En France

- 1999 : 900 000 tonnes de MS
- 2005 : 1 300 000 tonnes de MS (50% d'augmentation)
- Filières d'élimination :
 - *Épandage agricole (60%)*
 - *Mise en décharge (24%)*
 - *Incinération (14%)*
 - *Méthanisation (2%)*



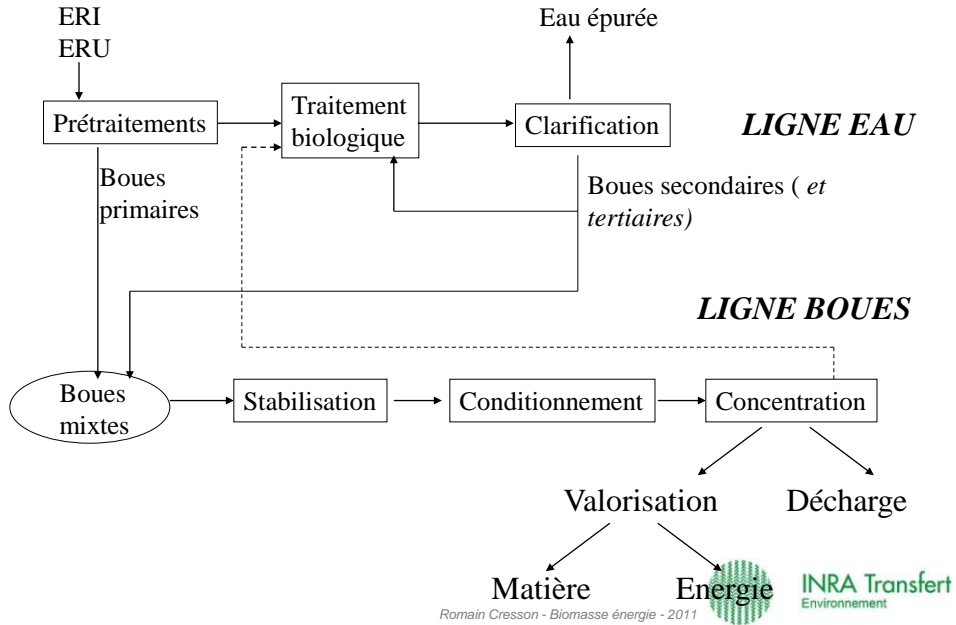
**Stabilisation : Réduction des matières fermentiscibles,
des odeurs,
des germes pathogènes**

perte de masse

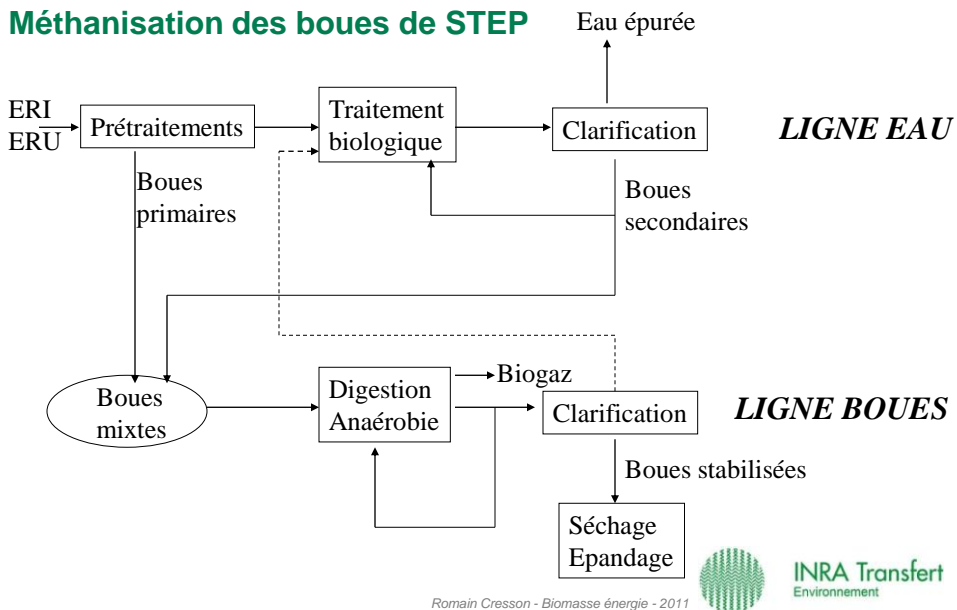
- digestion anaérobie thermophile ou mésophile (avec prétraitements physico chimiques)	oui
- digestion aérobie	oui
- compostage	oui
- stabilisation à la chaux	non
- stabilisation au chlore, aux nitrites	non



Problématique des boues de STEP



Problématique des boues de STEP



Sludge Digesters in Xi'an ,China (40,000m³)



50

Déchets Solides

Déchet : « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.* » (loi du 15/07/1975).

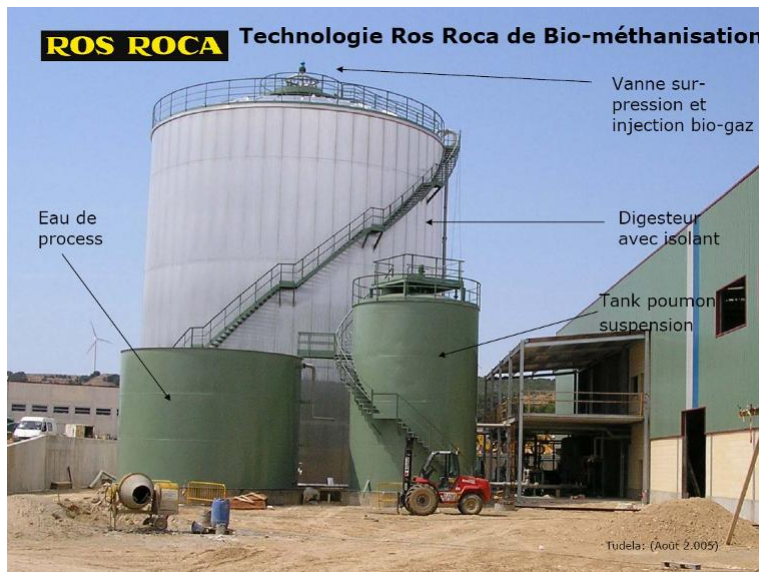
Toute activité humaine génère un déchet...

- Déchets des ménages
- Déchets des collectivités
- Déchets des industries
- Déchets agricoles



- Sur les 868 Mt de déchets de toutes origines (ménagers : 50 Mt et non ménagers : 818 Mt), 84% sont issus de la filière agricole et industrielle,
- L'industrie alimentaire produit près de la moitié des déchets d'origine industrielle,
- Près des 3/4 des déchets de toutes activités sont susceptibles de subir une transformation biologique.

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Amiens (Valorga)



Mise en service: 1988

Capacité: 100 000 t/an

Déchets traités:

Ordures ménagères brutes

FFOM

Déchets verts

Déchets organiques agro-industriels

4 digesteurs: $3 \times 2\,500\text{ m}^3 + 1 \times 3\,500\text{ m}^3$

Biogaz transformé en vapeur livrée à un industriel voisin

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Usine de traitement des déchets à Montpellier



Capacité

- 170 000 t/an de déchets résiduels urbains
- 33 000 t/an de biodéchets

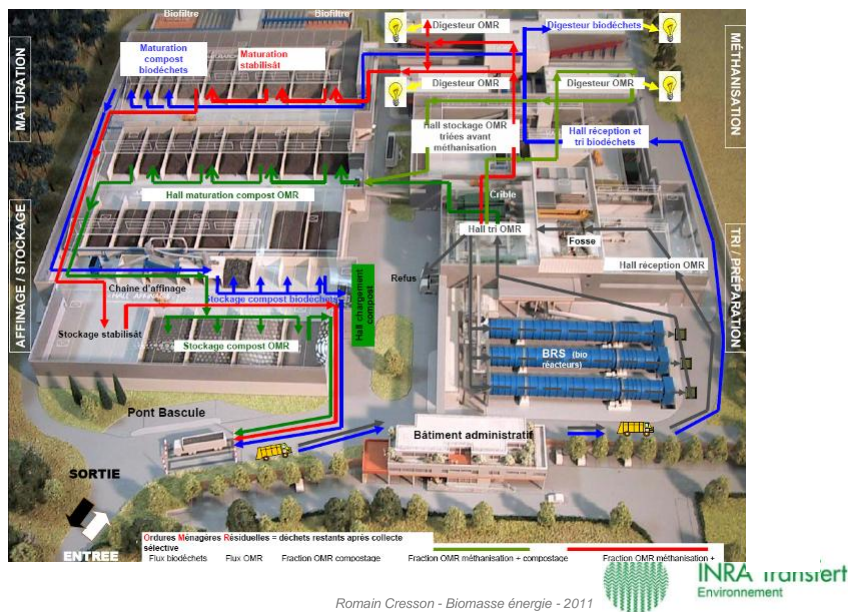
Valorisation énergétique

- 14 400 000 Nm³ biogaz
- 29 000 MWh électrique

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



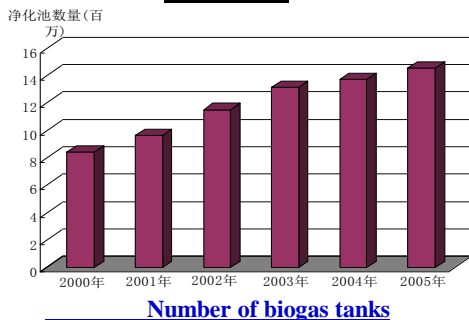
INRA Transfert
Environnement



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Méthanisation « rurale » l'exemple de la Chine

30M units have been installed in China

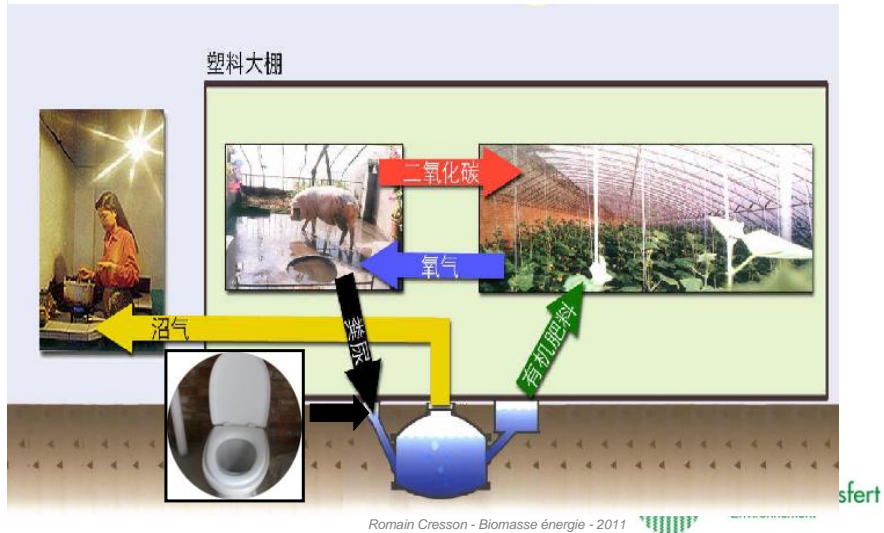


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Méthanisation « rurale » l'exemple de la Chine

农村沼气技术 - 四位一体

Multi-Purpose Installation for Rural Households



Méthanisation « rurale » l'exemple de la Chine



Burning for cooking



Biogas water heater for shower



Biogas generator



Biogas boiler

Traitement des effluents d'élevage

Ming-He chicken manure treatment plant (Shandong province)

Produces 3.7 million chickens annually and maintains 1.5 million chickens for breeding



Chicken manure

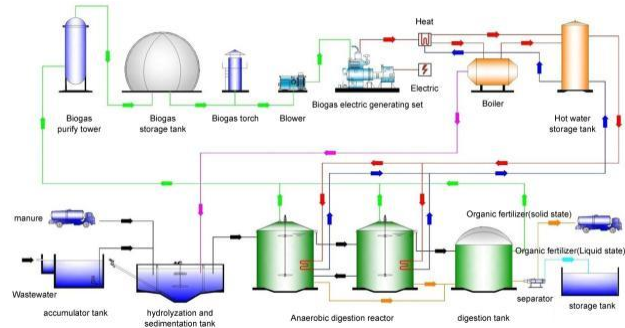
500t/d

Biogas electric generating set

3 MW

CDM

67,000 t CO₂



INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Méthanisation à la ferme

GAEC du Bois Joly

- 70 ha
- 50 vaches
- 500 lapins

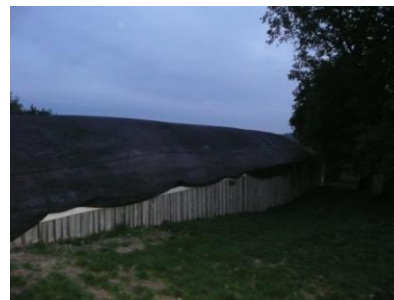
→ 1500 tonnes / an de fumier bovins

+ quelques fruits et légumes déclassés

→ Puissance électrique: 30KW

→ Puissance Thermique : 60KW

Installation simple: 4 digesteurs (4 fosses de 183m³) batch voie sèche avec recirculation des jus et chauffage



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



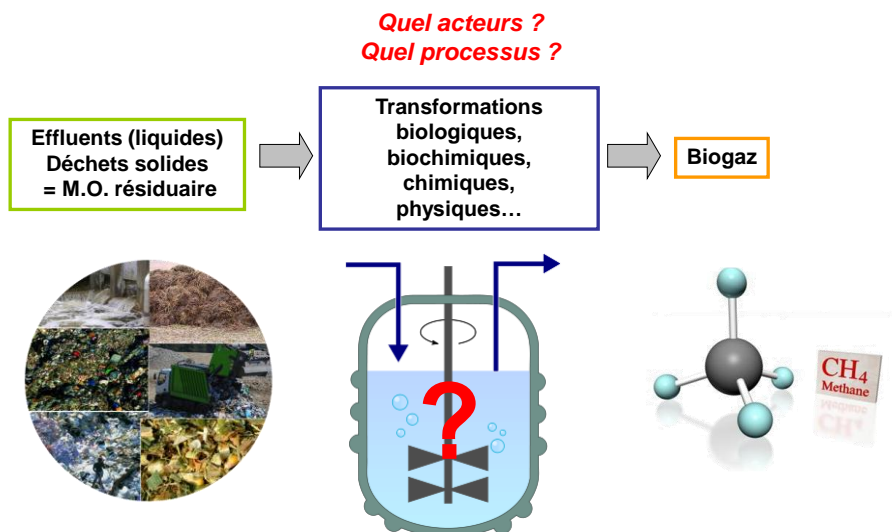
Environnement

- La Méthanisation
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- Problématique et enjeux
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- **Processus biologique**
 - Schéma réactionnel
 - **Potentiel méthanogène et ordres de grandeur**
- Les procédés
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



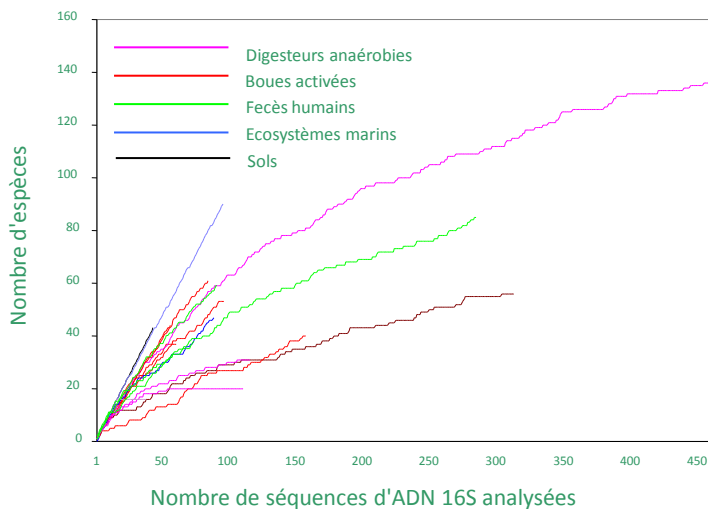
Comment produire du biogaz



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Digestion anaérobie : un écosystème complexe

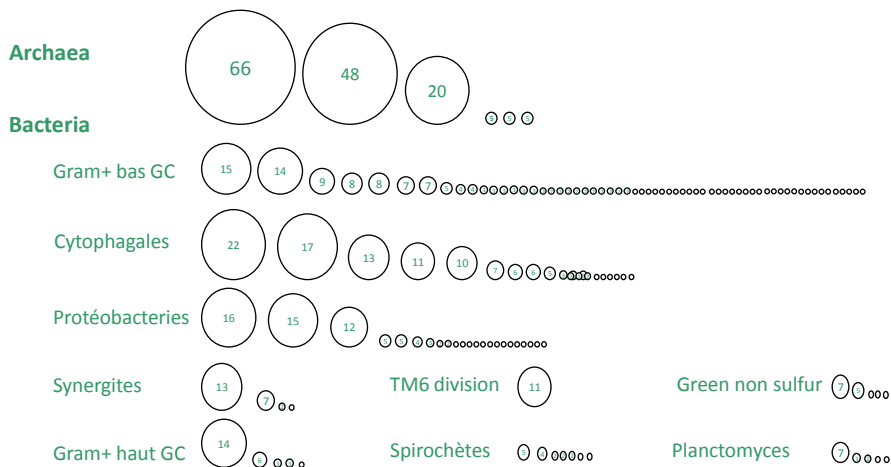


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Digestion anaérobie : un écosystème complexe

Ex: Inventaire total digesteur anaérobie : 580 ADNr 16S → 139 "espèces"



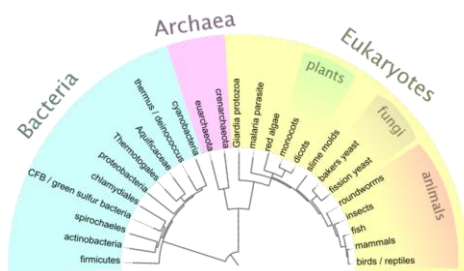
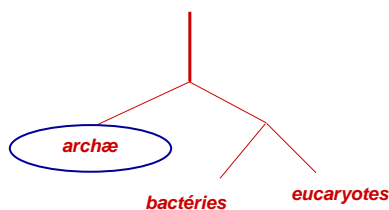
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Origine de la méthanisation

Un processus ancien!

Espèces qui produisent du méthane



source : wikipédia

Arbres phylogénétiques du vivant

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Origine de la méthanisation

Un processus naturel...

Décomposition anaérobie de la matière organique en biogaz

($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$)

- gaz des marais
- sédiments
- rizières
- tractus digestif (ruminants, termites)
- grands fonds marins

Matière organique

Biogaz

Biomasse

60 à 80% de méthane
90% de la matière organique dégradée
Traces d'eau, d'H₂S

10% de la m.o. dégradée
faibles taux de croissance
réaction peu énergétiques

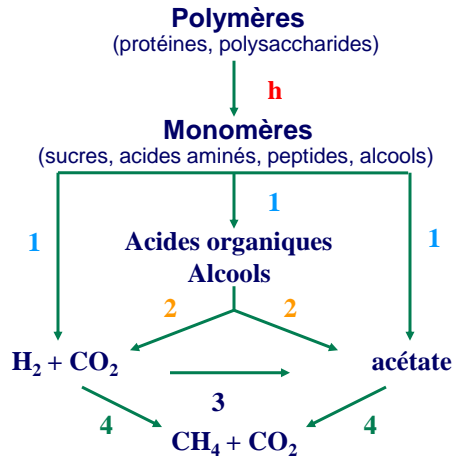


INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Digestion anaérobie : Schéma réactionnel

Consortium
Méthanogène



h Hydrolyse enzymatique

1 Bactéries fermentaires

2 Bactéries acétogènes

3 Bactéries homoacétogènes

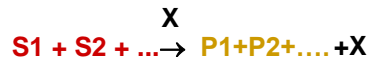
4 Archaea méthanogènes

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

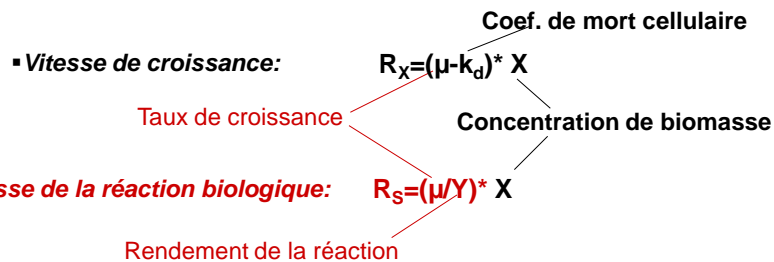
Rappels sur les réactions biologiques



▪ **Transformation de composés chimiques en d'autres composés....**

▪ ... En présence d'un « catalyseur » (la biomasse)...

▪ Qui se reproduit



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

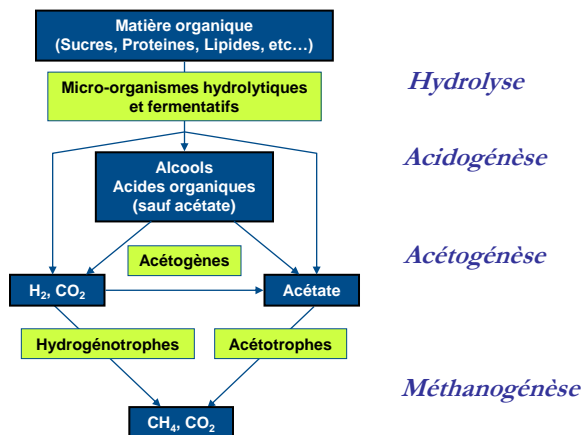


INRA Transfert
Environnement

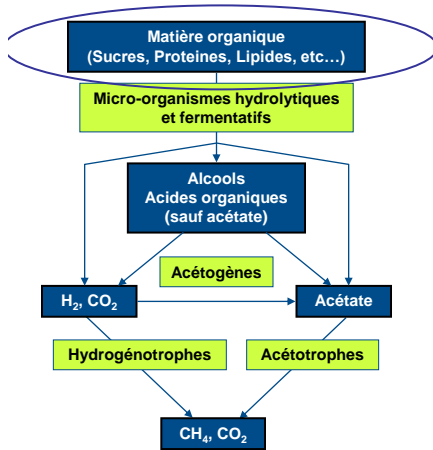
Le taux de croissance μ :

$$\mu = f(X, T, S_i, P_i, \text{pH}, I, \dots)$$

Type de micro-organismes (temps de doublement),
Température,
Concentration des différents substrats,
Concentration des différents produits de la réaction,
pH,
Présence de toxiques ou d'inhibiteurs,
...



La phase d'Hydrolyse



Action enzymatique (extra-cellulaires)

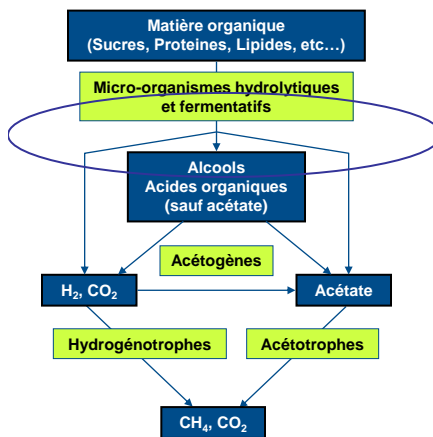
Passage des macromolécules aux monomères

Sucres → Glucose, fructose, ...

Protéines → Acides aminés

C'est la phase d'hydrolyse qui est souvent considérée comme l'étape limitante de la méthanisation des résidus solides

La phase d'Acidogénèse



Action enzymatique (intra et extra-cellulaires)

Passage des monomères aux acides organiques, alcools, CO₂, H₂

C'est la phase la plus rapide, mais :

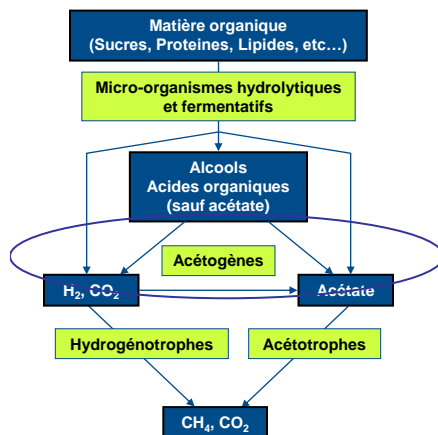
- sensibilité au pH
- production d'acides organiques inhibiteurs
- beaucoup de compétition entre les différentes espèces

Hydrolyse et acidogénèse

- Etape réalisée par **bactéries hydrolytiques et fermentatives**, notamment des genres *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Bacteroides*, *Enterobacter*...
- Bactéries **anaérobies strictes ou facultatives**, grande **diversité** croissance **rapide** : temps de doublement de quelques heures
- Macromolécules et particules solides sont hydrolysées et fermentées en
 - AGV (acides acétique propionique, butyrique, valérique...)
 - alcools
 - autres acides organiques (lactique...)
 - H₂ et CO₂
- Hydrolyse : lente , réaction limitante pour matière solide
- Acidogénèse : rapide
- peut se réaliser dans cuve tampon (certains effluents IAA avec DCO soluble et majoritairement fermentescible)



La phase d'Acétogénèse



Action intra cellulaire, bactéries acétogènes et syntrophes

Formation d'acétate

C'est une phase très sensible :

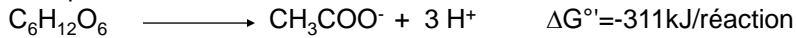
- **production d'hydrogène**
- **équilibre avec les espèces consommant l'H₂**
- **espèces peu connues (syntrophes)**



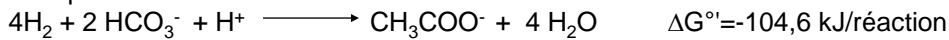
1- Bactéries homoacétogènes

genres *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Sporomusa*...

Groupe 1



Groupe 2



ΔG° : Energie libre standard : pH=7, 25°C.

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

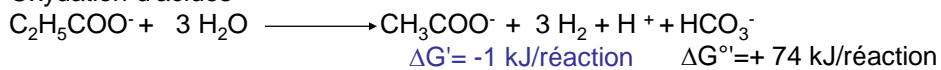


INRA Transfert
Environnement

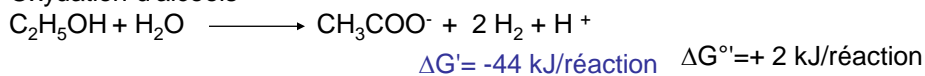
2- Bactéries syntrophes

genres *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Syntrophosphora*, *Syntrophus*...

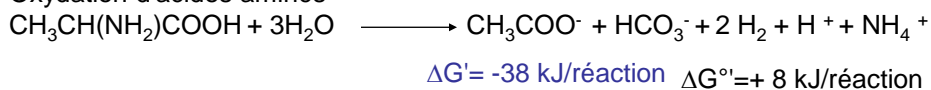
Oxydation d'acides



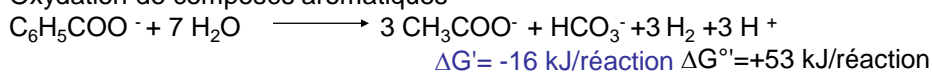
Oxydation d'alcools



Oxydation d'acides aminés



Oxydation de composés aromatiques



$\Delta G'$: Energie libre à pH=7, 25°C à $p\text{H}_2=10^{-4} \text{ atm}$

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

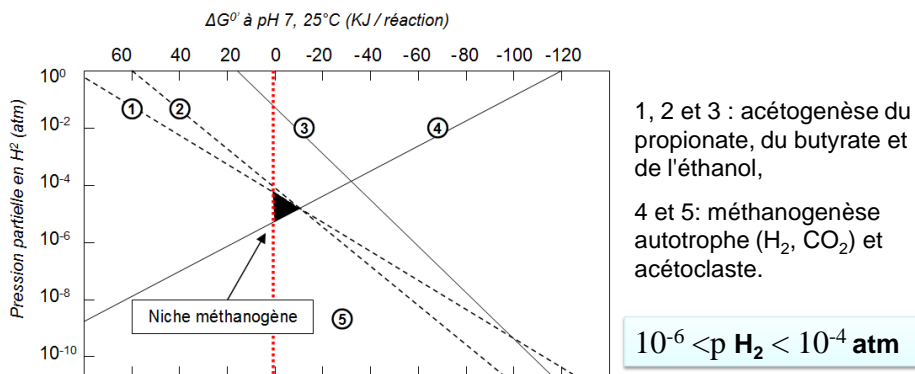
Vitesses réactionnelles d'acétogénèse

- généralement lentes
- problèmes d'inhibition par H_2 qui modifie l'équilibre thermodynamique global
- les bactéries syntrophiques ne peuvent effectuer les réactions que si une seconde bactérie élimine la molécule produite
- H_2 molécule clé pour la digestion anaérobie
 - produite par bactéries syntrophes
 - éliminée par bactéries homoacétogènes, méthanogènes hydrogénéophiles et sulfato-réductrices

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Influence de la pression partielle de H_2

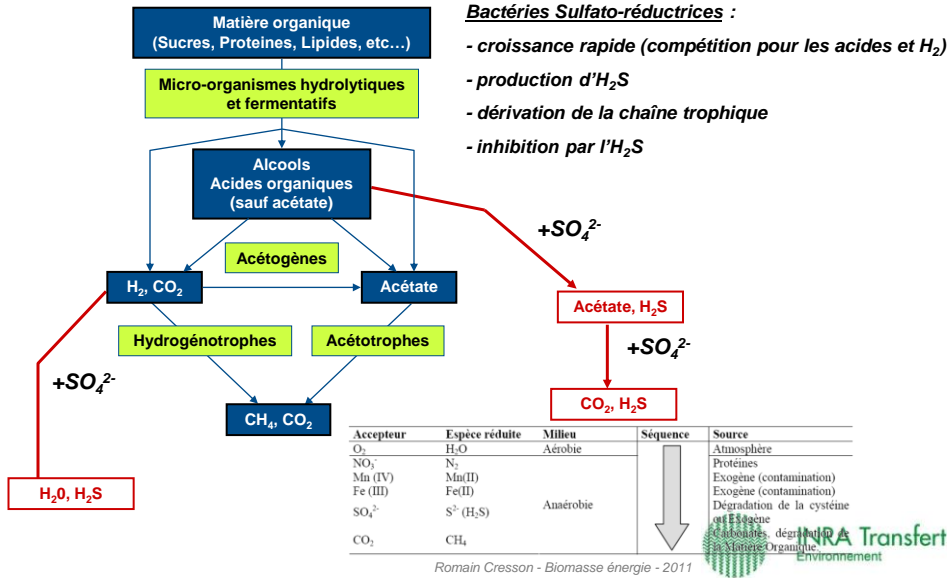


Evolution de l'énergie libre de Gibbs (ΔG^*) des réactions de conversion de l'éthanol, du propionate, du butyrate en acétate et de la production de méthane à partir de H_2/CO_2 en fonction de la pression partielle en hydrogène. [propionate] = [butyrate] = [éthanol] = [acétate] = 1 mM ; $[HCO_3^-]$ = 100 mM ; pression en CH_4 = 0,5 atm.

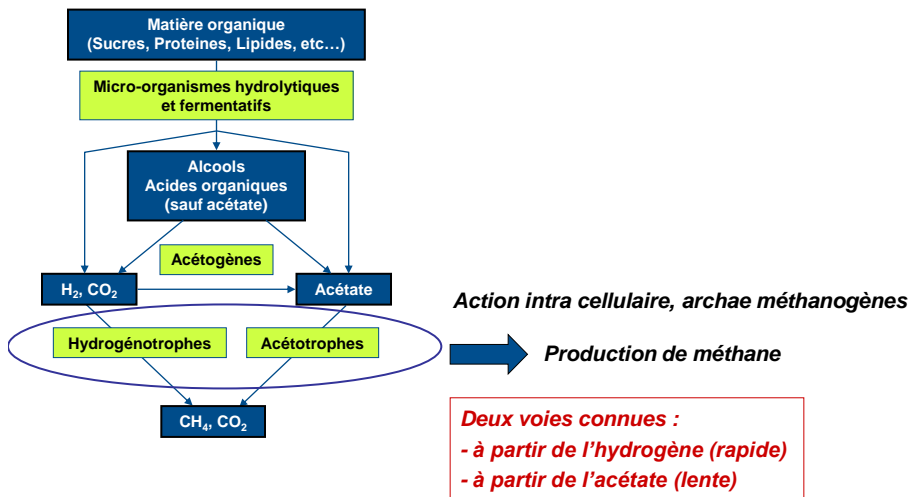
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Le rôle du Soufre (sulfates)



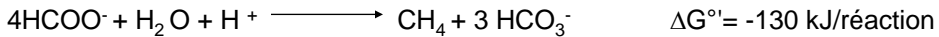
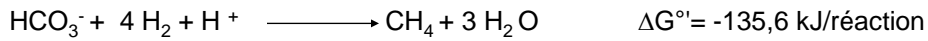
La phase de Méthanogénèse



Archae, anaérobie stricte, nécessite potentiel redox bas

1- Méthanogènes hydrogénophiles

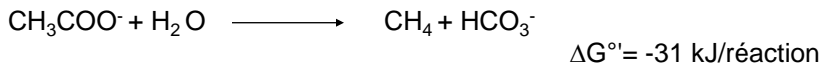
genres *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium*...



vitesses de réaction rapides, temps de doublement de croissance de quelques heures

2- Méthanogènes acétoclastes

genres *Methanosarcina*, *Methanotherix*...



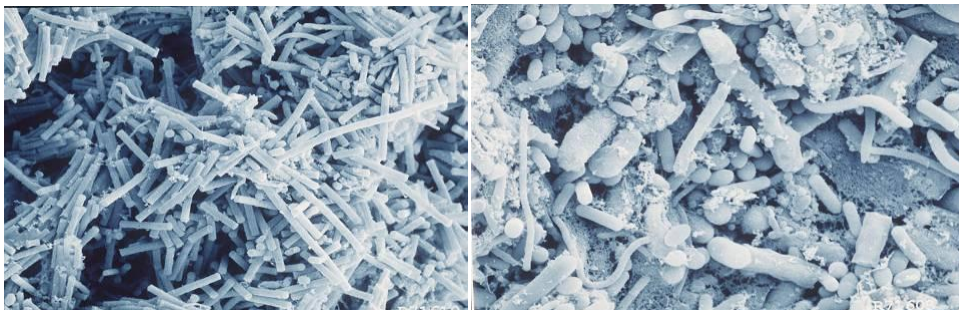
70% de méthane produit par cette voie

vitesses de réaction lentes, temps de doublement de croissance de 0,5 à plusieurs jours

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Granules anaérobies (SEM)



Acetate as Substrate
(*Methanosaeta*)

Sucrose as Substrate
(mixed culture)

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



	Temps de doublement	Rdt cellulaire gMV.g ⁻¹ DCO	Activité gDCO.gMV ⁻¹ .d ⁻¹	ks mM
Boue activée (sucre) <i>Aerobic Bacteria</i>	0.030	0.40	57.8	0.25
Acidification (sucre) <i>Fermentative Bacteria</i>	0.125	0.14	39.6	ND
Acetogenèse (Ac. gras) <i>Acetogenic Bacteria</i>	3.5	0.03	6.6	0.4
Methanogenèse				
<i>Autotrophe (H₂)</i>	0.5	0.07	19.6	0.004
<i>Acetoclaste (acetate)</i>				
<i>Methanosarcina</i>	1.5	0.04	11.6	5.0
<i>Methanosaete</i>	7.0	0.02	5.0	0.3

Methanosaete ($t_d = 7$ d), taux de croissance = $\ln(2)/t_d = 0.1$ d⁻¹



1- Température

Psychrophile 5 à 15°C ---> technologies extensives

Mésophile 15 à 45°C ---> **35-40°C**

Thermophile 45 à 65°C ----> **55-60°C**

- utilisation d'effluents chauds (peut être suffisant si TSH court)
- chauffage du digesteur par le biogaz

2- Concentration en DCO de l'effluent

non adaptée aux effluents dilués froids (énergie pour chauffer)

adaptée aux effluents chargés (> 2 g DCO/L)

sauf dans pays chauds: digestion anaérobie appliquée aux ERU (0,5g DCO/L)

taux d'épuration de 80 à 98% de la DCO soluble

nécessite souvent un traitement de finition aérobie avant rejet dans milieu naturel

Dans certains effluents (ex mélasses de betteraves), présence de molécules difficilement biodégradables : DCO dure



3- pH

pH optimum proche de la neutralité 6,5 à 8,5.

on peut corriger le pH dans l'alimentation, éviter la chaux (précipitation de carbonate de calcium)

4- Alcalinité

due aux AGV et aux bicarbonates

nécessité d'avoir une alcalinité "bicarbonates de calcium" relativement élevée : au moins 1000 mg/L d alcalinité CaCO_3

effluent chargé en N organique va produire de l'azote ammoniacal.

5- Production de boues

5% de la DCO consommée sert à la croissance des microorganismes (10-30% pour le traitement aérobie)

0,05 kg de MS/kg DCO éliminée (0,3 à 0,5 en aérobie)



INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

6 - Potentiel d'oxydo-réduction

doit être bas : de -250 à -600 mV ---> **-300 à -330 mV**

pour fonctionnement des méthanogènes (anaérobies strictes)

7- Nutriments

nécessite des micro-éléments N, P
mais aussi Fe, Ni, Mg, Ca, Na, Co

C/N/P optimal = 150/4/1
souvent présents dans effluents IAA.

8 - Stabilité

$10^{-6} < p \text{ H}_2 < 10^{-4} \text{ atm}$

stabilité fonction de l'adéquation entre la charge organique appliquée et la capacité réactionnelle des microorganismes.

étape limitante : méthanogénèse acétoclaste ou acétogénèse

si charge organique > capacité du réacteur : accumulation AGV

baisse du pH

inhibition des méthanogènes



INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

9- Inhibitions

AGV, pH, ppH2, Azote ammoniacal

mg/L	Modérée	Forte
Sodium	3500-5500	8000
Potassium	2500-4500	12000
Calcium	2500-4500	8000
Magnésium	1000-1500	3000
N-ammoniacal	1500-3000	>3000
Sulfure		200
Cuivre		50-70
Chrome(VI)		200-600
Chrome (III)		180-420
Nickel		30
Zinc		1-30

→ Tolérance augmente avec l'adaptation de l'écosystème (stabilité)

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

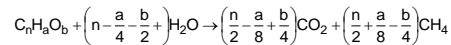
- **La Méthanisation**
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- **Problématique et enjeux**
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- **Processus biologique**
 - **Schéma réactionnel**
 - **Potentiel méthanogène et ordres de grandeur**
- **Les procédés**
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Le potentiel méthanogène (BMP) correspond à la quantité maximale de méthane produit par un composé lors de sa dégradation.

Théorie :



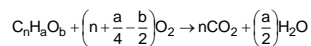
$$PM_{th} = \frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}}{12n + a + 16b} \times 22,4 \quad (LCH_4/g)$$

Exemple : le glucose $C_6H_{12}O_6$ $PM_{th} = 0,373 LCH_4/g$



Lien avec la DCO (demande chimique en oxygène) :

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder complètement un composé.



$$DCO_{th} = \frac{n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2}}{12n + a + 16b} \times 32 \quad (gO_2/g)$$

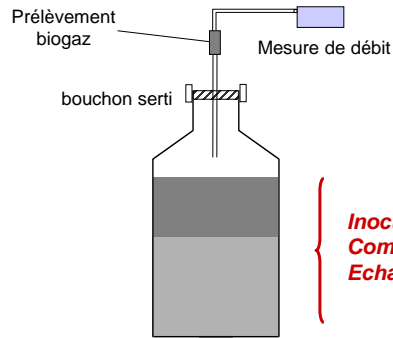
Glucose ($C_6H_{12}O_6$) = 1,067 gO₂/g

Correspondance simple :

$$\frac{PM_{th}}{DCO_{th}} = \frac{\frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}}{12n + a + 16b} \times 22,4}{\frac{n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2}}{12n + a + 16b} \times 32} = 0,35 LCH_4 / g_{DCO}$$



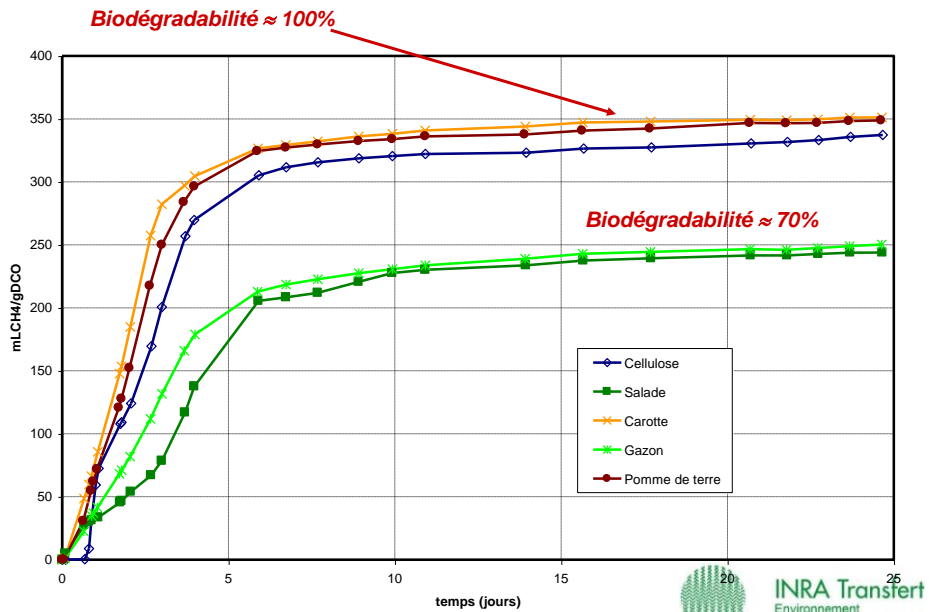
Mesure du potentiel méthanogène



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Exemples de potentiel méthanogène



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



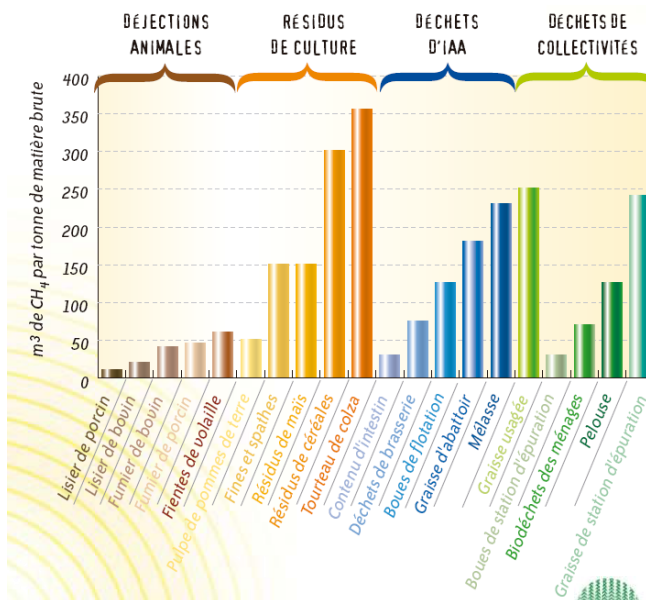
Le potentiel méthanogène s'exprime :

- en m³ de méthane par kg de déchet frais (rare)
- en m³ de méthane par kg de matière sèche (m³CH₄/kgMS)
- en m³ de méthane par kg de matière organique (ou volatile) : m³CH₄/kgMV
- Pour les solides, rarement en m³ de méthane par kg de DCO (mesure de DCO difficile)

Déchets municipaux (biodéchets) :	0,25 à 0,3 m ³ /kgMV
Déchets municipaux (OM grises) :	0,2 à 0,25 m ³ /kgMV
Graisses (lipides) :	1 m ³ /kgMV*
Sucres :	0,415 m ³ /kgMV*
Protéines :	0,496 m ³ /kgMV*
Boues d'épuration :	0,3 m ³ /kgMV

* valeurs théoriques maximales

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Potentiel méthane des déchets fermentescibles (source : ADEME)

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

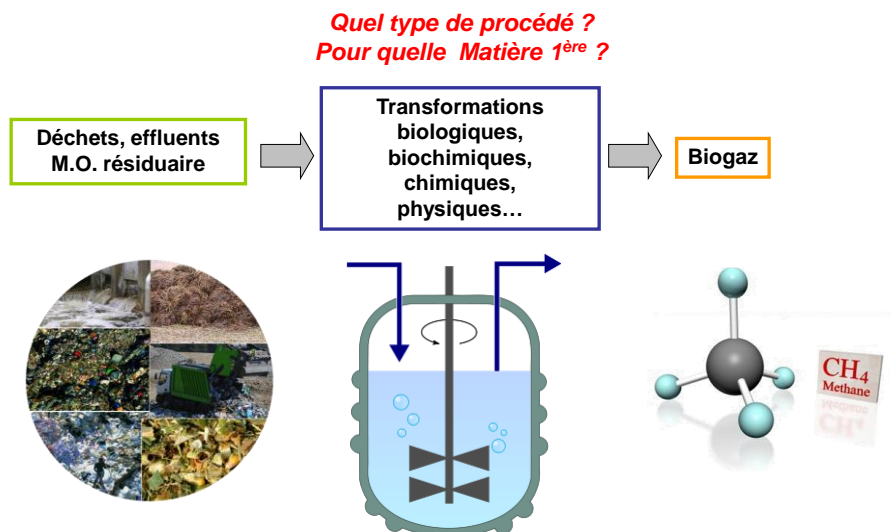
- La Méthanisation
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- Problématique et enjeux
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- Processus biologique
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- **Les procédés**
 - Types, Performances, dimensionnement et cont
 - Valorisation des sous-produits
 - Données économiques
 - Exemples d'applications



INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Comment produire du biogaz



INRA Transfert
Environnement

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Les grandes familles de procédés

Température

Procédés mésophiles (35°C)
Procédés thermophiles (55°C)

Configuration

Procédés à une étape
Procédés deux étapes

Teneur en eau dans le réacteur

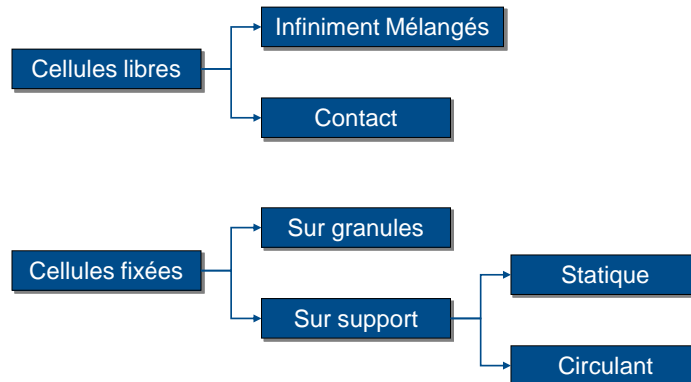
Procédés dits « humides » (5 à 15% de MS)
Procédés dits « secs » (20 à 40% de MS)

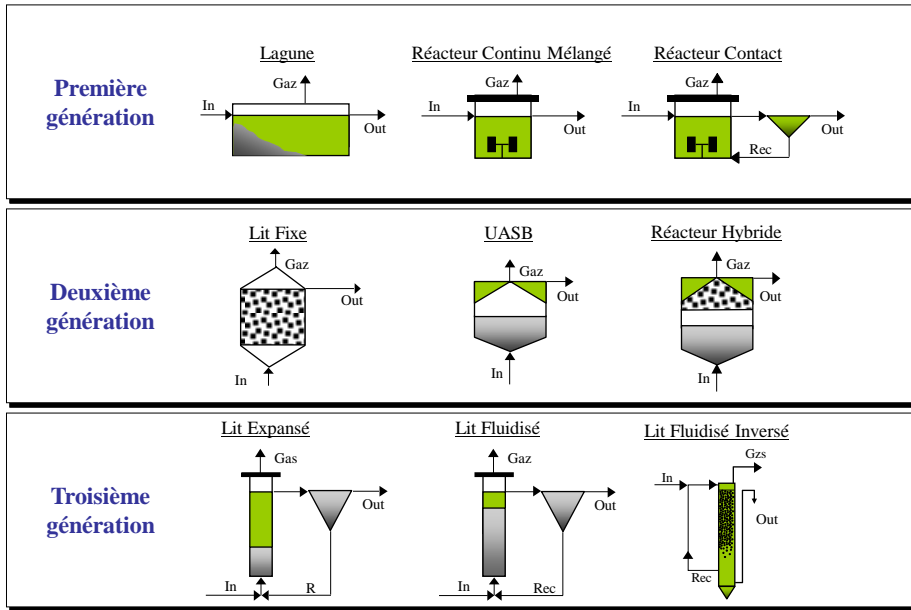
Teneur en matière sèche (cissité) du produit

Effluents (0 à 5 % de MS)
Résidus solides (5 à 60 % de MS)



Typologie des procédés





Des performances variables



Lagune



Lit fluidisé

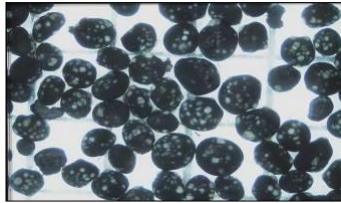
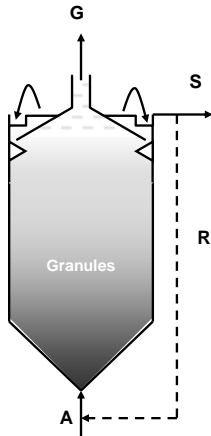
Même eau usée, même quantité de pollution éliminée **MAIS...**

- ✓ 300 m³
- ✓ 21 jours
- ✓ boucle ouverte (pas de contrôle)

- ✓ 0.15 m³
- ✓ 1 jour
- ✓ boucle fermée (contrôle actif)

Les réacteurs à lits de boues (granules)

Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor



Charge volumique : 10 à 25 kgDCO/ m³.jour

TSH : 0,5 à 2 jours

Vitesse de décantation des granules élevée : 20-50 m/h

Forte densité de biomasse : 20-50 kgMVS/m³

Hauteur : 4-6 m

Vitesse ascensionnelle du liquide : 0,5-2 m/h

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Décantation des boues anaérobies



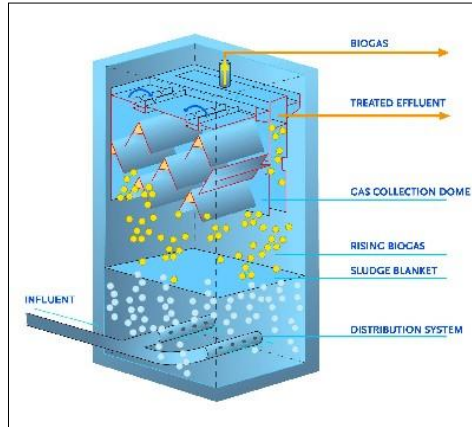
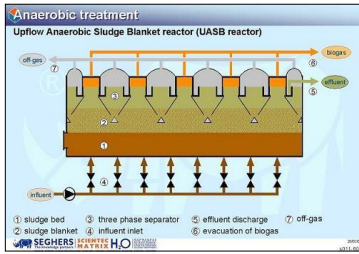
Granulaire Flocculante Dispersée

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Les réacteurs à lits de boues (granules)

Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor



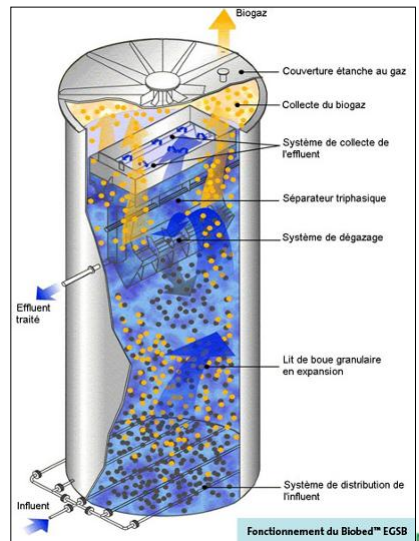
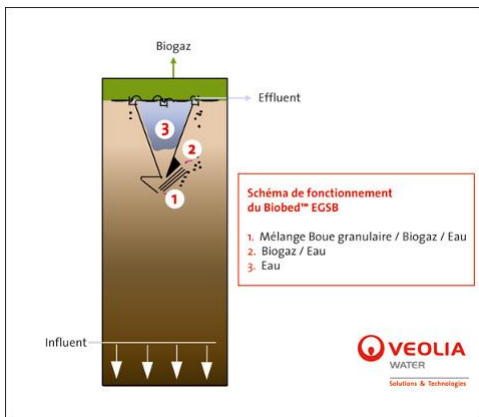
Brasserie (Belgique), 600 m³/j
Procédé Seghers

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Les réacteurs à lits de boues (granules)

Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) Reactor



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Les réacteurs à lits de boues (granules)

Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) Reactor

Charge volumique : 20 à 30 kgDCO/ m³.jour
 TSH : 0,5 à 1 jours
 Vitesse de décantation des granules très élevée : 60-100 m/h
 Hauteur : 12 à 18 mètres
 Vitesse ascensionnelle du liquide : 5-6 m/h
 Auto-nettoyage du séparateur triphasique

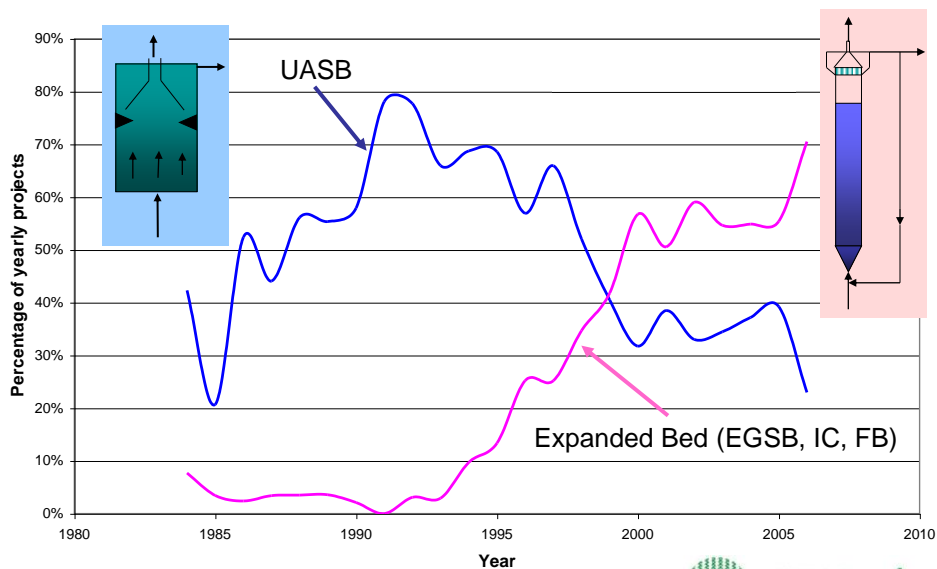


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Expanded Bed versus UASB Systems

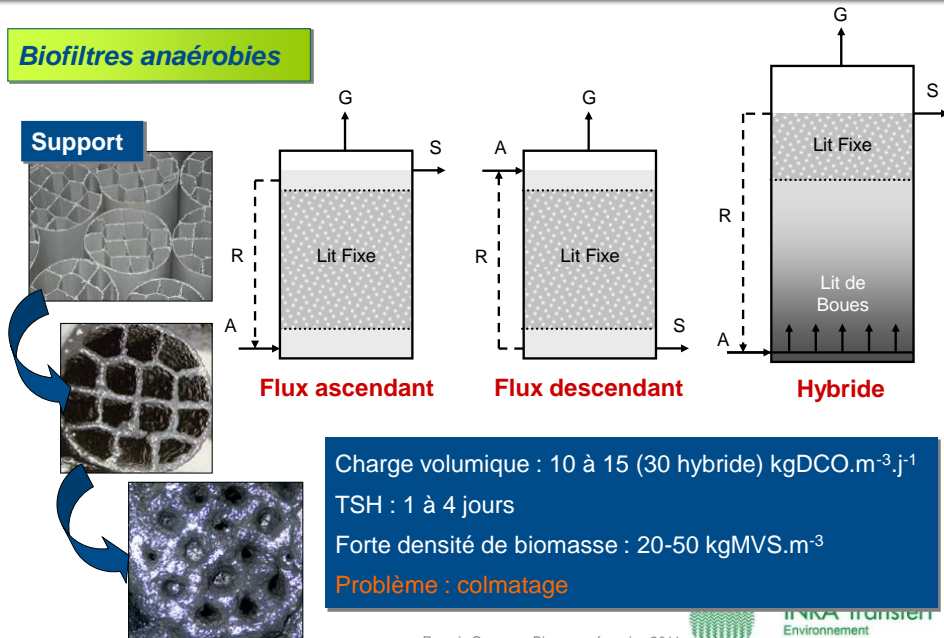


Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

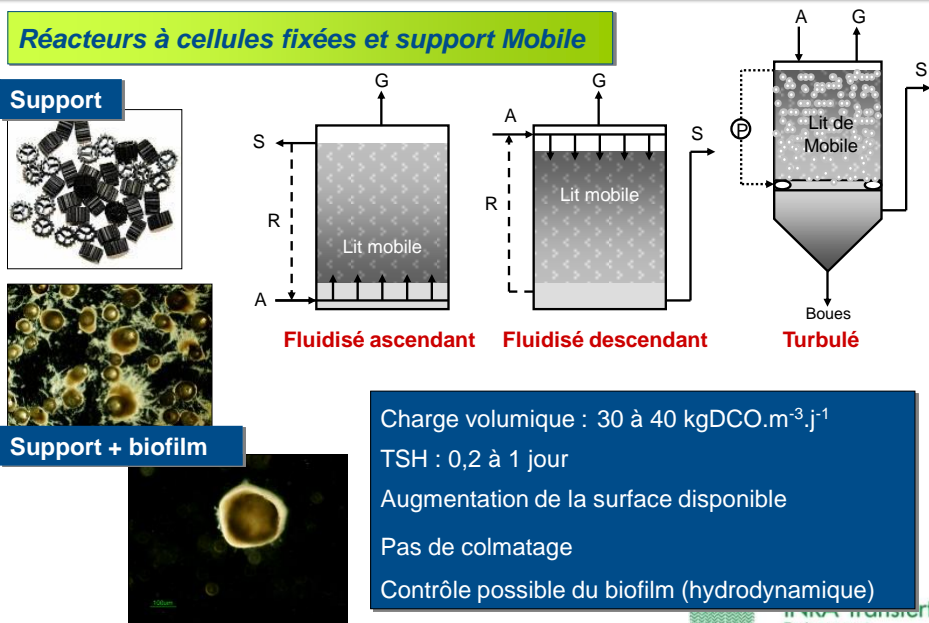


INRA Transfert
Environnement

Biofiltres anaérobies



Réacteurs à cellules fixées et support Mobile



Anaerobic Fluidized Bed (AFB) Reactors Treating for Phenol-Formaldehyde Wastewater in Taiwan



4.5mΦ; 22 mH



5.0mΦ; 14 mH

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

Environnement

Procédés humides

Paramètres de fonctionnement et performances

digesteur	CVA(Kg DCO/m ³ /j)	TSH (j)
lagune anaérobie	0,1 à 1	10 à 60
contact anaérobie	1 à 5,5	5 à 10
filtre anaérobie	5 à 15	1 à 5
hybride	10 à 20	1 à 4
UASB	5 à 20	0,5 à 2
compartiments verticaux	9 à 15	2 à 3
recirculation interne	20 à 40	0,2 à 1
lit fluidisé	20 à 40	0,2 à 1

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Choix de la technologie

Caractéristiques de l'effluent

- si chargé en MES
 - ⇒ colmatage des filtres
 - ⇒ choisir contact ou lit fluidisé
- si peu chargé en DCO
 - ⇒ TSH faible possibilité de lessivage de la biomasse
 - ⇒ choisir biofilm (supports fixes ou mobiles)



Effluents de IAA

Effluents des IAA généralement bien adaptés

- ne contiennent pas de molécules toxiques
- DCO élevée
- sources et débouchés pour la chaleur

Applications dans

- sucreries, confiteries
- laiteries
- unités de jus fruits
- transformation de la pomme de terre
- conserveries de légumes
- brasseries et boissons
- vinification, distilleries vinicoles
- levureries...

Possibilité de traiter également les déchets solides...



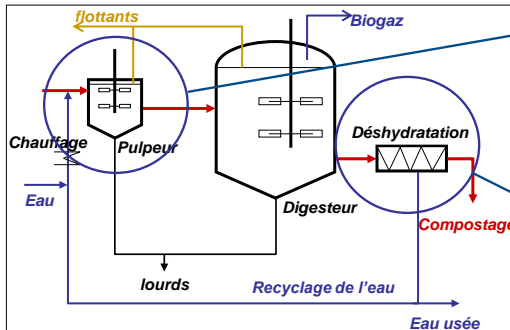
Les procédés « humides », « substrat sec »

Avantages

- simplicité de pompage et de transferts (coûts réduits)
- la trituration mécanique favorise l'hydrolyse

Inconvénients

- formation d'une couche « flottante »
- sédimentation des lourds
- réacteurs plus gros



Pré-traitement : Trituration

- mélanger les déchets avec l'eau pour atteindre la teneur souhaitée
- désagréger mécaniquement les déchets pour les rendre plus facilement dégradables

Post traitement : Déshydratation

- assécher le digestat
- récupérer l'eau de process (réinjection en tête)

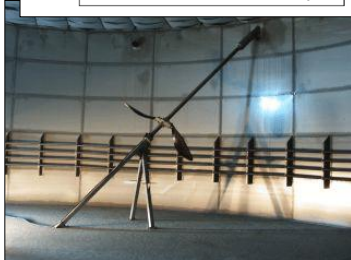
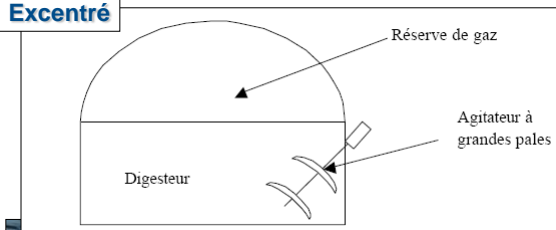
Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Les procédés « humides », « substrat sec »

Agitation Mécanique

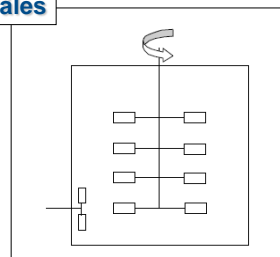
Excentré



Immergé



Pâles



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Les procédés « secs »

Avantages

- Réduction de la taille des réacteurs
- Spectre des substrats plus large

Inconvénients

- Complexité de la matrice solide
- Procédés rudimentaires
- Absence de critères de performances
- Exploitation des installations

Criblage

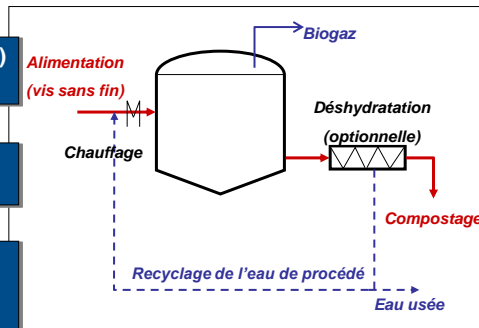
Retenir les petites particules (40 mm)
Simplifier le pompage / transfert

Broyage

Augmenter la disponibilité de la m.o.
Augmentation des performances

Autres...

Utilisation de réservoirs « tampon »
chauffés (hydrolyse)
Trituration / pulpage mécanique ...



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



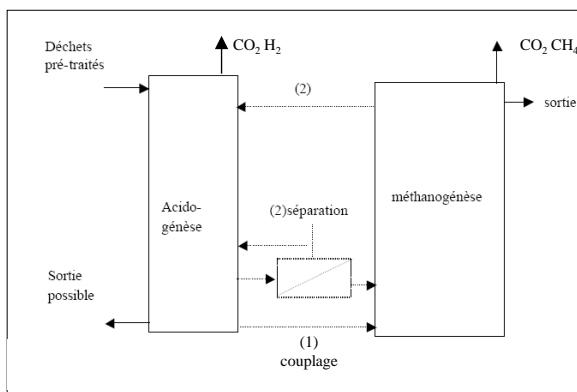
Procédés en deux étapes

Intérêt :

Optimiser la phase d'hydrolyse
Meilleure maîtrise (stabilité) de la phase de méthanisation

Mise en œuvre :

Première étape anaérobie
Première étape aérobie (très courte, pour activer l'hydrolyse)



Stratégie mise en œuvre de la méthanisation en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des solides avec recirculation du lixiviat épuré

Peu de réalisations industrielles : surcoût pas forcément compensé par les gains de performances

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



Le procédé VALORGA

Urbaser (Esp) Valorga

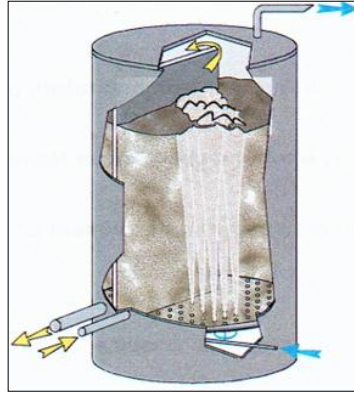
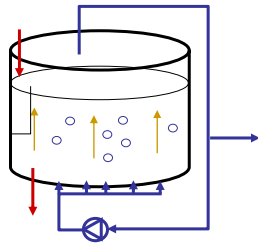
25 à 35 % MS

Charge : 3 à 5 kgMV.m⁻³.j⁻¹

Temps de séjour : 15 à 30 jours

Thermophile ou mésophile (Freiburg, Genève)

Le mélange est assuré un recyclage du biogaz injecté sous pression par intermittence



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Le procédé DRANCO

OWS

20 à 50 % MS

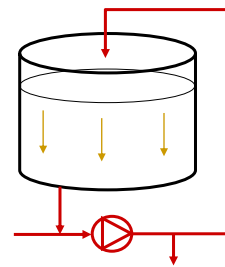
Charge : 10 à 20 kgMV.m⁻³.j⁻¹

Temps de séjour : 15 à 30 jours

Thermophile ou mésophile (Freiburg, Genève)

Le mélange est assuré par la recirculation du milieu avec les intrants frais

Écoulement du solide vers le bas



Romain Cresson

Brecht
(thermophile)

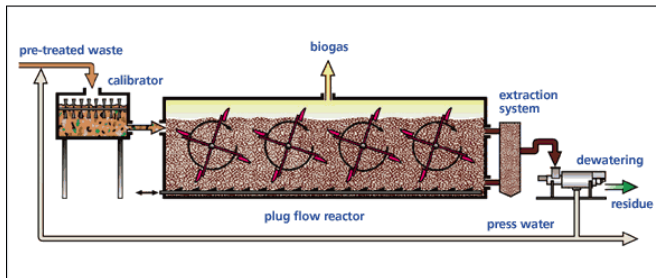
Nécessité de maintenir un taux de solide proche de 20-25%

Temps de séjour : 15 à 20 jours

Le mélange est assuré par des mobiles (agitateurs transversaux lents)

Ecoulement du solide horizontal

Substrats: FFOM, déchets organiques solides, Déchets verts municipaux,...



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

La charge appliquée

Exprimée en **KgDCO/m³/j (liquides)** et **kgMS/m³/j** ou **kgMV/m³/j (solides)**

Varie selon les systèmes : **1 à 40 kgMO/m³/j**

Conséquence sur la taille des unités (humides > secs)

Le temps de séjour

Temps « moyen » passé par les déchets dans le réacteur

Varie de quelques heures (procédés humides forte charge) à 30 jours (procédés secs)

Thermophile < mésophile

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011



INRA Transfert
Environnement

Les conditions d'entrée

Taux de matière (organique, sèche et volatile de l'intrant) : Charge organique
Débit massique (ou volumique + densité)

En sortie

Biogaz : débit, composition ($\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$), teneur en eau
Digestat : MS, MV, débit massique

Dans le réacteur

pH de 6,5 à 8,5
Potentiel Redox de -300 à -400 mV
Acides organiques (acides gras volatils : acétate, propionate, butyrate)
ammonium (NH_4^+)



Par rapport au méthane produit

Base : quantité de méthane produit
Comparaison au potentiel méthane mesuré

Souvent difficile à mesurer

Procédés humides : élimination de la matière organique

Rendement épuratoire : bilan entrée / sortie

Procédés secs : élimination de matières volatiles

Base : bilan entrée / sortie
Problème : comment tenir compte des boues anaérobies?

Facile à mesurer, mais pertinence limitée...

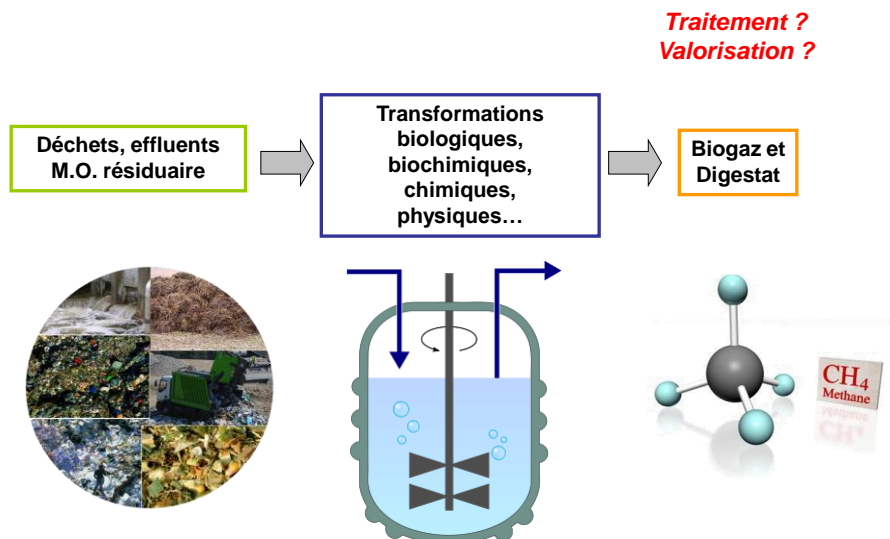


- La Méthanisation
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- Problématique et enjeux
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- Processus biologique
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- **Les procédés**
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - **Valorisation des co-produits**
 - Données économiques
 - Exemples d'applications

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Comment produire du biogaz



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Valorisation du biogaz

Thermique

Eaux de chaudière
consommation sur place

Electrique

Moteur à gaz ou turbine
contrainte : coût rachat du kWh

*Arrêté du 10 juillet
2006
de 4.6 à
[9.2 - 14 Jct€/kwh*

Carburant

Installation de purification (coût)
en croissance

Injection dans les réseaux urbains

Manque de recul, coût de rachat
Réticence des opérateurs



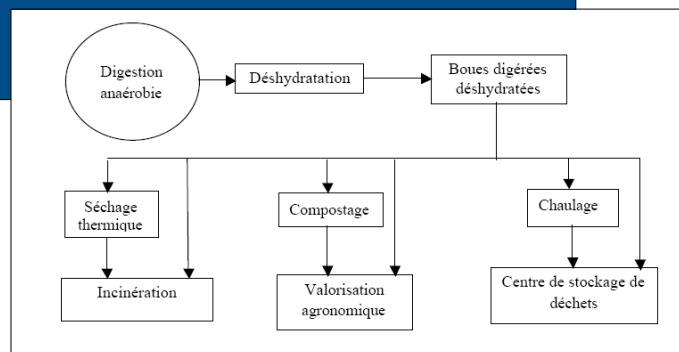
Devenir du digestat

Intrants non contaminés (Biodéchets, Déchets des IAA...)

Post compostage
Réutilisation du compost

Déchets contaminés (OM grises, certaines boues de STEP, ...)

Stabilisation
Valorisation
Stockage
(déchet ultime)



- La Méthanisation
 - Définition
 - Contexte
 - Débouchés
- Problématique et enjeux
 - Traitement des eaux résiduaires
 - Traitement des résidus solides
 - Place de la méthanisation
- Processus biologique
 - Schéma réactionnel
 - Potentiel méthanogène et ordres de grandeur
- Les procédés
 - Types, Performances, dimensionnement et contrôles
 - Valorisation des co-produits
 - **Données économiques**

Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

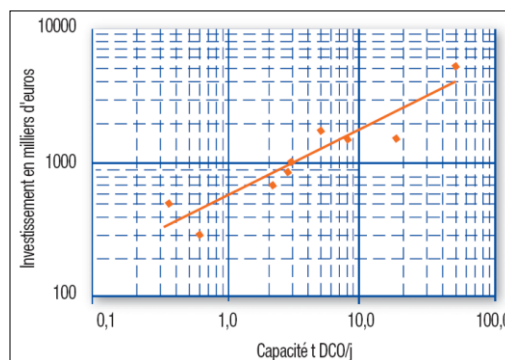
INRA Transfert
Environnement

Economie de la méthanisation

Investissement = f (taille de l'unité)

Pour des unités de plus de 3 t DCO/j : 350 000 euros / tonne de DCO traitée / par jour.

Pour de plus petites unités, ce ratio croît de façon exponentielle,
Les annuités liées aux investissements représentent la principale composante du coût global.



Romain Cresson - Biomasse énergie - 2011

INRA Transfert
Environnement

Coûts d'exploitation et recettes

€/T DCO ENTRANTE	COÛTS DE FONCTIONNEMENT	RECETTES
Main-d'œuvre	15-30	
Électricité	5-10	
Réactifs	0-150	
Combustible	0-10	
Élimination des boues	0-20	
Valorisation du biogaz		0 à 130
TOTAL	20 à 70 (hors réactifs) et jusqu'à 220	0 à 130



Recettes d'exploitation

Valorisation énergétique jusqu'à 70% :

- **Thermique** : process de l'usine
- **Electrique** : revente EDF (9 à 14 cts kWh) ou consommée sur site

La production de biogaz : 3,1 kWh/kg DCO entrante.

Jusqu'à 2,2 kWh/kg DCO entrante peuvent être valorisés

Coût des énergies fossiles : 22 à 60 €/MWh (fonction du type combustible et de la quantité consommée).

→ Economies : jusqu'à 130 €/t DCO entrante



Economies générées par le process

Electricités

Conso . Filière anaérobie : 100 à 300 kWh/t DCO entrante

Conso . Filière aérobie : 1200 kWh/t DCO entrante

Elimination des boues

Anaérobie 30 à 50 kg MS/t DCO éliminée

Aérobie 200 à 270 kg MS/t DCO éliminée → 5 à 9 fois moins

Dépollution par digestion anaérobie - *mémo*

- produit du biogaz valorisable, utilisable sur le lieu de production
- produit peu de boues : 0,05 kg de MS/kg DCO éliminée (0,3 à 0,5 en aérobie)
- nécessite peu d'énergie pour fonctionner
- nécessite $T > 20^{\circ}\text{C}$ pour avoir des vitesses correctes : $35\text{-}40^{\circ}\text{C}$ en mésophile,
 $55\text{-}60^{\circ}\text{C}$ en thermophile
 - non adaptée aux effluents dilués froids (énergie pour chauffer)
 - adaptée aux effluents chargés (> 2 g DCO/L)
- charges organiques élevées : 2 à 40 kg DCO / m^3 réacteur/jour
- Diminution de 60 à 98% de la DCO soluble, 20 à 60% des solides volatils
- nécessite souvent un traitement de finition aérobie pour normes de rejet
- bien adaptée (par rapport à aérobie) pour effluents limités en N et P
 - C/N/P optimal = 150/4/1
- nécessite des micro-éléments N, P mais aussi Fe, Ni, Mg, Ca, Na, Co
- croissance lente des micro-organismes → les retenir dans le réacteur
- la pollution azotée n'est que peu affectée
- pH optimum, proche de la neutralité : 6.5 à 8.5
- potentiels d'oxydo-réduction bas: -300 à -330 mV (-250 à -600 mV)

