

René Moletta  
coordonnateur

# La méthanisation

3<sup>e</sup> édition



**Lavoisier**  
TEC & DOC

# La méthanisation

## **Chez le même éditeur**

*Écotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures*

A. Picot, F. Montandon, 2013

*Le traitement des déchets*

R. Moletta, 2009

*Les polluants et les techniques d'épuration des fumées : Cas des unités de traitement et de valorisation des déchets. État de l'art*

S. Bicocchi, M. Boulinguez, K. Diard, 2<sup>e</sup> édition, 2009

*Pollution atmosphérique : Des processus à la modélisation*

Collection « Ingénierie et développement durable »

B. Sportisse, 2007

*Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*

Collection « Sciences et techniques agroalimentaires »

R. Moletta, 2<sup>e</sup> édition, 2006

# La méthanisation

3<sup>e</sup> édition

**René Moletta**  
Coordonnateur

*Direction éditoriale* : Fabienne Roulleaux  
*Édition* : Céline Bénard, Solène Le Gabellec  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Couverture* : Isabelle Godenèche  
*Mise en page* : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq  
*Impression* : Chirat, Saint-Just-la-Pendue

© 2015, Lavoisier, Paris

ISBN : 978-2-7430-1991-4

# Sommaire

Liste des auteurs . . . . .	XIII
-----------------------------	------

## Connaissance de la méthanisation

### Chapitre 1

#### La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale

1. La méthanisation . . . . .	3
2. Apport de la méthanisation . . . . .	3
2.1. Dépollution des eaux usées . . . . .	4
2.2. Traitement des déchets . . . . .	4
3. Environnement et énergie . . . . .	5
4. Place de la méthanisation dans les politiques énergétiques de demain . . . . .	5
4.1. Les différentes filières de biocarburants . . . . .	5
4.2. Position de la méthanisation . . . . .	6
5. Conclusion . . . . .	8

### Chapitre 2

#### Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation

1. Les réactions enzymatiques (la biochimie) . . . . .	12
1.1. Les grandes étapes de la digestion anaérobie . . . . .	13
1.2. Les conditions physico-chimiques . . . . .	16
2. Les micro-organismes actifs (la microbiologie) . . . . .	18
2.1. Les méthodes d'investigation . . . . .	18
2.2. La fonctionnalité des micro-organismes impliqués. Qui fait quoi ou qui peut faire quoi ? . . . . .	19
2.3. Diversité des micro-organismes : une vision moléculaire . . . . .	30
3. La vision dynamique (l'écologie) . . . . .	32
4. Effet de la digestion anaérobie sur les germes pathogènes . . . . .	33
4.1. Les paramètres biotiques . . . . .	33
4.2. Les paramètres abiotiques . . . . .	34

### Chapitre 3

#### Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation

1. Principe de fonctionnement des réacteurs de méthanisation . . . . .	39
1.1. Conversion de la matière organique . . . . .	39
1.2. Le potentiel méthanogène . . . . .	41
1.3. Les différents modes de mise en œuvre de la méthanisation . . . . .	42
1.4. Les grandes familles de procédés de méthanisation . . . . .	43

2. Les paramètres opérationnels des réacteurs . . . . .	46
2.1. Quelques définitions . . . . .	46
2.2. Vitesse de la réaction biologique . . . . .	50
3. Les conditions de mise en œuvre des réacteurs . . . . .	50
3.1. pH . . . . .	51
3.2. Alcalinité . . . . .	51
3.3. Acides gras volatils (AGV) . . . . .	51
3.4. DCO . . . . .	51
3.5. Nutriments . . . . .	52
3.6. Débit et composition du biogaz . . . . .	52
4. Stabilité des digesteurs . . . . .	53
4.1. Rôle de l'hydrogène dans le fonctionnement des digesteurs . . . . .	53
4.2. Les surcharges organiques : causes et conséquences . . . . .	54
4.3. Les principaux inhibiteurs de la digestion anaérobie . . . . .	55
5. Démarrage des réacteurs . . . . .	56
5.1. L'inoculation . . . . .	56
5.2. La stratégie de montée en charge . . . . .	58
5.3. Le rendement en méthane : un paramètre de mesure de la formation du biofilm . . . . .	59
5.4. Exemple d'application : démarrage d'un réacteur pilote à lit fixe de 1 m <sup>3</sup> . . .	61

## Législation

### *Chapitre 4*

#### **Aspects législatifs de la digestion anaérobie**

1. La réglementation applicable aux unités de traitement de déchets par méthanisation . . . . .	71
1.1. Les unités de traitement par méthanisation . . . . .	71
1.2. La valorisation du digestat . . . . .	75
1.3. La valorisation du biogaz . . . . .	76
2. Les risques . . . . .	81
3. Annexes . . . . .	81

### *Chapitre 5*

#### **Les aspects Sécurité de la méthanisation**

1. Risques liés à la composition du biogaz . . . . .	85
1.1. Propriétés du biogaz . . . . .	88
1.2. Risques, impacts et nuisances liés au biogaz . . . . .	88
1.3. Risques d'inflammation : explosion, incendie . . . . .	89
1.4. Caractéristiques de toxicité . . . . .	93
1.5. Caractéristiques d'anoxie . . . . .	95
1.6. Impacts sur les équipements : formation de dépôts et corrosion . . . . .	95
1.7. Altération des propriétés physiques des matériaux en PEHD . . . . .	97
2. Retour d'expérience (REX) relatif aux procédés de méthanisation et à leur exploitation . . . . .	98
3. Potentiels de dangers des phénomènes accidentels . . . . .	101
3.1. Analyse des risques . . . . .	101
3.2. Classement de zones ATEX . . . . .	102
3.3. Mesures de sécurité techniques et organisationnelles . . . . .	112

## Stratégies et traitements

### Chapitre 6

#### Technologies de traitement des effluents industriels par la méthanisation

1. Réacteurs biologiques .....	123
1.1. Procédés mettant en œuvre des micro-organismes libres .....	125
1.2. Procédés mettant en œuvre des micro-organismes formant un biofilm .....	127
1.3. Couplage avec un réacteur aérobic .....	132
2. Bases de choix et de dimensionnement des digesteurs anaérobies .....	133
2.1. Choix de la technologie .....	133
2.2. Base de dimensionnement .....	134
2.3. Stabilité des digesteurs .....	135
3. Le biogaz .....	136
3.1. Production théorique .....	136
3.2. Facteurs modifiant les caractéristiques du biogaz .....	137
3.3. Traitement du biogaz .....	137
3.4. Valorisation .....	139
4. Performances des digesteurs anaérobies .....	139
5. Conclusion .....	140

### Chapitre 7

#### Technologies de la méthanisation de la biomasse : déchets ménagers

1. Substrats solides .....	141
1.1. Les ordures ménagères .....	141
1.2. Les résidus agricoles .....	142
1.3. Les sous-produits agro-industriels .....	143
1.4. L'approche territoriale .....	143
1.5. Pérennité des approvisionnements .....	143
2. Stratégies technologiques .....	143
2.1. Réacteurs limites .....	144
2.2. Réacteurs discontinus .....	145
2.3. Méthanisation en une étape ou deux étapes .....	145
2.4. Condition de mise en œuvre de la méthanisation des déchets .....	146
3. Méthanisation de la fraction organique des ordures ménagères .....	148
3.1. Principe du traitement des ordures ménagères (et déchets assimilés) .....	148
3.2. Technologies appliquées à la digestion « liquide » .....	149
3.3. Technologies appliquées à la digestion « sèche » continue .....	150
3.4. Performances des digesteurs sur ordures ménagères .....	152
4. Exemple d'une unité de méthanisation de biodéchets à Engelskirchen (Allemagne) .....	153
4.1. Caractéristiques des déchets .....	156
4.2. Description de l'usine .....	156
4.3. Performances .....	157
4.4. Bilan matière .....	158
4.5. L'investissement .....	158
4.6. La station d'épuration .....	158



## Chapitre 8

### La méthanisation à la ferme

1. Ressources agricoles . . . . .	161
1.1. Matières agricoles méthanisables . . . . .	161
1.2. Potentiel méthanogène des sous-produits agricoles . . . . .	165
2. Technologies . . . . .	166
2.1. Caractéristiques de leurs mises en œuvre . . . . .	166
2.2. Schéma de principe de l'installation d'un digesteur agricole . . . . .	169
2.3. Prétraitements . . . . .	170
2.4. Technologies appliquées à la digestion des déchets agricoles . . . . .	170
3. Préparation des intrants . . . . .	179
3.1. Considération sur les matières à méthaniser . . . . .	179
3.2. Les macro- et micronutriments . . . . .	181
4. Les inhibitions . . . . .	183
4.1. Chutes de pH . . . . .	183
4.2. Inhibition par l'azote ammoniacal . . . . .	183
4.3. L'inhibition par l'hydrogène sulfuré . . . . .	184
4.4. Autres molécules inhibitrices . . . . .	185
5. Modifications rapides de la composition des intrants . . . . .	185
6. Paramètres de suivi des digesteurs . . . . .	185
6.1. Paramètres de la phase liquide . . . . .	185
6.2. Paramètres de la phase gazeuse . . . . .	186
6.3. Paramètres de calcul . . . . .	187
7. Valorisation du biogaz (Solagro) . . . . .	187
8. Performances des digesteurs sur déchets agricoles . . . . .	189
9. Traitement et la valorisation du digestat . . . . .	189
9.1. État des connaissances . . . . .	189
9.2. Modes de traitement du digestat . . . . .	189
9.3. Effets de la méthanisation sur la matière organique . . . . .	191
9.4. Valeur fertilisante . . . . .	192
9.5. Optimiser la valeur fertilisante des déjections d'élevage . . . . .	194
9.6. Impact sur les propriétés biologiques et physiques du sol . . . . .	195
10. Potentiel et stratégies pour la France . . . . .	196
10.1. Les différents « modèles » de la méthanisation agricole . . . . .	196
10.2. Les modèles allemands et danois . . . . .	196
10.3. État des lieux en France en 2013 . . . . .	198
10.4. Quels modèles pour la France ? . . . . .	200
11. Exemple d'application de la digestion anaérobie aux déchets agricoles : installation à la ferme de Petersauach . . . . .	201

## Chapitre 9

### La méthanisation des boues

1. Les paramètres influant sur les performances de la méthanisation des boues . . . . .	207
1.1. Critères d'évaluation des performances . . . . .	207
1.2. La température . . . . .	208
1.3. Le temps de séjour et la charge organique . . . . .	210
1.4. Composition des boues fraîches . . . . .	210
1.5. L'intensité du brassage . . . . .	212
1.6. La régularité de l'alimentation . . . . .	212

2. Les atouts de la digestion anaérobie .....	212
2.1. Les performances optimales de la méthanisation des boues .....	212
2.2. La valorisation matière. ....	213
2.3. La valorisation énergétique. ....	214
2.4. Bilan environnemental et sociétal. ....	217
3. Types et dimensionnement des digesteurs de boues .....	219
4. Conception des digesteurs de boues .....	220
4.1. Brassage des digesteurs .....	220
4.2. Chauffage des digesteurs .....	225
4.3. Forme des digesteurs .....	227
4.4. Démarrage et conduite d'une installation de digestion .....	229
5. Procédés susceptibles d'améliorer les performances de la digestion anaérobie. ...	230
5.1. Prétraitements thermiques. ....	231
5.2. Prétraitements enzymatiques .....	231
5.3. Prétraitements mécaniques .....	231
5.4. Prétraitements par ultrasons .....	232
5.5. Prétraitements chimiques. ....	232

### Chapitre 10

#### L'élimination et la méthanisation des déchets non dangereux en installation de stockage

1. La filière stockage en France, en Europe et dans le monde .....	235
1.1. De la décharge à l'installation de stockage : une filière en pleine mutation ...	235
1.2. Part du stockage parmi les différentes filières de traitement .....	237
2. Caractéristiques techniques des ouvrages de stockage de déchets. ....	238
2.1. Localisation du site et aménagement .....	238
2.2. Barrières de confinement (fond et couverture) .....	239
2.3. L'admission des déchets et la phase d'exploitation .....	241
2.4. Dégradation des déchets stockés .....	243
2.5. Lixiviats .....	248
2.6. Le biogaz .....	251
2.7. Post-exploitation et fin de vie du site .....	253
2.8. Conclusion .....	254
3. Du stockage-confinement au traitement biologique <i>ex situ</i> et <i>in situ</i> .....	255
3.1. Le prétraitement mécano-biologique (PTMB) avant stockage .....	255
3.2. Installations de stockage bioactives .....	260
4. Conclusion .....	265

### Chapitre 11

#### Prétraitements

1. Introduction .....	269
2. Traitements thermiques .....	273
2.1. Application aux boues .....	274
2.2. Application aux résidus solides .....	279
3. Traitements mécaniques .....	281
3.1. Broyage .....	281
3.2. Ultrasons .....	283
3.3. Centrifugation .....	287
3.4. Hautes pressions .....	289
3.5. Champs électriques pulsés .....	291

4. Procédés biologiques . . . . .	291
4.1. Traitements enzymatiques . . . . .	291
4.2. Autres traitements biologiques . . . . .	292
5. Procédés de séparation pour éliminer les composés inhibiteurs . . . . .	293
6. Conclusion . . . . .	294

### *Chapitre 12*

#### **Les applications de la digestion anaérobie**

1. Traitement anaérobie des effluents urbains . . . . .	303
1.1. Introduction . . . . .	303
1.2. Le traitement anaérobie des eaux urbaines comme technologie durable. . . . .	304
1.3. Les réacteurs UASB pour le traitement des eaux usées . . . . .	306
1.4. Post-traitement des effluents des réacteurs UASB des eaux usées municipales . . . . .	311
1.5. Conclusions . . . . .	314
2. Piles à combustible . . . . .	314
2.1. Présentation des différents types de piles à combustible . . . . .	315
2.2. Traitements externes des biogaz issus de la méthanisation . . . . .	318
2.3. Reformage interne (piles à haute température) . . . . .	322
2.4. Exemples de réalisations, prototypes . . . . .	325

### *Chapitre 13*

#### **Suivi analytique des procédés de méthanisation**

1. Importance et nature du suivi analytique . . . . .	331
2. Paramètres analysés . . . . .	333
3. Principes et techniques de mesures . . . . .	335
4. Caractérisation des substrats . . . . .	338
4.1. Caractérisation non spécifique de la matière . . . . .	339
4.2. Composition élémentaire . . . . .	341
4.3. Potentiel méthanogène . . . . .	342
4.4. Essais en laboratoires, essais pilotes . . . . .	344
4.5. Toxicité, excès et carence . . . . .	345
5. Suivi du procédé de digestion anaérobie . . . . .	346
5.1. Caractérisation du milieu de fermentation . . . . .	346
5.2. Suivi analytique de la production de biogaz . . . . .	357
5.3. Caractérisation du digestat . . . . .	360
6. Conclusion . . . . .	363

### *Chapitre 14*

#### **Instrumentation, modélisation et commande des digesteurs**

1. Instrumentation des digesteurs . . . . .	369
1.1. Positionnement du problème . . . . .	369
1.2. Exemples de mesures disponibles sur un digesteur anaérobie . . . . .	373
2. Modélisation par bilan matière de la digestion anaérobie . . . . .	381
2.1. Cinétique biologique de la digestion anaérobie . . . . .	382
2.2. Modélisation bilan matière des réacteurs . . . . .	391
3. Commande des digesteurs . . . . .	402

## Le biogaz

### Chapitre 15

#### Diagnostic « qualité » d'un biogaz en vue de sa valorisation

1. Introduction .....	419
2. Perspectives de développement de la valorisation .....	420
3. Notion de qualité(s) d'un biogaz .....	421
3.1. Intérêt d'une bonne connaissance de la qualité de son biogaz .....	421
3.2. Qualité énergétique d'un biogaz .....	422
3.3. Qualité intrinsèque d'un biogaz en vue de sa valorisation .....	423
4. Problématiques associées à la présence de silicium et de soufre .....	424
4.1. Composés Organiques Volatils Siliciés (COVSi) .....	424
4.2. Composés soufrés .....	432
5. Variabilité de la composition d'un biogaz .....	436
5.1. Variabilité sur le long terme (plusieurs années) .....	437
5.2. Variabilité sur le moyen terme (cas des COVSi) .....	438
5.3. Variabilité sur le court terme (cas du H <sub>2</sub> S et du H <sub>2</sub> O) .....	440
6. Bilan et conclusion .....	441

### Chapitre 16

#### Traitement et valorisation du biogaz issu d'un réacteur anaérobie

1. Composition du biogaz .....	446
2. Intérêt de la valorisation énergétique du biogaz .....	446
3. Les filières de valorisation énergétique du biogaz .....	450
3.1. Stockage du biogaz .....	450
3.2. Prétraitement du biogaz .....	451
3.3. Les principales voies de valorisation du biogaz .....	455
3.4. Critères de rentabilité de la valorisation du biogaz par chaudière ou cogénération .....	461
3.5. Bilan énergétique d'un digesteur anaérobie .....	462
3.6. Consommation électrique .....	463
3.7. Consommation de chaleur .....	464
3.8. Un exemple de valorisation du biogaz : la station Artois Méthanisation ...	464
4. Les principales voies d'enrichissement du biogaz .....	466
4.1. Injection dans le réseau .....	467
4.2. Utilisation du biogaz en GNV .....	467
4.3. Techniques d'enrichissement du biogaz .....	468
4.4. Exemples d'enrichissement de biogaz à Lille : la Step de Marquette-lez-Lille et le CVO de Sequedin .....	478

### Chapitre 17

#### La cogénération

1. Les technologies disponibles .....	483
1.1. Les micro-turbines .....	483
1.2. Les moteurs biogaz .....	484
2. Dimensionner l'installation aux conditions réelles de fonctionnement .....	485
3. La qualité du biogaz .....	485
4. Optimiser les revenus .....	485

5. Maîtriser les coûts d'exploitation .....	486
6. Incertitudes des équipements de mesures .....	487
6.1. Compteur de chaleur .....	487
6.2. Analyseur biogaz en continu .....	487
6.3. Débitmètre biogaz .....	488
6.4. Compteur électrique .....	488
6.5. Calcul des incertitudes .....	488
7. Conclusion .....	488

## Aspects économiques

### *Chapitre 18*

#### L'économie de la méthanisation

1. Introduction .....	493
2. Définition des besoins .....	494
3. Typologies de projet. ....	495
3.1. Agricoles (ou « à la ferme ») .....	495
3.2. Industriels .....	495
3.3. Territoriaux .....	496
4. Investissements .....	496
5. Exploitation. ....	498
5.1. Le compte de résultat .....	498
5.2. Les produits .....	498
5.3. Les charges .....	499
5.4. L'analyse des soldes intermédiaires de gestion .....	500
6. Financement .....	501
7. Structures d'investissement .....	503
Index .....	505

# *Liste des auteurs*

**Thierry Arnaud**

Veolia Environnement, Saint-Maurice

**Sylvaine Berger**

Solagro, Toulouse

**Nicolas Bernet**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Théodore Bouchez**

Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN), Irstea, Antony

**Pierre Buffiere**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Yann Bultel**

Laboratoire d'Électrochimie et de Physicochimie des matériaux et des interfaces, Institut Polytechnique, Saint-Martin-d'Hères

**Patricia Camacho**

Suez-Environnement, Le Pecq

**Hélène Carrere**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Olivier Chapleur**

Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN), Irstea, Antony

**Vincent Chatain**

Laboratoire Génie civil et Ingénierie environnementale, INSA, Lyon

**Club Biogaz ATEE**

Arcueil

**Christian Couturier**

Solagro, Toulouse

**Romain Cresson**

INRA Transfert Environnement, Narbonne

**Marina Denat**

INRA Transfert Environnement, Narbonne

**Jacques Fouletier**

Laboratoire d'Électrochimie et de Physicochimie des matériaux et des interfaces, Université Joseph Fourier, Saint-Martin-d'Hères

**Hélène Fruteau de Laclos**

Methaconsult, Prévèrenge, Suisse

**Sébastien Evanno**

INERIS, Verneuil-en-Halatte

**Samuel Georges**

Laboratoire d'Électrochimie et de Physicochimie des matériaux et des interfaces, Université Joseph-Fourier, Saint-Martin-d'Hères

**Patrick Germain**

Laboratoire de Génie civil et d'Ingénierie environnementale, INSA, Lyon

**Jean-Jacques Godon**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Orane Gricourt**

Veolia Environnement, Saint-Maurice

**Xavier Joly**

GASEO, Le Bourget-du-Lac

**Jean-Marie Klein**

Laboratoire du Stockage électrochimique, CEA GRENOBLE – INES, Le Bourget-du-Lac

**Éric Latrille**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Hélène Métivier-Pignon**

Laboratoire Génie civil et Ingénierie environnementale, INSA, Lyon

**René Moletta**

Moletta Méthanisation, Novalaise

**Adalberto Noyola**

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

**Claude Prevot**

DEGREMONT, Rueil-Malmaison

**Jean-Philippe Steyer**

Laboratoire de Biotechnologie de l'environnement – INRA, Narbonne

**Lionel Tricot**

Rhônealpenénergie-Environnement (RAEE), Villeurbanne

**Willy Verstraete**

LabMET, Université de Gand, Belgique

# *Préface de la troisième édition*

## *Docteur Jekyll et Mister Hyde*

Alessandro Volta, à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, remarque « l'air inflammable des marais, un air qui brûle très lentement avec une belle flamme bleue ». Plus tard appelé « méthane », cet « air » provient de la décomposition de la matière organique par une communauté microbienne complexe, en l'absence d'oxygène. La production de méthane – la méthanisation – se rencontre naturellement dans les marais, les lacs, comme dans les intestins des animaux et de l'homme, et même peut-être sur... Mars, si cette découverte récente était confirmée.

Docteur Jekyll et Mister Hyde...

Ce processus naturel connaît aujourd'hui une nouvelle importance environnementale, du fait du rôle négatif du méthane comme gaz à effet de serre, mais aussi une nouvelle importance énergétique, car il peut se transformer en alternative positive aux énergies fossiles.

C'est la maîtrise du processus de méthanisation qui permet d'envisager tous les développements positifs liés par exemple à l'élimination des déchets et des résidus organiques que sont les ordures ménagères résiduelles ou les déchets agricoles. Optimiser les technologies de méthanisation des résidus solides, c'est s'offrir une voie originale de production d'énergie : le biogaz produit, constitué principalement de méthane et de gaz carbonique, peut alors être valorisé à travers diverses filières énergétiques.

Les auteurs de cet ouvrage ont développé une expertise incontestable dans ce domaine. Ils se sont attachés à la compréhension, à la modélisation et au comportement des écosystèmes microbiens complexes associés aux systèmes de dépollution. À cet égard, la description de la diversité structurelle et fonctionnelle de ces écosystèmes constitue un préalable indispensable pour fonder de nouvelles pistes de traitement biologique des effluents et des résidus solides. Ces recherches, couplées aux approches de génie microbiologique, de génie des procédés et de génie automatique, sont à la base du développement, sous contraintes économique et environnementale, de nouveaux bioprocédés de traitement dont l'intérêt est incontestable dans le contexte actuel.



La filière méthanisation des matières solides (coproduits ou déchets) s'est largement développée en France et la stratégie française, fondée principalement sur l'exploitation des gisements de matières organiques déjà présents sur une exploitation ou sur un territoire, a conduit à des adaptations technologiques et à des organisations spécifiques.

Cet ouvrage aborde toutes les facettes de la méthanisation des résidus et des technologies, et présente les acteurs associés. Au-delà des informations les plus récentes qu'il apporte, ce livre pourra emmener le lecteur averti, comme celui qui souhaite comprendre les questions du moment, dans un espace où la technique cède la place à la réflexion et à l'imagination. Ce n'est pas le moindre mérite de cette contribution académique coordonnée par l'expert incontestable du sujet qu'est René Moletta.

Qu'il soit vivement remercié, comme l'ensemble des rédacteurs de cet ouvrage, pour nous avoir fourni cette très utile synthèse des connaissances sur un sujet désormais prioritaire pour l'efficacité environnementale et énergétique, locale et globale.

Marion GUILLOU  
*Présidente d'Agreenium*

# *Introduction*

*René Moletta*

La réalisation de la troisième édition de cet ouvrage sur la méthanisation montre l'importance de cette filière et de l'intérêt qui lui est porté. Nous devons faire face à une crise énergétique annoncée, à des problèmes d'élimination des déchets et à une pénurie d'eau (notamment potable) perceptible également dans des zones qui, auparavant, étaient épargnées par ce problème. Il faudra chercher et trouver des solutions adaptées qui contribueront à répondre partiellement ou totalement à ces besoins.

La méthanisation apporte des solutions élégantes pour contribuer à la gestion de ces problèmes.

La méthanisation est un **processus naturel** que l'homme cherche à comprendre, à domestiquer, pour le faire fonctionner plus vite, avec de meilleurs rendements, et répondre à des fonctions bien précises comme la transformation de la matière organique sous forme solide ou soluble, pour produire de l'énergie !

Dans le domaine industriel, le traitement des effluents par méthanisation a été appliqué dans de nombreux pays. C'est aussi le cas en France, notamment dans les industries agroalimentaires.

Dans la filière déchets, en général, les grands pays européens autres que la France ont largement appliqué la méthanisation, qui a été un élément important de leur politique d'énergies renouvelables. Cela s'est traduit, par exemple, par de nombreuses implantations de production de « biogaz », dans des fermes en Allemagne notamment, ou dans d'autres pays comme le Danemark, l'Italie, le Royaume-Uni...

Le relèvement du prix de l'achat de « l'énergie issue du biogaz » en 2006 en France a relancé l'intérêt de ce type de traitement pour les déchets. Ceci a créé un marché important et un regain d'intérêt pour ce processus. Il s'applique aussi bien via de grosses unités que via des unités de taille plus modeste, voire au niveau des fermes uniquement.

## Objectif de l'ouvrage

L'objectif de cet ouvrage est d'apporter une vision aussi globale que possible sur les connaissances actuelles dans le domaine de la méthanisation de la matière organique. Il aborde non seulement les connaissances de base, les applications industrielles et agricoles, mais aussi les différentes « niches » dans lesquelles ce processus peut trouver sa place pour apporter ou contribuer à des solutions.

C'est dans les domaines de la protection de l'environnement et de la production d'énergie que la méthanisation apporte sa contribution la plus significative et c'est donc dans ces domaines que l'on trouvera le plus grand nombre d'exemples industriels et agricoles.

Le niveau universitaire a été choisi comme guide.

Cet ouvrage servira aussi d'élément de réflexion et d'information pour l'ingénieur qui aura à faire des choix stratégiques et technologiques pour gérer les rejets de son usine. Il est donc également destiné à être un outil d'aide à la décision.

## Structure de l'ouvrage

L'ouvrage est divisé en cinq parties regroupant dix-huit chapitres.

La première partie est orientée vers la connaissance du processus.

Le chapitre 1 s'intéresse au positionnement de la méthanisation et à la pertinence des réponses qu'elle peut apporter dans un contexte de développement durable.

Par sa spécificité et ses performances, elle permet non seulement d'économiser de l'énergie pour éliminer la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène (DBO) des effluents par exemple (si on la compare aux boues activées), et ceci avec une plus grande rapidité tout en produisant de l'énergie sous forme de méthane.

L'homme, ici, n'a rien inventé et n'a fait que copier la nature.

Les chapitres suivants concernent la connaissance du processus. Le chapitre 2 aborde les aspects biochimiques et microbiologiques qui le régissent. Le chapitre 3 décrit les problèmes et les caractéristiques de sa mise en œuvre par l'homme.

La deuxième partie est consacrée à la législation et à la sécurité. Le chapitre 4 aborde tout d'abord les aspects législatifs liés à la mise en œuvre de cette technologie. Dans le domaine de l'environnement, la réglementation oriente les marchés, donc le développement, et les applications techniques. Les dispositions de sécurité se devaient d'être traitées ici. C'est chose faite dans cette édition.

La troisième partie est dédiée aux stratégies et aux traitements des effluents et des déchets.

Le chapitre 5 aborde la technologie des digesteurs pour le traitement des effluents industriels. Dans ce domaine, l'imagination humaine a été fertile. Les technologies sont variées et performantes. Il est regrettable de ne pas voir de plus nombreuses applications dans ce domaine puisque l'on compte moins de 100 digesteurs implantés en France pour traiter les effluents industriels. Ce n'est pas mieux dans les autres pays européens.

Les déchets organiques sont aussi traités par méthanisation. Dans ce domaine, les technologies sont, pour l'instant, en général plus classiques. Le chapitre 7 intègre l'aspect traitement des ordures ménagères, tandis que la méthanisation dite à la ferme et le traitement des boues de station d'épuration font l'objet de deux chapitres distincts, le 8 et le 9. Si, d'une manière générale, c'est souvent l'aspect environnemental qui incite les décideurs à aller vers la méthanisation, il n'en est pas de même dans le domaine agricole. Les agriculteurs peuvent, le plus souvent, retourner leurs déchets au sol. S'ils choisissent la méthanisation, c'est parce qu'ils y ont un intérêt économique. Ils se transforment en producteurs d'énergie, et en créateurs d'emplois lorsque l'économie du projet le permet.

La méthanisation des boues des stations d'épuration aérobies est un grand classique en France. La qualité des boues s'est nettement améliorée grâce au traitement des métaux à la source. On voit donc apparaître l'implantation de digesteurs sur des stations d'épuration urbaines de plus en plus petites (25 000 EH).

La méthanisation des déchets non dangereux en installation de stockage est un système extensif de traitement de déchets (chapitre 10). Dans ce domaine, la durée de vie de ces sites s'est considérablement réduite via la recirculation des lixiviats. Cette filière de traitement reste d'actualité, même si on cherche toujours à valoriser au mieux la matière organique.

Un traitement biologique ne se présente jamais seul ! Il a des acolytes comme les traitements physico-chimiques qui viennent compléter et améliorer les performances du traitement global ; ceci est décrit dans le chapitre 11. Ces prétraitements conditionnent le potentiel de récupération de la matière. Il y a très certainement beaucoup d'effort à faire dans ce domaine (pour les matières solides) pour améliorer les rendements tout en gardant des temps de séjour compatibles avec les exigences économiques.

Le chapitre 12 nous présente en premier un domaine méconnu dans les pays développés : la méthanisation des effluents urbains. Celle-ci n'est pas adaptée à nos régions, mais elle a une importance économique non négligeable en pays chauds. Le second domaine est la production d'électricité grâce à des piles à combustible. Pour ces piles, on parle beaucoup d'hydrogène, mais le méthane qui est produit plus facilement à partir des déchets organiques a également sa place comme source d'énergie de départ.

Nous avons choisi d'introduire un chapitre sur les techniques analytiques utilisées en méthanisation. Cet aspect reste extrêmement important pour savoir comment est obtenue une valeur et donc ce qu'elle signifie. Nous avons vu partir des analyses de France vers l'Allemagne pour faire des mesures de... pH ! Des stages de formation de techniques de base pour exploitant de digesteur sont maintenant disponibles en France.

Il ne serait pas possible de parler méthanisation sans aborder les aspects automatisations et modélisations. Ceci est fait dans le chapitre 14. C'est un domaine qui peut et qui doit apporter beaucoup à l'amélioration des caractéristiques de mises en œuvre de la méthanisation. Cette voie doit nous permettre de multiplier par deux ou trois les quantités de matière organique des effluents traitées dans les digesteurs, tout en conservant la fiabilité de sa mise en œuvre.

La quatrième partie est dédiée au biogaz. Dans un premier temps, nous aborderons dans le chapitre 15 la problématique de valorisation du biogaz.

Un long chapitre (chapitre 16) est consacré aux valorisations. C'est bien entendu un aspect fondamental qui voit apparaître de nouvelles techniques ouvrant les portes à de nouvelles applications. Actuellement, la valorisation la plus largement utilisée est la production d'électricité par cogénération ; c'est pourquoi un chapitre lui est consacré (chapitre 17).

Parler technique sans parler de coût ne sert que peu le développement d'une filière. C'est pourquoi la cinquième partie (chapitre 18) est consacrée à l'économie de la méthanisation.

## Limite de l'ouvrage

Comme cela a été indiqué précédemment, cet ouvrage présente l'état de la méthanisation à un instant donné. Il n'a pas vocation à être exhaustif, mais à identifier certains aspects importants qui construisent cette filière.

La législation et les procédures évoluent. Le lecteur ne trouvera ici qu'une première approche et il aura le souci, en cas de besoin, de rechercher l'information souhaitée dans des documents plus spécialisés. Les techniques, en revanche, évoluent moins vite dans leurs principes, mais leur mise en œuvre s'enrichit constamment, soit au niveau des applications, soit au niveau des technologies.

Nous espérons que cet ouvrage contribuera à être une source d'information, un élément supplémentaire pour la réflexion et pour l'imagination.

Certains chapitres de la deuxième édition ont été supprimés, non pas, parce qu'ils manquaient d'intérêt, mais pour faire de la place à de nouveaux développements. Nous conseillons aux personnes intéressées par les émissions de méthane dans le milieu naturel, le traitement des composés traces organiques, la

mise en œuvre de piles microbiennes ou les microorganismes présents dans le biogaz par exemple de se référer à la seconde édition pour avoir plus d'information sur ces thèmes.

La méthanisation est et sera un élément structurel significatif pour la bonne gestion de l'impact des hommes sur la planète.

Ce livre est dédié à la mémoire de Claude Flanzy qui nous a quittés en 2014.

Œnologue réputé, Claude Flanzy a été directeur de Recherche à l'INRA et chef du département chargé de l'agronomie et de l'environnement. Il a su voir très vite les potentialités de la méthanisation sur l'amélioration de la qualité de notre environnement et dans les années 1990, ce n'était pas tellement commun en France. Grâce à lui, le Laboratoire de biotechnologie de l'environnement de l'INRA à Narbonne a pu se développer via de nouveaux locaux et un personnel INRA qui est passé de 6 à 28 membres permanents. Tous étaient focalisés sur la recherche dans les différentes sciences qui permettaient de développer la connaissance et l'application de la méthanisation. C'est ce qui a permis à la France d'être présente au plus haut niveau sur la scène internationale.

C'était aussi un homme bon, juste, honnête, un humaniste qui enrichissait ceux qui l'ont côtoyé.