

# Sommaire

Préface.....	XIX
Avant-propos.....	XXI
In Memoriam.....	XXIII
Abréviations et acronymes.....	XXV

## Chapitre 1

### La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale

*René Moletta, Willy Verstraete*

1. La méthanisation.....	1
2. Apport de la méthanisation.....	1
2.1. Dépollution des eaux usées.....	2
2.2. Traitement des déchets.....	2
3. Environnement et énergie.....	3
4. Place de la méthanisation dans les politiques énergétiques de demain.....	4
4.1. Les différentes filières des biocarburants.....	4
4.2. Position de la méthanisation.....	5
4.3. AD et la chaîne de valeur alimentaire.....	7
5. Regard vers l'avenir.....	7
6. Conclusion.....	9

## Chapitre 2

### Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation

*Jean-Jacques Godon*

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. La microbiologie.....	17
2.1. La description et les méthodes d'investigation.....	17
2.2. La diversité.....	18
2.3. D'où viennent les microbes de la digestion anaérobie ?.....	18
2.4. Qui fait quoi ?.....	19
2.5. La dynamique et l'écologie.....	20
2.6. Le pilotage.....	20

### Chapitre 3

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

*Nicolas Bernet, Pierre Buffière*

1. Principe de fonctionnement des réacteurs de méthanisation .....	23
1.1. Conversion de la matière organique .....	23
1.2. Le potentiel méthanogène .....	25
2. Les procédés de méthanisation .....	26
2.1. Réacteurs agités continus en voie humide .....	26
2.2. Réacteur agités continus en voie épaisse .....	27
2.3. Réacteurs non agités ou discontinus .....	28
2.4. Réacteurs pour le traitement d'effluents liquides .....	28
2.5. La température .....	30
3. Les paramètres opérationnels des réacteurs .....	31
3.1. Paramètres de dimensionnement .....	31
3.2. Caractérisation des performances .....	32
4. Les paramètres de suivi des réacteurs .....	33
4.1. pH et alcalinité .....	33
4.2. Acides gras volatils .....	34
4.3. Demande chimique en oxygène .....	34
4.4. Nutriments .....	34
4.5. Débit et composition du biogaz .....	35
5. Stabilité et dysfonctionnement des digesteurs .....	35
5.1. Surcharges organiques et acidoses .....	35
5.2. Rôle de l'hydrogène dans le fonctionnement des digesteurs .....	36
5.3. Toxicité et inhibitions .....	36
5.4. Problèmes liés au brassage .....	38
6. Démarrage des réacteurs .....	38
6.1. L'inoculation .....	39
6.2. La stratégie de montée en charge .....	40
6.3. Le rendement en méthane : un paramètre de mesure de la formation du biofilm .....	43

### Chapitre 4

#### Aspects législatifs et réglementaires de la méthanisation

*Marie Verney*

1. La réglementation applicable aux installations de méthanisation .....	49
1.1. Les installations de méthanisation .....	49
1.2. La rubrique 2781 des installations classées pour la protection de l'environnement .....	50
1.3. La valorisation du digestat .....	61
1.4. La valorisation du biogaz .....	63
2. Les risques .....	72
3. Annexes .....	72
3.1. Encart Club Biogaz .....	72
3.2. Liste des textes réglementaires (disponibles sur <a href="http://www.legifrance.gouv.fr">www.legifrance.gouv.fr</a> ) ...	74

## Chapitre 5

### Les aspects sécurité de la méthanisation

*Sébastien Evanno*

1. Risques liés à la composition du biogaz .....	77
1.1. Propriétés du biogaz .....	80
1.2. Risques, impacts et nuisances liés au biogaz .....	80
1.3. Risques d'inflammation : explosion, incendie .....	81
1.4. Caractéristiques de toxicité .....	85
1.5. Caractéristiques d'anoxie .....	87
1.6. Impacts sur les équipements : formation de dépôts et corrosion .....	88
1.7. Altération des propriétés physiques des matériaux en PEHD .....	89
2. Retour d'expérience (REX) relatif aux procédés de méthanisation et à leur exploitation .....	90
2.1. Émission accidentelle d'H <sub>2</sub> S notamment dans les fosses de mélanges des déchets .....	91
2.2. Débordement du méthaniseur .....	92
2.3. Gel des soupapes du méthaniseur .....	92
2.4. Surpression interne à l'intérieur du méthaniseur .....	92
2.5. Envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel .....	92
3. Potentiels de dangers des phénomènes accidentels .....	94
3.1 Analyse des risques .....	94
3.2. Classement de zones ATEX .....	95
3.3. Mesures de sécurité techniques et organisationnelles .....	105

## Chapitre 6

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

*René Moletta*

1. Réacteurs biologiques .....	113
1.1. Procédés mettant en œuvre des micro-organismes libres .....	115
1.2. Procédés mettant en œuvre des micro-organismes formant un biofilm .....	117
1.3. Couplage avec un réacteur aérobie .....	122
2. Les bases de choix et de dimensionnement des digesteurs anaérobies .....	124
2.1. Choix de la technologie .....	124
2.2. Base de dimensionnement .....	125
2.3. Stabilité des digesteurs .....	125
3. Le biogaz .....	126
3.1. Production théorique .....	126
3.2. Facteurs modifiant les caractéristiques du biogaz .....	128
3.3. Traitement du biogaz .....	128
3.4. Valorisation .....	129
4. Performances des digesteurs anaérobies .....	130
5. Conclusion .....	130

*Chapitre 7***Technologies de la méthanisation de la biomasse***Hélène Fruteau de Laclos*

1. Les nouveaux déchets ménagers . . . . .	133
1.1. Les biodéchets . . . . .	133
1.2. Les ordures ménagères résiduelles . . . . .	136
2. Stratégies technologiques et conditions de mise en œuvre . . . . .	136
2.1. Tris préalables . . . . .	137
2.2. Les technologies infiniment mélangées liquides ou CSTR . . . . .	138
2.3. Les technologies à cheminement piston en milieu pâteux . . . . .	139
2.4. Les technologies en discontinu « sec » . . . . .	142
2.5. Les technologies en deux étapes . . . . .	144
2.6. Paramètres de fonctionnement . . . . .	144
2.7. Rendements en biogaz . . . . .	146
3. Points d'attention et facteurs de progrès . . . . .	146
3.1. Inhibition par l'ammoniac . . . . .	146
3.2. Rhéologie et répartition de l'eau . . . . .	148
3.3. Problématique de l'hygiénisation . . . . .	148
3.4. Valorisation des digestats . . . . .	148

*Chapitre 8***Méthanisation des boues de STEP***Éric Guibelin*

1. La digestion dans les filières de traitement des boues . . . . .	151
1.1. Intérêt de la digestion des boues . . . . .	151
1.2. Limites . . . . .	152
2. Principes de la digestion anaérobie des boues . . . . .	154
2.1. Les voies métaboliques . . . . .	154
2.2. Bilans masse et énergie ; performances de la digestion . . . . .	155
2.3. Hygiénisation . . . . .	159
3. Mise en œuvre de la digestion (conception) . . . . .	159
3.1. Préparation de la boue . . . . .	160
3.2. Digestion : digesteur primaire et « secondaire » (stockeur) . . . . .	161
3.3. Circuit biogaz . . . . .	166
4. Traitements avancés . . . . .	168
4.1. Prétraitements – lyse thermique . . . . .	168
4.2. Co-digestion . . . . .	170
4.3. Traitement des retours . . . . .	171
5. Exploitation des digesteurs . . . . .	172
5.1. Exploitation courante ; mise en route et vidange . . . . .	172
5.2. Problèmes rencontrés : moussage, dépôts minéraux, polluants biogaz . . . . .	174

*Chapitre 9***Instrumentation, modélisation et commande des digesteurs***Lorraine Awhangbo, Alexandre Mallet, Cyrille Charnier,  
Éric Latrille et Jean-Philippe Steyer*

1. Instrumentation des digesteurs . . . . .	179
1.1. Positionnement du problème . . . . .	179

1.2. Exemples de mesures disponibles sur un digesteur anaérobie . . . . .	184
2. Modélisation par bilan matière de la digestion anaérobie . . . . .	197
2.1. Complexité des modèles . . . . .	197
2.2. Équilibres physico-chimiques et cinétique de méthanisation . . . . .	200
2.3. Le modèle ADM1 de l'IWA . . . . .	202
3. Commande des digesteurs . . . . .	204
3.1. Régulation et commande . . . . .	204
3.2. Solutions logicielles pour un pilotage 2.0 des digesteurs . . . . .	209

### Chapitre 10

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

*Théodore Bouchez et Olivier Chapleur*

1. La filière stockage en France, en Europe et dans le monde . . . . .	217
1.1. Comment l'installation de stockage a peu à peu remplacé la décharge . . . . .	217
1.2. Part du stockage parmi les différentes filières de traitement . . . . .	219
2. Caractéristiques techniques des ouvrages de stockage de déchets . . . . .	220
2.1. Localisation du site et aménagement . . . . .	220
2.2. Les barrières de confinement (fond et couverture) . . . . .	221
2.3. L'admission des déchets et la phase d'exploitation . . . . .	223
2.4. La dégradation des déchets stockés . . . . .	223
2.5. Les lixiviats . . . . .	230
2.6. Le biogaz . . . . .	233
2.7. La post-exploitation et la fin de vie du site . . . . .	235
2.8. Conclusion . . . . .	236
3. Du stockage-confinement au traitement biologique <i>ex situ</i> et <i>in situ</i> . . . . .	237
3.1. Le prétraitement mécano-biologique (PTMB) avant stockage . . . . .	237
3.2. Les installations de stockage bioactives . . . . .	242

### Chapitre 11

#### Prétraitements des intrants en méthanisation

*Hélène Carrère, Florian Monlau, Pascal Peu*

1. Les boues d'épuration . . . . .	253
1.1. Hydrolyse thermique . . . . .	253
1.2. Ultrasons . . . . .	256
1.3. Hautes pressions . . . . .	258
1.4. Désintégration électrocinétique . . . . .	258
2. Les sous-produits animaux, les déchets alimentaires et FFOM . . . . .	259
3. Ressources agricoles et biomasses lignocellulosiques . . . . .	261
3.1. Les biomasses facilement biodégradables . . . . .	261
3.2. Les biomasses difficilement biodégradables . . . . .	261
4. Les pistes offertes par la recherche . . . . .	266
4.1. Les nouveaux intrants . . . . .	266
4.2. Nouvelles technologies de prétraitements . . . . .	267
5. Conclusion . . . . .	270

## Chapitre 12

### La méthanisation agricole

*Sylvaine Berger, Christian Couturier, René Moletta*

1. Historique, contexte et potentiel de la méthanisation rurale . . . . .	275
1.1. Définitions : méthanisation « agricole » ou « rurale » ? . . . . .	275
1.2. Les différents « modèles » de la méthanisation agricole ou rurale . . . . .	275
1.3. Modèles allemands et danois. . . . .	276
1.4. État des lieux en France en 2020 . . . . .	279
1.5. Quels modèles pour la France ? . . . . .	280
2. Ressources agricoles . . . . .	282
2.1. Matières agricoles méthanisables . . . . .	282
2.2. Potentiel méthanogène des sous-produits agricoles. . . . .	286
3. Technologies et mise en œuvre des digesteurs agricoles . . . . .	288
3.1. Caractéristiques de leurs mises en œuvre . . . . .	288
3.2. Méthanisation agricole en fermentation humide . . . . .	289
3.3. Digesteurs à fermentation sèche. . . . .	295
3.4. Aspects biologiques des méthanisations agricoles . . . . .	296
3.5. Paramètres de suivi des digesteurs . . . . .	302
4. Méthanisation et agronomie. . . . .	303
4.1. Effets de la méthanisation sur la matière organique. . . . .	304
4.2. Valeur fertilisante . . . . .	306
4.3. Les modes de traitement du digestat . . . . .	309

## Chapitre 13

### Méthanisation et gestion des odeurs

*Jean-Louis Fanlo*

1. Contexte général . . . . .	313
2. De l'odeur à la gêne olfactive . . . . .	314
2.1. Aspects physiologiques de l'olfaction . . . . .	315
2.2. Aspects psychologiques de l'olfaction . . . . .	316
2.3. La perception de l'odeur . . . . .	316
2.4. De l'odeur à la nuisance odorante et à la gêne olfactive . . . . .	320
2.5. Odeurs et toxicité . . . . .	320
3. Mesurer les odeurs, les composés odorants et évaluer leur l'impact. . . . .	321
3.1. Le prélèvement des gaz odorants . . . . .	322
3.2. Caractériser l'odeur : les mesures olfactométriques . . . . .	324
3.3. Caractériser les composés odorants et non odorants : les mesures physicochimiques . . . . .	329
3.4. Évaluer la nuisance, apprécier la gêne . . . . .	334
4. Les sources d'odeurs en méthanisation . . . . .	339
5. Stratégie de gestion d'un problème d'odeur. . . . .	341
5.1. L'audit : l'inventaire des sources à étudier . . . . .	343
5.2. Le diagnostic olfactométrique : la hiérarchisation des sources d'odeur . . . . .	343
5.3. Le diagnostic aéraulique : le captage les émissions. . . . .	345
5.4. Le diagnostic physicochimique : l'identification et la quantification des composés odorants . . . . .	346
5.5. Choix et mise en œuvre des solutions. . . . .	346
5.6. Vérification de l'efficacité : analyses olfactométriques, études d'impact . . . . .	347

6. Réduction de l'impact odorant : action à la source, procédés de traitement et de réduction de la nuisance . . . . .	347
6.1. Les mesures préventives : l'action à la source . . . . .	348
6.2. Le contrôle de la dispersion des émissions odorantes . . . . .	350
6.3. Les mesures curatives : les procédés de traitement . . . . .	353
6.4. L'action sur la nuisance : les masquants et neutralisants . . . . .	364
6.5. Critères de choix des procédés . . . . .	365

### Chapitre 14

#### La valorisation agricole des digestats

*Sabine Houot, Florent Levavasseur*

1. Diversité des digestats . . . . .	377
2. Valeur fertilisante azotée . . . . .	380
3. Volatilisation de $\text{NH}_3$ et levier pour éviter les pertes . . . . .	385
4. Pertes d'azote par lixiviation du nitrate . . . . .	387
5. Valeur amendante à long terme et stockage de C . . . . .	388
6. Émission de $\text{N}_2\text{O}$ . . . . .	391
7. Valeur fertilisante, potassium et phosphore . . . . .	392
8. Effet sur les propriétés physiques des sols . . . . .	392
9. Effet sur la biologie du sol . . . . .	393
10. À l'échelle des systèmes de culture . . . . .	395
11. Conclusion . . . . .	396

### Chapitre 15

#### Aspects sanitaires de la méthanisation

*Nathalie Wéry, Anne-Marie Pourcher*

1. Contexte . . . . .	403
2. Micro-organismes d'intérêt sanitaire présents dans les intrants . . . . .	404
2.1. Micro-organismes pathogènes . . . . .	404
2.2. Micro-organismes indicateurs . . . . .	406
2.3. Méthodes de recherche et de dénombrement . . . . .	407
2.4. Spécificités des intrants . . . . .	411
3. Impact du procédé de méthanisation sur les indicateurs et sur les agents pathogènes . . . . .	412
3.1. Inactivation des micro-organismes . . . . .	413
3.2. Conséquences des paramètres opérationnels . . . . .	418
3.3. Processus induisant l'inactivation . . . . .	420
4. Dynamique des BIET et des pathogènes sur la filière de méthanisation . . . . .	427
4.1. Conséquences des post-traitements . . . . .	427
4.2. Pasteurisation en prétraitement . . . . .	429
4.3. Recontamination/Recroissance . . . . .	432
5. Prise en compte de l'aspect sanitaire dans la réglementation associée aux digestats . . . . .	433
6. Conclusion et perspectives . . . . .	437

## Chapitre 16

### Suivi analytique des méthaniseurs

*Romain Cresson, Marina Moletta-Denat*

1. Objectifs et nature du suivi .....	449
1.1. Quels paramètres analyser à chaque étape du procédé .....	451
1.2. Études en laboratoires et essais pilotes .....	453
2. Analyse des substrats .....	454
2.1. Caractéristiques générales des substrats et impacts sur le procédé de méthanisation .....	454
2.2. Composition des substrats et effets sur le processus de méthanisation .....	458
3. Suivi analytique du digesteur .....	462
3.1. Caractéristiques du milieu de fermentation .....	462
3.2. Production de biogaz .....	472
3.3. Caractéristiques du digestat .....	476

## Chapitre 17

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

*Thierry Arnaud*

1. Composition du biogaz .....	482
2. Intérêt de la valorisation énergétique du biogaz .....	482
3. Les filières de valorisation énergétique du biogaz .....	484
3.1. Le stockage du biogaz .....	484
3.2. Le prétraitement du biogaz .....	485
3.3. Les principales voies de valorisation du biogaz .....	490
3.4. Critères de rentabilité de la valorisation du biogaz par chaudière ou cogénération .....	495
3.5. Le bilan énergétique d'un digesteur anaérobie .....	496
3.6. La consommation électrique .....	496
3.7. La consommation de chaleur .....	497
Un exemple de valorisation du biogaz : la station Artois Méthanisation .....	498
4. Les principales voies d'enrichissement du biogaz .....	500
4.1. L'injection dans le réseau .....	500
4.2. L'utilisation du biogaz en GNV .....	500
4.3. Les techniques d'enrichissement du biogaz .....	501

## Chapitre 18

### Injection du biométhane dans les réseaux gaz

*Sylvain Frédéric*

1. Les réseaux de gaz en France .....	509
1.1. Définition de « biométhane » pouvant être injecté dans les réseaux de gaz .....	509
2. Les procédés de purification du biogaz en biométhane .....	510
2.1. Le procédé de lavage à l'eau (absorption) .....	510
2.2. Le procédé « pressure swing adsorption » (PSA, adsorption) .....	510
2.3. Le procédé membranaire (perméation) .....	511
2.4. Le lavage aux amines .....	511
2.5. La cryogénie .....	511
3. Qualité du biométhane pour être injecté dans les réseaux .....	512

4. L'état des lieux en France de l'injection de biométhane . . . . .	513
5. Les perspectives du biométhane en France . . . . .	516

### Chapitre 19

#### Nouvelles technologies

##### Production de biohydrogène et biomolécules par fermentation microbienne : vers le développement de voies de valorisation complémentaires aux filières de méthanisation

*Éric Trably, Pierre Fontanille, Nicolas Bernet*

1. Micro-organismes et voies métaboliques de fermentation H <sub>2</sub> . . . . .	521
1.1. Les bactéries productrices d'hydrogène . . . . .	521
1.2. Production d'hydrogène en cultures mixtes et micro-organismes reconsommateurs d'H <sub>2</sub> . . . . .	522
2. Conduite de procédés (conditions opératoires + inhibiteurs) . . . . .	523
2.1. Sources et préparation des inocula microbiens . . . . .	523
2.2. Paramètres opératoires de la production d'hydrogène par fermentation . . . . .	523
3. Couplage de procédés . . . . .	525
4. Conclusion . . . . .	526

##### Apport des procédés électrochimiques microbiens à la méthanisation

*Nicolas Bernet, Élie Desmond-Le Quémener, Éric Trably*

1. Bactéries électro-actives et principe des systèmes bio-électrochimiques . . . . .	528
1.1. Micro-organismes électrogènes . . . . .	528
1.2. Micro-organismes électrotrophes . . . . .	529
1.3. Transfert interespèces d'électrons . . . . .	529
1.4. Les biopiles (MFC) et électrolyseurs microbiens (MEC) . . . . .	530
2. MEC pour la production d'hydrogène . . . . .	530
2.1. Principe de fonctionnement . . . . .	530
2.2. Application des MEC pour la production d'hydrogène . . . . .	532
3. MEC pour la production de méthane . . . . .	533
3.1. Principe de fonctionnement . . . . .	533
3.2. Application des MEC pour la production de méthane . . . . .	534
4. Amélioration de la méthanisation par stimulation du DIET . . . . .	534
4.1. Utilisation de matériaux conducteurs . . . . .	534
4.2. Le cas du biochar . . . . .	535
4.3. Autres pistes pour stimuler le DIET . . . . .	535

#### La méthanation biologique

*Renaud Escudié, Yan Rafrafi, Julie Figueras, Sébastien Pommier, Pierre Buffière, Claire Dumas, Jean-Philippe Delgenès*

1. Contexte de la méthanation . . . . .	539
1.1. Définition . . . . .	539
1.2. La voie catalytique ou thermochimique . . . . .	539
1.3. La méthanation biologique . . . . .	540
1.4. Spécificités et potentialités de la méthanation biologique et catalytique . . . . .	540
1.5. Positionnement dans les filières de production de gaz renouvelable . . . . .	541
2. Processus et application de la méthanation biologique . . . . .	542
2.1. Valorisation de l'H <sub>2</sub> du « power-to-gas » par biométhanation . . . . .	542

2.2. Valorisation du syngaz par biométhanation .....	546
2.3. Dispositifs expérimentaux, technologies et démonstrateurs .....	549

Apport des développements méthodologiques multi-omiques  
en méthanisation

*Jérôme Hamelin, Kim Milferstedt, Olivier Chapleur,  
Élie Desmond-Le Quéméner*

1. Métagénomique (MetaG) .....	553
2. Métatranscriptomique (MetaT) .....	553
3. Métaprotéomique (MetaP) .....	553
4. Métabolomique (MetaB) .....	554
5. Culturomique microbienne .....	554
6. Gestion des données .....	554
7. Analyses statistiques multi-omiques .....	555
8. Conclusion .....	556
Index .....	559