

## Importance d'une bonne compréhension des fondements microbiologiques de la digestion anaérobie

Serge R. Guiot et Jean-Claude Frigon

Le biogaz: valorisation d'une énergie renouvelable d'avenir.  
APCAS, AWMA, Section Québec. Montréal, 24 avril 2008.



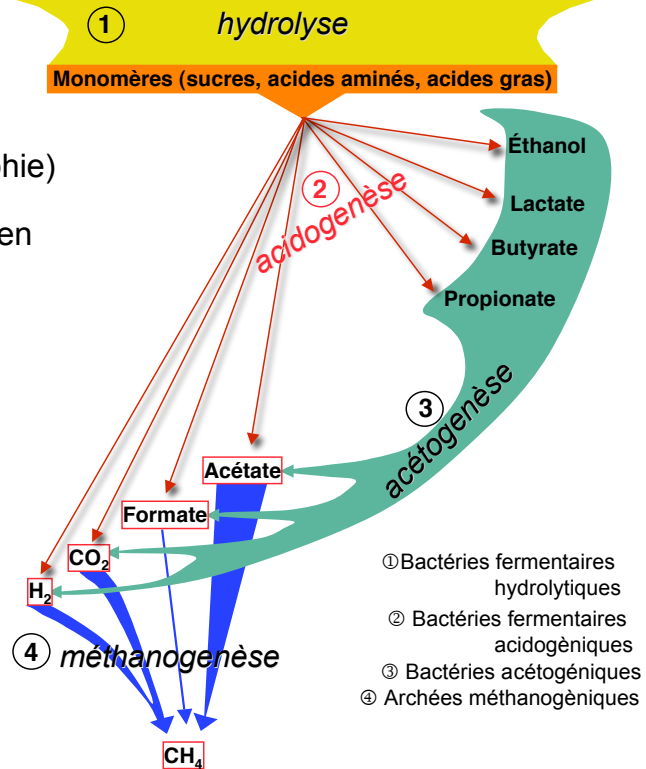
## Qui sommes-nous ?

- Bioénergie à partir de matières organiques → Bioingénierie  
environnementale → Institut de Recherche en Biotechnologie → Conseil  
National de Recherches Canada
- 20 ans de digestion anaérobie: structure du biofilm méthanogénique, voies  
cataboliques, eaux usées, eaux souterraines contaminées (PCE), boues,  
fraction organique déchets municipaux, cultures énergétiques
- Recherche générique, collaboration avec des partenaires de l'industrie,  
contrats de service
- Biohydrogène à partir de piles microbiennes
- Fermentation anaérobie de syngas
- Démonstration de la DA à l'aide d'une unité pilote mobile
- Impact des pré-traitements sur le rendement en méthane de cultures  
énergétiques

• **La digestion anaérobie convertit la matière organique en méthane et CO<sub>2</sub>**

- Travail coopératif (syntrophie) séquentiel entre diverses populations bactériennes en équilibre stable
- Fondamentalement, transfert des équivalents-réducteurs de la charge organique au produit final (CH<sub>4</sub>), entre les diverses espèces bactériennes, via des métabolites intermédiaires = AGV, formate, H<sub>2</sub>

Matière organique (polysides (cellulose, amidon), protéines, lipides)

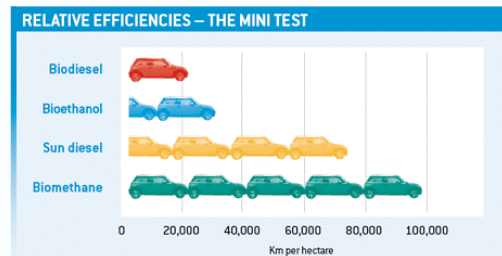
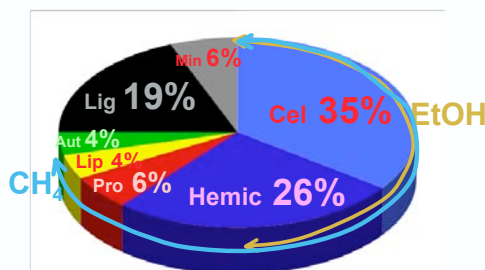


**DA : rendement énergétique**

Avantage unique DA : étendue de son spectre métabolique, par comparaison au bioéthanol (sucres C6, C5?) ou biodiesel (lipides)

Substrat	Fraction potentielle transformée en CH <sub>4</sub>	Fraction potentielle transformée en EtOH
Panic érigé	75 %	35-61 %

T. Evans, NAAC Contractor Conference 2007



# LIMITES MÉTABOLIQUES

## Carbohydrates

**Polyosides (amidon, cellulose, hémicellulose)**



**Sucres simples (hexoses, pentoses)**

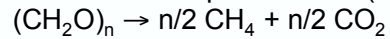


**Acides + H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>**



**CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>**

Potentiel théorique méthane (ultime) :



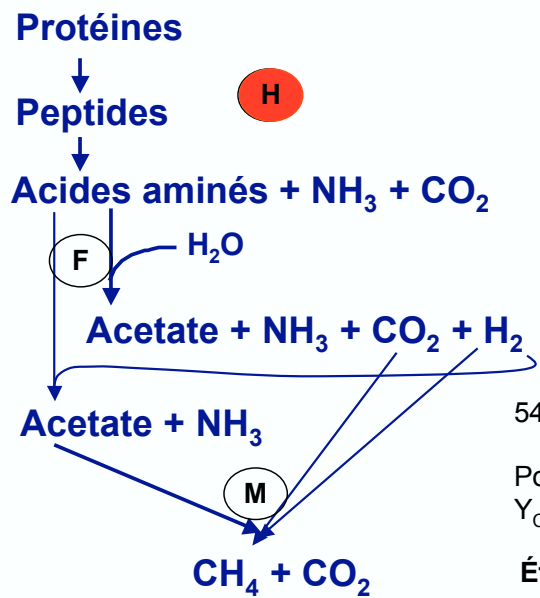
$$Y_{\text{CH}_4} = 0,37 \text{ Nm}^3 / \text{kg sucre}$$

**Étape limitante : court terme : H**

**long terme : M**

# Protéines

Formule élémentaire moyenne  
 $C_{106}H_{168}O_{34}N_{28}S$



+ 68,5 H<sub>2</sub>O

54,75 CH<sub>4</sub> + 51,25 CO<sub>2</sub> + 28 NH<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>S

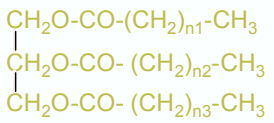
Potentiel théorique méthane :  
 Y<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 0,51 Nm<sup>3</sup> / kg protéine

Étape limitante : protéolyse

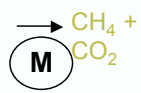
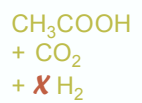
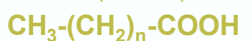
©Guiot - APCAS Avr.08 7/26

# Graisses

Lipides (triglycérides)

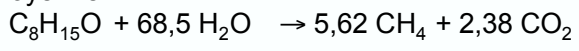


Acides gras à longue chaîne (AGLC)



$$X = n1 + n2 + n3$$

Formule élémentaire moyenne



Potentiel théorique méthane :  
 Y<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 1 Nm<sup>3</sup> / kg graisse

Étape limitante : fermentation acétogénique des AGLC (p<sub>H<sub>2</sub></sub>, toxicité des AGLC...)

©Guiot - APCAS Avr.08 8/26

## Rendements - en pratique

Substrats	Conversion	Méthane
	(%)	(Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton. humide / Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ton. sèche)
Fraction organique déchets municipaux	50-70	100 / 350
Boues secondaires	30-60	70 / 318
Résidus d'abattoirs	60-85	140 / 550
FOG	> 80%	ND/ 1010
Lisier bovin	ND	25 / env. 114
Panic érigé	30-75	162 / 377

Frigon & Guiot. 2005. Water Sci. Technol. 52(1-2):561-566  
 Kabouris et al. 2008. Wat. Res. 42(3):212-221  
 Salminen and Rintala. 2002. Wat. Res. 36(13): 3175-3182

©Guiot - APCAS Avr.08 9/26

## Améliorations

### Hydrolyse / étape limitante

Intégration de prétraitements hydrolytiques

- Options porteuses
  - chimiques (acide sulfurique dilué, dioxyde de soufre, trempage ou lixiviation à l'ammoniaque, chaux hydratée)
  - ou/et thermochimiques (vapocraquage; oxydation par voie humide)
- Combinaison/Optimization avec enzymes commerciales

CBP ~ "consolidated bioprocessing" ~ hydrolyse et fermentation / 1 étape

- Enrichissement avec consortia naturels / rumen comme modèle
- Amélioration de souches fermentaires robustes, naturelles (génie génétique, expression in situ enzymes hydrolytiques, ancrage sur membrane cellulaire ...)

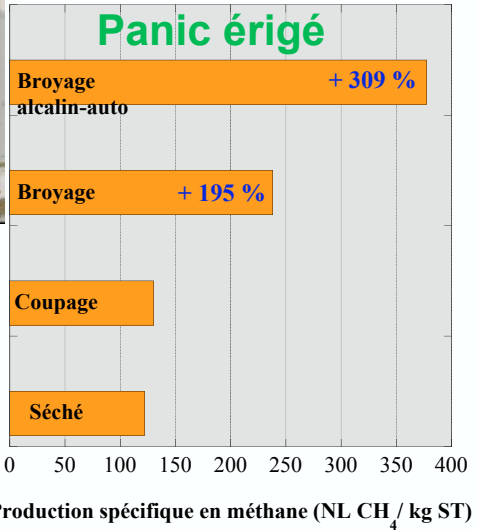
Yang & Wyman. 2008. Biofuels, Bioprod. Bioref. 2:26-40

©Guiot - APCAS Avr.08 10/26

## Pré-traitement

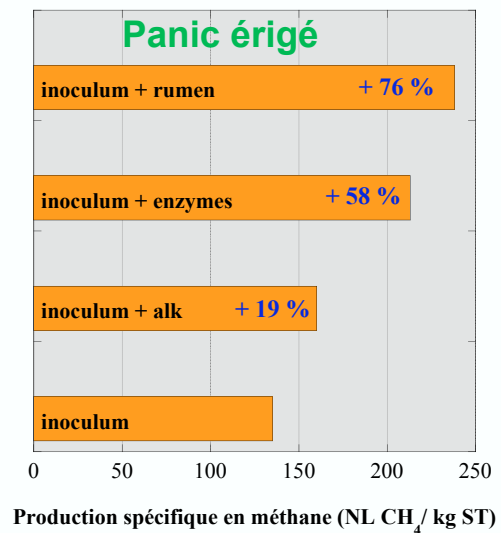


- Mieux si récolté en été qu'au printemps suivant (séché).
- Pré-traitement intensif mécanique: double Q CH<sub>4</sub>
- Mécanique + chimique: triple Q CH<sub>4</sub>
- Environ 76% de conversion, soit le rendement maximal théorique



## Inoculum compétent

- Pré-traitement enzymatique: efficace
- Démarrer avec un inoculum possédant un meilleur bagage enzymatique: mieux
- Importance de s'assurer du potentiel en méthane d'un substrat à l'aide d'un inoculum approprié



## Améliorations 2

Domaines de température (rappel) : psychrophile (7-25 °C), mésophile (27-37 °C), thermophile (55-60 °C)

- ✓ Le taux (vitesse) de digestion augmente avec la température (taux de croissance des microorganismes plus élevé => charges plus élevées ou des temps de séjour plus court)
- ✓ L'efficacité de digestion (% dégradation) augmente avec la température

### Biodégradabilité

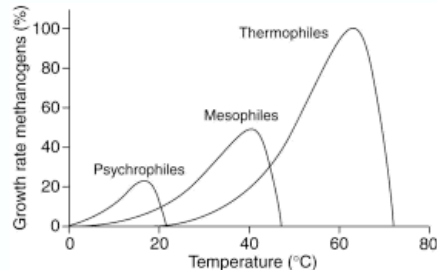
**Biosolides (WAS) : +20%**

Y. Kiyohara, T. Miyahara, O. Mizuno, T. Noike, K. Ono  
(2000) Water Environment J. 14(2):150-154

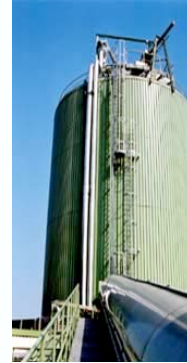
**FODSM : +7% à 35%**

J. Mala-Alvarez, S. Macé, P. Llabrés (2000) Bioresource Techn.  
74:3-16

↗ dég. protéines(++), lipides(+)



Wiegand J. (1990) Temperature spans for growth: hypothesis and discussion. FEMS Microbiol. Rev. 75:155-170.



©Guiot - APCAS Avr.08 13/26

## Améliorations 3

### Acétogenèse, méthanogenèse / étape limitante

- consolider les fonctions limitantes
  - p.ex. accroître rétention microorganismes sensibles, acclimatation
- comprendre/contrôler les mécanismes d'inhibition des AGLC (nature tensio-active ? H<sub>2</sub> ? déficience des associations syntrophiques ?)

**Installation à la ferme, en délocalisation, à petite échelle... : impératifs d'économie : psychrophiles**

- méthanogènes acétoclastes : limitantes
- bioaugmentation / Archées psychrophiles vraies - p.ex. permafrost



©Guiot - APCAS Avr.08 14/26

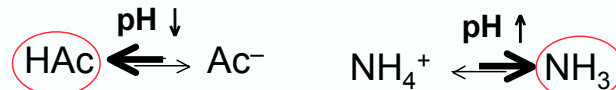
# AUTRES POINTS SENSIBLES

©Guiot - APCAS Avr.08 15/26

## Acides, ammoniac, pH

Inhibition par accumulation acide,  $\searrow$  pH (surcharge organique / déséquilibre fermentation/méthanogenèse)

Inhibition par l'ammoniac si surplus d'azote, ou génération lors de la digestion des protéines (abattoirs, lisier)



La forme non-ionique de l'acide ou de l'ammoniac est inhibitrice

p.ex. 300 mg/L ac. acétique @ pH 5,5 > 5000 mg/L @ pH 7

⇒ **Contrôle du pH et neutralisation**



⇒ **Contrôle AGV/liquide en temps réel**

- **spectrofluorimétrie** (ex. Agropur NDduBC)

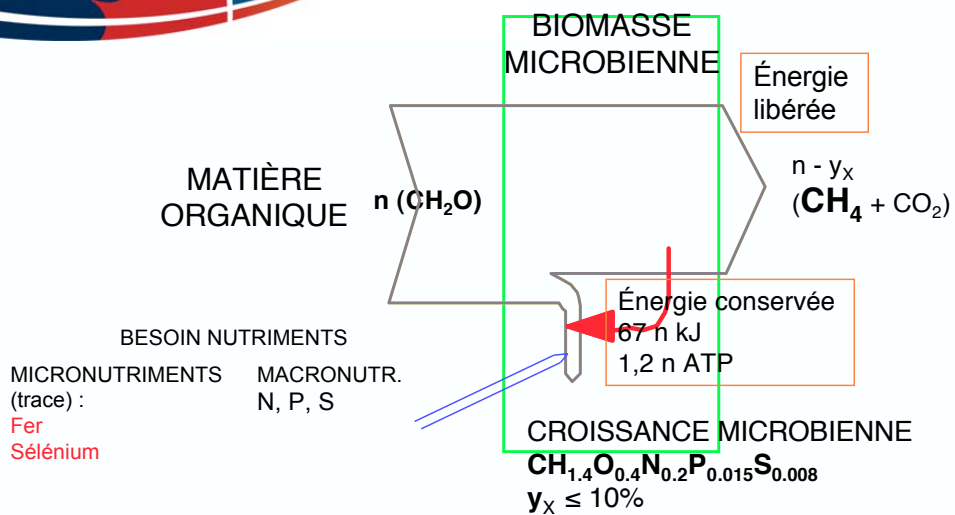


Autres inhibiteurs : sulfate de cuivre et antibiotiques

©Guiot - APCAS Avr.08 16/26

# ÉQUILIBRE NUTRITIONNEL

## BILAN GLOBAL DE MASSE ET D'ÉNERGIE



$$\begin{aligned} \text{N/C} &= (0,2 \cdot 14/12) \cdot 10\% = 2\% \text{ p/p} \rightarrow \text{C:N } 50:1 \\ \text{P/C} &= (0,015 \cdot 31/12) \cdot 10\% = 0,4\% \text{ p/p} \rightarrow \text{C:P } 250:1 \end{aligned}$$

## Nutriments

Substrats	C:N < 50:1	C:P < 250:1	Balance
Déchets municipaux	40:1 à 100:1	200:1	Léger surplus carbone
Boues primaires, secondaires	5:1 à 10:1	13:1 à 27:1	Surplus azote, phosphore
Lisier porc, bovin	14:1 à 20:1	25:1 à 110:1	Surplus azote
Maïs ensilé	40:1	150:1	Équilibré
Panic érigé	92:1 à 491:1	624:1 à 2344:1	Surplus carbone

Shin and Park. 1989. Biotechnol. Let. 11(4):293-298  
 Frigon, Mehta & Guiot. 2007. Conf. Growing the margins, London, Ontario, 2-5 avril 2008.

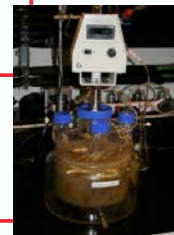
©Guiot - APCAS Avr.08 19/26

## Co-digestion

Substrats	Ratio C:N et C:P	Rendement (m <sup>3</sup> /t humide)	Gain (% méthane)
Déchets municipaux	70 200	100	-
Déchets municipaux (75%) et boues secondaires (25%)	54 155	89	-11 %

- **Note : importance de vérifier expérimentalement avec le substrat réel (BMP) - chaque cas est particulier - données de la littérature pas toujours extrapolables**

Fumier bovin	20 25	25	-
Fumier bovin (80%) et panic érigé (20%)	34 145	52	+108 %



©Guiot - APCAS Avr.08 20/26

# BILANS ÉNERGÉTIQUE ET CARBONE DE QUELQUES GISEMENTS

©Guiot - APCAS Avr.08 21/26

## PARAMÈTRAGE POUR ÉVALUATION POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET IMPACT ÉCOLOGIQUE (↓GES)



### Digestion:

- **Siccity** fraction organique déchets solides municipaux (FODSM) : **28%**
- **SV/ST** 90%
- **Efficacité** dégradation (% conversion) : **20 - 80 %**
- **Rendement méthane**: **0,5 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV dégradé**

### Conversion énergétique :

- **9,6 kWh** or **0,0346 GJ/Nm<sup>3</sup> méthane (= 0,9 litre essence)**

### Efficacité de conversion énergétique par génératrice électrique:

- **28%** (à un coût de 0,8 €/kWh)

### Efficacité de conv. énergétique par purification en gaz naturel:

- **92%** (à un coût de 40 €/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>)

### Potentiel GES

- **4,3 t équivalent-CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>)/t FODSM enfouie (UNEP)**
- **0,85 t eCO<sub>2</sub>/t sèche DA**

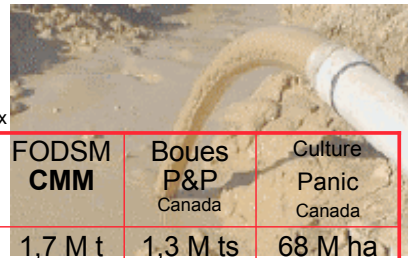
### Réduction GES par DA

- **diminution émissions : ≈ 2 t eCO<sub>2</sub>/tonne FODSM (pour DA à 50%)**
- **déplacement de combustible fossile: 1,8 t eCO<sub>2</sub>/1000 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>**

## TROIS EXEMPLES DE GISEMENT DE BIOMASSE AU CANADA: QUANTITÉS ANNUELLES ET POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE



FODSM: fraction organique déchets solides municipaux



Gisement	FODSM Canada	FODSM CMM	Boues P&P Canada	Culture Panic Canada
Quantité annuelle	12 M t	1,7 M t	1,3 M ts	68 M ha
Fraction considérée	100%	40-76 %	62 % non-incinéré	20% @ 10 th/ha
Siccité	28%	22 à 59%	-	43%
Fraction organique	90%	80-90%	80%	94%
Dégradation	50%	20 à 60%	50%	80%
<b>DA:</b> potentiel génération de méthane (M Nm <sup>3</sup> )	810	52	161	22000
Pot. énergétique (M GJ)	<b>28</b>	<b>1,8</b>	<b>5,6</b>	<b>761</b>
Réduction des GES (M t eCO <sub>2</sub> )	<b>23</b>	<b>1,5</b>	<b>4,5</b>	<b>40</b> déplac. carb. fossile
	÷ enfouissement			

### DA des FODSM : BILAN ÉCONOMIQUE ÉLECTRICITÉ vs GAZ NATUREL - ss/av CRÉDIT C

Pour une tonne de matières résiduelles organique triée

Conversion par DA (%)	50		<b>85</b>
Potentiel en Méthane (Nm <sup>3</sup> /t)	63		107
Électricité générée (kWh/t)	170	—	—
Valeur de vente (\$/kWh)	0,07	—	—
Gaz naturel généré (GJ/t)	—	2,01	3,41
Valeur de vente (\$/GJ)	—	10	10
<b>Revenu de l'énergie produite (\$/t)</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>30</b>
<b>Coût standard enfouissement (\$/t)</b>	<b>40</b>		<b>40</b>
<b>Capital &amp; opération DA (\$/t)</b>	<b>75</b>		<b>85</b>
Réduction GES comparativement enfouissement (t eCO <sub>2</sub> /t)			2,16
Revenu tiré des crédits CO <sub>2</sub> @ 10\$ ton eCO <sub>2</sub> (\$/t)			37
<b>Bénéfice(+)/Déficit(-) (revenus – infrastructure) (\$/t)</b>	<b>-24</b>	<b>-17</b>	<b>+4</b>
			<b>+21</b>

**Coût unitaire de la DA (capital [7 ans] + opération)**

➢ 30 ↔ 270 \$/t ⇒ **75 \$/t** (OWS ↔ Valorga, 50000 tonnes de capacité annuelle)

⇒ **85 \$/t** (avec pré-traitement)



## RECOMMANDATIONS

- Combinaison de substrats pour équilibre des nutriments.
- Utilisation de pré-traitements appropriés, y compris inocula compétents
- Opération contrôlée



- Pour le moment, il y a encore peu d'exemples au Québec
  - Faibles coûts de l'énergie
  - Permissivité/coût  $\cap$  enfouissement
- La digestion anaérobie a besoin de plus de d'incitatifs
  - Primes gouvernementales pour la production d'énergie verte
  - Crédits eCO<sub>2</sub> (transactions à la Bourse du C, et/ou taxes sur le C).
- Digestion anaérobie = alternative pour la valorisation des matières résiduelles de la CMM → à considérer pour des raisons économiques mais aussi pour son impact au niveau du développement durable de la CMM.

©Guiot - APCAS Avr.08 25/26

# MERCI !

**“There should be little doubt that by placing the focus of AD on the production of green energy and clean nutrients, the future of AD will be assured.”**

*W. Verstraete, AD10, Montreal - 2004*

## Questions, commentaires...

**Serge R. Guiot**

Groupe de bio-ingénierie environnementale, CNRC-IRB  
Tél (514) 496-6181  
serge.guiot@cnrc-nrc.gc.ca

**Jean-Claude Frigon**

Groupe de bio-ingénierie environnementale, CNRC-IRB  
(514) 496-6369  
jean-claude.frigon@cnrc-nrc.gc.ca

©Guiot - APCAS Avr.08 26/26