

LES BIOCARBURANTS

Répondre aux défis
énergétiques et environnementaux
des transports

Daniel Ballerini



ECL 151

► **D. BALLERINI**
Expert en biotechnologie et chimie de la biomasse

Préface

LES BIOCARBURANTS

Répondre aux défis
énergétiques et environnementaux
des transports



056404

(3)

Préface de
Olivier APPERT

Président d'IFP Energies nouvelles



056404

2011



Editions TECHNIP 25 rue Ginoux, 75015 PARIS, FRANCE

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	VII
Remerciements	IX
Liste des auteurs	XXI
Liste des abréviations	XXIII
Liste des unités	XVII

Chapitre 1

LES BIOCARBURANTS : UNE PARTIE DE RÉPONSE À PLUSIEURS DÉFIS

1.1 L'historique	3
1.1.1 Jusqu'aux années 1960	3
1.1.2 À partir des années 1970	4
1.2 2000-2030 : des enjeux stratégiques	7
1.2.1 L'offre et la demande d'énergie à l'horizon 2030	7
1.2.2 Le pétrole : l'importance de l'OPEP	8
1.2.3 Le transport routier dans le monde	9
1.2.4 Les impacts environnementaux (voir Annexe 1)	11
1.2.5 Les enjeux de sécurité	13
1.2.5.1 Risques liés à la filière bioéthanol	15
1.2.5.2 Risques propres à la filière biodiesel	17
1.2.5.3 Les enjeux de sécurité identifiés en matière de biocarburants de 2 ^e génération	17
1.2.6 Les biocarburants : une voie d'avenir	18
1.2.6.1 Les carburants de synthèse ex-biomasse lignocellulosique et/ou déchets organiques	22
1.2.6.2 L'éthanol ex-biomasse lignocellulosique	22
1.2.6.3 Les alternatives : chaleur, électricité, carburants, chimie	23
1.2.6.4 Conclusions	25
1.3 La première étape de la filière biocarburants : la production de la biomasse	26
1.3.1 La concurrence avec les productions agricoles alimentaires	26

1.3.2	La biodiversité	27
1.3.3	La biomasse, les biocarburants et la matière organique des sols	27
1.3.3.1	La biomasse et la comptabilité du CO ₂	27
1.3.3.2	L'évolution du stock de carbone des sols	28
1.3.3.3	Biomasse-énergie et changements d'usage	29
1.3.3.4	L'effet des pratiques culturales	30
1.4	La vision de l'industrie du raffinage	31
1.4.1	Un point clé pour l'avenir : l'impact de la contribution à la réduction des émissions de CO ₂	33
1.4.2	Comparaison des biocarburants avec les autres carburants non conventionnels	33
1.4.2.1	Les critères de comparaison	34
1.4.2.2	Les carburants alternatifs issus d'énergies fossiles	34
1.4.2.3	La filière BTL (<i>Biomass-to-Liquids</i>)	36
1.5	La vision des constructeurs automobiles	36
1.5.1	La maîtrise des émissions polluantes	36
1.5.1.1	Les réglementations européennes	37
1.5.1.2	Les progrès réalisés	38
1.5.1.3	Les progrès attendus	39
1.5.1.4	L'intérêt des biocarburants	39
1.5.2	La réduction des émissions de CO ₂	41
1.5.2.1	Les progrès réalisés	41
1.5.2.2	Les progrès attendus	42
1.5.2.3	L'intérêt des biocarburants	44
1.5.3	Les carburants. Quelle évolution pour demain ?	45
1.5.3.1	Les caractéristiques des carburants conventionnels	45
1.5.3.2	Le cas des essences	45
1.5.3.3	Le cas des gazoles	46
1.5.3.4	L'évolution des caractéristiques des carburants	47
1.6	Les biocarburants dans le monde	49
1.6.1	L'Amérique du Nord	49
1.6.2	L'Amérique latine et centrale	50
1.6.3	L'Europe	52
1.6.4	Les autres régions productrices de biocarburants	54
<i>Références</i>	54

Chapitre 2

LES BIOCARBURANTS DE PREMIÈRE GÉNÉRATION POUR LES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDÉ : L'ÉTHANOL ET L'ETBE

2.1	Les matières premières d'origine végétale	57
2.1.1	Le potentiel alcooligène des plantes sucrières	58
2.1.2	Le potentiel alcooligène des plantes amylacées	59
2.2	Les procédés de production d'éthanol	60
2.2.1	La fermentation éthanologique	60
2.2.1.1	Le principe	60
2.2.1.2	Les micro-organismes	61

2.2.1.3	Les paramètres de la fermentation éthanologique	62
2.2.1.4	L'étape de fermentation	63
2.2.2	L'extraction de l'éthanol	65
2.2.2.1	La distillation	65
2.2.2.2	Les autres technologies	66
2.2.3	Les effluents et co-produits	67
2.2.4	Les schémas de procédé	68
2.2.4.1	La production d'éthanol ex-plantes sucrières	68
2.2.4.2	La production d'éthanol ex-plantes amylacées	69
2.2.5	Le bilan énergétique	71
2.2.5.1	La production d'éthanol à partir de betteraves	71
2.2.5.2	La production d'éthanol à partir de plantes amylacées	72
2.2.6	Les améliorations potentielles de la production d'éthanol	73
2.2.6.1	Prétraitement des produits amylacés	73
2.2.6.2	Fermentation éthanologique	73
2.2.6.3	Amélioration des performances énergétiques	74
2.3	Les éthers-carburants	74
2.3.1	Les sources de matières premières pour la production d'éthers-carburants	77
2.3.2	La réaction d'éthérisation	78
2.3.2.1	Les réactions secondaires	80
2.3.2.2	Les catalyseurs d'éthérisation	82
2.3.3	Les procédés d'éthérisation	85
2.4	Les principaux acteurs industriels	91
2.5	La production mondiale d'éthanol	91
2.6	L'éthanol et l'ETBE, carburants	92
2.6.1	L'éthanol-carburant	92
2.6.1.1	Les propriétés physiques	95
2.6.1.2	Les indices d'octane	96
2.6.1.3	La volatilité	97
2.6.1.4	La stabilité en présence d'eau	99
2.6.1.5	Le démarrage à froid	99
2.6.1.6	La compatibilité des matériaux	100
2.6.1.7	Les utilisations de l'éthanol dans les moteurs à allumage commandé	100
2.6.1.8	L'emploi de l'éthanol dans les moteurs Diesel	102
2.6.2	L'ETBE-carburant	104
2.7	Les transformations par voie chimique de l'éthanol	106
2.7.1	La production d'hydrogène	106
2.7.1.1	Production d'hydrogène par vaporeformage de l'éthanol	106
2.7.1.2	Purification de l'hydrogène produit	109
2.7.1.3	Production d'hydrogène par oxydation partielle	110
2.7.1.4	Le procédé autotherme	111
2.7.1.5	Systèmes et technologies de production d'hydrogène	111
2.7.1.6	Conclusion	112
2.7.2	Les autres voies de transformation de l'éthanol en base pour carburant	112
2.7.2.1	L'oligomérisation directe de l'éthanol en hydrocarbures	112
2.7.2.2	La conversion de l'éthanol en deux étapes au travers de l'éthylène	113
2.7.2.3	Conversion de l'éthanol par l'intermédiaire du butadiène	115

2.7.2.4	Transformation de l'éthanol en butanol-1	116
2.7.2.5	Transformation de l'éthanol par réaction avec une autre molécule	116
2.7.2.6	Conclusion	117
2.8	Les aspects environnementaux	117
2.9	Les aspects économiques	120
2.9.1	Le coût de production de l'éthanol aux États-Unis	120
2.9.2	Le coût de production de l'éthanol au Brésil	122
2.9.3	Le coût de production de l'éthanol en Europe	123
2.9.4	Le coût de production de l'ETBE	124
<i>Références</i>		124

Chapitre 3

LES BIOCARBURANTS DE PREMIÈRE GÉNÉRATION POUR LES MOTEURS DIESEL

3.1	Les matières premières d'origine végétale	130
3.1.1	La production mondiale d'huiles végétales	130
3.1.2	La production d'oléagineux hors Europe	132
3.1.3	La production européenne d'huiles végétales	132
3.1.4	Les rendements agricoles (graines, huiles, tourteaux)	134
3.1.5	La composition des huiles végétales	134
3.1.6	La fabrication des huiles végétales	135
3.1.6.1	L'exemple du colza	135
3.1.6.2	Les autres huiles	138
3.1.7	Les utilisations des huiles végétales	139
3.2	Le méthanol	142
3.2.1	La synthèse du méthanol	142
3.2.2	Les procédés de production de méthanol	142
3.3	Les procédés de production des EMHV	143
3.3.1	La réaction de transestérification	143
3.3.2	Les procédés de catalyse homogène	144
3.3.2.1	Les catalyseurs	144
3.3.2.2	Les spécifications des matières premières	144
3.3.2.3	Les procédés fonctionnant en discontinu	145
3.3.2.4	Les procédés fonctionnant en continu	147
3.3.2.5	Les consommations énergétiques	148
3.3.3	Les procédés de catalyse hétérogène fonctionnant en continu	148
3.3.3.1	Le catalyseur	149
3.3.3.2	La spécification des matières premières	149
3.3.3.3	Le procédé en continu	149
3.4	La production d'Esters Éthyliques d'Huiles Végétales (EEHV)	151
3.5	Les autres matières premières	152
3.6	Les autres procédés, dont l'hydrotraitement et l'hydroisomérisation des matières grasses renouvelables	153
3.6.1	L'hydrotraitement	154

3.6.2	L'hydroisomérisation	157
3.6.3	Les procédés	157
3.6.3.1	Co-traitement avec des charges fossiles	159
3.6.3.2	Traitement en unité dédiée	159
3.7	Les principaux acteurs industriels	160
3.8	La production mondiale de biodiesel	160
3.9	Le marché de la glycérine	162
3.10	L'utilisation directe des huiles végétales dans les moteurs Diesel	166
3.10.1	Les caractéristiques des huiles végétales	166
3.10.2	L'impact sur la combustion	166
3.10.3	L'impact sur les émissions	168
3.10.4	Le cas particulier des tracteurs agricoles	170
3.10.5	Conclusion	170
3.11	L'utilisation des EMHV dans les moteurs Diesel	170
3.11.1	Les caractéristiques des produits fabriqués	171
3.11.2	Les propriétés des EMHV	177
3.11.3	Les performances des EMHV en tant que carburant	179
3.11.4	L'impact des EMHV sur les émissions	181
3.12	L'utilisation des biocarburants dans le transport aérien	182
3.13	Les aspects environnementaux	182
3.14	Les aspects économiques	184
<i>Références</i>		187

Chapitre 4

LES RESSOURCES EN BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

4.1	La biomasse lignocellulosique : gisement et usages actuels	189
4.1.1	Deux grandes familles de ressources lignocellulosiques	189
4.1.1.1	La ressource co-produits : résidus ou surplus d'exploitations agricole et forestière	190
4.1.1.2	La ressource dédiée : cultures lignocellulosiques dédiées à la valorisation énergétique	190
4.1.2	Les grands chiffres des gisements actuels	192
4.1.2.1	Répartition des principaux types de biomasse	192
4.1.2.2	La ressource forestière	193
4.1.2.3	Les résidus agricoles	197
4.1.2.4	Les cultures dédiées	198
4.2	L'adéquation matière première/procédé de conversion	199
4.2.1	La composition de la matière première	199
4.2.1.1	Les résidus	199
4.2.1.2	Les cultures dédiées	200
4.2.2	Les caractéristiques de la matière première pouvant influencer la conversion énergétique	201

4.2.2.1	La conversion thermochimique	201
4.2.2.2	La conversion biochimique	202
4.3	Les conditions de production et de mobilisation de la ressource	202
4.3.1	Les contraintes d'accès à la ressource	203
4.3.2	Les itinéraires techniques et le conditionnement	204
4.3.3	La concurrence des usages	204
4.3.4	Les contraintes environnementales	205
4.4	Potentiel de production de biomasse lignocellulosique, de nouveaux moyens, de nouveaux espaces	207
4.4.1	Disponibilité en ressources supplémentaires	207
4.4.1.1	Mise en gestion de forêts sous-exploitées	207
4.4.1.2	Développement des moyens de production et progression des rendements	208
4.4.2	Disponibilités en nouvelles terres	209
4.4.2.1	Des terres arables sous-exploitées	209
4.4.2.2	Libération de nouvelles surfaces : progression des rendements des cultures alimentaires	211
4.4.2.3	Surfaces à couvert protégé ou réglementé	212
4.4.3	Bilan d'exploitation de nouvelles surfaces	213
4.5	La biomasse lignocellulosique à vocation énergétique, bilan et perspectives	213
<i>Références</i>		215

Chapitre 5

LA TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE PAR VOIE THERMOCHIMIQUE

5.1	La pyrolyse	217
5.1.1	Définition - Principe	217
5.1.1.1	La pyrolyse lente	219
5.1.1.2	La pyrolyse rapide	219
5.1.1.3	Intérêt de la pyrolyse	220
5.1.2	Les mécanismes fondamentaux de la pyrolyse	220
5.1.2.1	Pyrolyse de la cellulose	220
5.1.2.2	Pyrolyse des hémicelluloses	221
5.1.2.3	Pyrolyse des lignines	221
5.1.2.4	Pyrolyse de la biomasse lignocellulosique	221
5.1.2.5	Les transferts de chaleur et de matière	222
5.1.3	Les principaux paramètres réactionnels de la pyrolyse	223
5.1.3.1	Les flux de chaleur imposés au solide	223
5.1.3.2	La granulométrie et l'humidité de la matière première	223
5.1.3.3	La température et le temps de séjour en phase gazeuse	224
5.1.3.4	La pression	224
5.1.4	Les procédés de pyrolyse rapide	225
5.1.4.1	Conditions opératoires requises	225

5.1.4.2	Principe général du procédé	225
5.1.4.3	Principales technologies de réacteurs	226
5.1.4.4	Les techniques de séparation et de condensation	233
5.1.4.5	Les bilans matière et énergie	234
5.1.5	Les huiles de pyrolyse (bio-huiles)	234
5.1.5.1	Composition chimique	234
5.1.5.2	Les caractéristiques physico-chimiques et les qualités des huiles de pyrolyse	235
5.1.5.3	Environnement et sécurité	236
5.1.6	Les voies possibles d'utilisation des huiles de pyrolyse	237
5.1.6.1	La combustion dans les foyers de chaudières	237
5.1.6.2	L'utilisation directe dans les moteurs Diesel et Stirling	238
5.1.6.3	La combustion dans les turbines à gaz	239
5.1.6.4	L'utilisation indirecte dans la filière biocarburants	239
5.2	La torréfaction	242
5.2.1	Les enjeux de la torréfaction	242
5.2.2	Les mécanismes fondamentaux de la torréfaction	243
5.2.3	Les procédés	245
5.3	La gazéification	250
5.3.1	Les réactions chimiques et les contraintes thermodynamiques pour la production du gaz de synthèse	253
5.3.1.1	Les principales réactions	253
5.3.1.2	Représentation de la biomasse et réaction idéale de gazéification à la vapeur	253
5.3.1.3	Réactions à l'équilibre de la gazéification à la vapeur d'eau	254
5.3.1.4	Éléments de déséquilibres réactionnels	255
5.3.1.5	Les procédés autothermiques et allothermiques	256
5.3.1.6	La réaction de gazéification à l'hydrogène	256
5.3.2	Procédés industriels	257
5.3.2.1	Généralités	257
5.3.2.2	Les principaux types de réacteurs	259
5.3.2.3	Caractéristiques de gaz de synthèse	261
5.3.2.4	Problèmes génériques liés aux technologies de gazéification de la biomasse	261
5.3.3	Les rendements	265
5.3.3.1	Approche générale du problème des rendements	265
5.3.3.2	Principaux points du procédé permettant une augmentation du rendement de production de carburant	266
5.3.3.3	Calculs de rendements pour différentes options de procédés	267
5.3.4	Aspects technico-économiques	269
5.3.5	Aspects environnementaux	271
5.3.6	Les unités de démonstration existantes et les besoins en recherche et développement	271
5.3.7	Conclusion	275
5.4	La liquéfaction directe ou conversion hydrothermale	275
5.4.1	Le principe et les conditions opératoires	275
5.4.2	Les procédés	276

5.5 Les carburants liquides et l'hydrogène produits à partir du gaz de synthèse issu de la biomasse	278
5.5.1 Synthèse du méthanol [146], [147], [148], [149]	278
5.5.2 Synthèse du diméthyléther	280
5.5.3 Le méthanol et le MTBE carburants [150], [151]	282
5.5.3.1 Les caractéristiques du méthanol	282
5.5.3.2 Les caractéristiques du MTBE	283
5.5.4 Le DME-carburant	283
5.5.4.1 Les caractéristiques du DME	283
5.5.4.2 L'utilisation du DME dans les moteurs Diesel	284
5.5.5 Synthèse Fischer-Tropsch [159], [160]	285
5.5.6 Le BTL-carburant	286
5.5.7 La production d'hydrogène [149]	288
5.5.8 Polygénération carburant/électricité	289
<i>Références</i>	290

Chapitre 6

LA TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE PAR VOIE BIOCHIMIQUE. LA PRODUCTION D'ÉTHANOL ET D'ABE

6.1 La production d'éthanol	297
6.1.1 La composition des substrats	297
6.1.2 Le procédé	300
6.1.2.1 Le prétraitement	300
6.1.2.2 L'hydrolyse	307
6.1.2.3 La production des enzymes et leur mode d'action	309
6.1.2.4 La fermentation éthanolique	316
6.1.2.5 L'utilisation de la lignine	324
6.1.2.6 Les différents schémas de production	324
6.1.3 Conclusion	326
6.1.4 Les aspects environnementaux et énergétiques	326
6.1.5 Les aspects économiques	327
6.1.6 La production d'éthanol de première et de deuxième générations sur le même site industriel	328
6.2 La production d'éthanol ex CO + H₂	328
6.3 La fermentation acétonobutylique	331
6.3.1 Le principe	331
6.3.2 Historique	332
6.3.3 Les matières premières	333
6.3.4 Le procédé	333
<i>Références</i>	337

Chapitre 7

LES AUTRES VALORISATIONS ÉNERGÉTIQUES DE LA BIOMASSE PAR VOIE BIOCHIMIQUE

7.1 La fermentation méthanique	343
7.1.1 L'historique	343
7.1.2 Le principe	344
7.1.3 Les matières premières	345
7.1.4 Les procédés	346
7.1.4.1 Les paramètres de fonctionnement	346
7.1.4.2 Les technologies	346
7.1.4.3 Les performances [4]	347
7.1.4.4 La purification du biogaz	348
7.1.4.5 Les aspects économiques	348
7.1.4.6 Les implantations d'unités industrielles en Europe	349
7.1.4.7 Avantages – Inconvénients – Voies d'amélioration	350
7.2 La production d'algues à usages énergétiques	350
7.2.1 Les macroalgues marines	351
7.2.2 Les microalgues	352
7.2.2.1 Les souches d'algues	352
7.2.2.2 Rendement et productivité	353
7.2.2.3 La culture de microalgues	353
7.2.2.4 Le procédé global de production d'algues et d'huiles	355
7.2.2.5 Les aspects économiques	356
7.2.2.6 Les opérations pilotes	356
7.2.2.7 Les principales sociétés impliquées dans la production de microalgues à usages énergétiques	357
7.2.2.8 Les programmes de R&D	358
7.2.2.9 Conclusions	358
7.3 La production d'hydrogène	359
7.3.1 La production par fermentation [14]	359
7.3.2 La production photobiologique	361
7.3.2.1 La production photoautotrophique	361
7.3.2.2 La production photohétérotrophique	362
7.3.3 Les productions combinées par voie fermentaire et photobiologique	362
7.3.4 Conclusions et perspectives	363
<i>Références</i>	364

ANNEXE 1

Le bilan environnemental des biocarburants	367
<i>Références</i>	372

ANNEXE 2

Le raffinage du pétrole brut	373
Index	377

LES BIOCARBURANTS

Répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports

L'évolution du contexte énergétique mondial, la prise de conscience des enjeux environnementaux et le développement des actions de recherche sur la production de biocarburants de deuxième et troisième générations ont rendu indispensable la rédaction d'un nouvel ouvrage, qui actualise et enrichit *Les Biocarburants – État des lieux, perspectives et enjeux du développement* paru en 2006, sur tous les aspects techniques, économiques et environnementaux.

Cet ouvrage présente l'état de l'art détaillé des filières de production de biocarburants de première génération. Il décrit les nouvelles voies, dites de deuxième génération, qui utilisent la biomasse lignocellulosique comme matière première et commencent à déboucher sur des réalisations industrielles, allant ainsi dans le sens de la réduction de la concurrence entre la ressource alimentaire et l'usage de matières agricoles à des fins énergétiques. Un point technique est également dressé sur la valorisation énergétique des algues (troisième génération) et la production de méthane et d'hydrogène par voies biochimiques.

Ce livre arrive à point nommé pour réaffirmer l'intérêt des biocarburants, y compris pour le transport aérien, et éclairer les axes de recherche et de développement technologique dont ils font actuellement l'objet. Il intéressera les industriels du transport, les raffineurs, les forestiers, l'univers agricole et l'industrie agro-alimentaire, mais également les pouvoirs publics, les étudiants, professeurs et chercheurs du monde universitaire.

Daniel Ballerini est ingénieur d'IFP School et docteur-ingénieur de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6. Il a été responsable du département Biotechnologie et chimie de la biomasse à IFP Energies nouvelles. Durant sa carrière, il s'est toujours intéressé à la protection de l'environnement, à la biotechnologie et à la chimie de la biomasse, notamment la production des biocarburants.

