
Table des matières

Préface	V
Avant-propos	VII
Remerciements	XIX
Liste des auteurs	XXI
Liste des unités	XXIII
Liste des abréviations	XXV

Chapitre 1

LA PLACE DES BIOCARBURANTS DANS LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL

1.1 L'historique	1
1.1.1 Jusqu'aux années 1960	1
1.1.2 À partir des années 1970	2
1.2 2000-2030 : des enjeux stratégiques	5
1.2.1 L'offre et la demande d'énergie à l'horizon 2030	5
1.2.2 L'impact sur les émissions de gaz à effet de serre (GES)	7
1.2.3 Le pétrole : une dépendance accrue vis-à-vis de l'OPEP	10
1.2.4 Le transport routier dans le monde	11
1.2.4.1 La situation actuelle	11
1.2.4.2 L'évolution de la demande de transport	11
1.2.4.3 L'impact sur l'environnement	11
1.2.5 Les biocarburants : une voie d'avenir	12
1.3 Les biocarburants dans le monde	15
1.3.1 L'Europe	15
1.3.1.1 Le cadre législatif	15
1.3.1.2 L'influence de la Politique Agricole Commune (PAC)	16
1.3.1.3 La production actuelle et les perspectives d'évolution	17
1.3.1.4 La France	20

1.3.1.5	L'Allemagne	22
1.3.1.6	L'Espagne	24
1.3.1.7	L'Italie	25
1.3.1.8	La Suède	25
1.3.1.9	Les autres pays européens	26
1.3.2	Le Brésil	27
1.3.2.1	Les ressources agricoles	27
1.3.2.2	La production de biocarburants	28
1.3.2.3	Les formulations de carburants	29
1.3.2.4	Les coûts des biocarburants	30
1.3.2.5	Les impacts de la production de biocarburants	31
1.3.3	Les États-Unis	32
1.3.3.1	Les facteurs incitatifs au développement des biocarburants	32
1.3.3.2	La production d'éthanol	33
1.3.3.3	La production de biodiesel	35
1.3.4	Les autres pays	36
1.3.4.1	Le Canada	36
1.3.4.2	La Chine	37
1.3.4.3	L'Inde	38
1.3.4.4	Le Mexique	38
1.3.4.5	La Thaïlande	38
1.4	Les premiers acteurs de la filière biocarburants : les producteurs de la ressource agricole	39
1.4.1	Les betteraviers et céréaliers	39
1.4.1.1	L'historique de la promotion de l'éthanol carburant en France	39
1.4.1.2	La production d'éthanol en Europe	40
1.4.1.3	La production d'éthanol dans le monde	40
1.4.1.4	Les prévisions d'incorporation d'éthanol dans l'essence en France	41
1.4.1.5	Les perspectives de développement des cultures de blé et de betteraves, en France	41
1.4.1.6	Les perspectives de développement de la production mondiale d'éthanol	43
1.4.2	Les producteurs d'oléagineux	44
1.4.2.1	L'historique de la promotion du biodiesel	44
1.4.2.2	Les prévisions d'incorporation du biodiesel dans le gazole en France	45
1.4.2.3	Les perspectives de développement des cultures d'oléagineux	46
1.4.2.4	Les perspectives de développement de la production de biodiesel	48
1.4.2.5	Les freins et les incitations au développement de la production du biodiesel	50
1.4.2.6	La mondialisation du marché du biodiesel	50
1.5	La vision de l'industrie du raffinage	51
1.5.1	Une attitude d'abord réservée	51
1.5.2	Des réticences plus fortes à l'égard de l'éthanol comparé aux EMHV	51
1.5.2.1	Les problèmes liés à une incorporation de l'éthanol en l'état dans les essences	51
1.5.2.2	Le coût et les risques au plan économique, de l'utilisation de l'éthanol sous forme d'ETBE	52
1.5.2.3	Le déséquilibre entre offre et demande en carburants	53

1.5.3	Le point de la situation en 2004	53
1.5.4	Un point clé pour l'avenir : l'impact de la contribution à la réduction des émissions de CO ₂	54
1.5.5	Les biocarburants comparés aux autres carburants non conventionnels.	54
1.5.5.1	Les critères de comparaison	55
1.5.5.2	Les carburants alternatifs issus d'énergies fossiles.	55
1.5.5.3	La filière BTL (Biomass To Liquids).	56
1.6	Les préoccupations des constructeurs automobiles	57
1.6.1	La maîtrise des émissions polluantes.	57
1.6.1.1	Les réglementations	58
1.6.1.2	Les progrès réalisés	58
1.6.1.3	Les progrès attendus.	59
1.6.1.4	L'intérêt des biocarburants	60
1.6.2	La réduction des émissions de CO ₂	61
1.6.2.1	Les progrès réalisés	61
1.6.2.2	Les progrès attendus.	63
1.6.2.3	L'intérêt des biocarburants	63
1.6.3	Les carburants. Quelle évolution pour demain ?	66
1.6.3.1	Les caractéristiques des carburants conventionnels	66
1.6.3.2	Le cas des essences	66
1.6.3.3	Le cas des gazoles	68
1.6.3.4	L'évolution des caractéristiques des carburants	69
1.7	Les nouvelles filières	70
1.7.1	Les carburants de synthèse ex-biomasse lignocellulosique et/ou déchets organiques	72
1.7.2	L'éthanol ex-biomasse lignocellulosique.	72
1.7.3	Les alternatives chaleur, électricité, carburants, chimie.	73
1.7.3.1	L'usage thermique	74
1.7.3.2	La bioélectricité	74
1.7.3.3	Les biocarburants	74
1.7.3.4	La chimie végétale	75
1.7.4	Conclusions	75
	<i>Références.</i>	76

Chapitre 2

L'ÉTHANOL ET L'ETBE

2.1	Les matières premières d'origine végétale	79
2.1.1	Le potentiel alcooligène des plantes sucrières	80
2.1.2	Le potentiel alcooligène des plantes amylicées	80
2.2	Les procédés de production d'éthanol.	82
2.2.1	La fermentation éthanologique.	82
2.2.1.1	Le principe	82
2.2.1.2	Les micro-organismes.	83

2.2.1.3	Les paramètres de la fermentation éthanolique	84
2.2.1.4	L'étape de fermentation	84
2.2.2	L'extraction de l'éthanol	87
2.2.2.1	La distillation	87
2.2.2.2	Les autres technologies	88
2.2.3	Les effluents et coproduits.	89
2.2.4	Les schémas de procédé	90
2.2.4.1	La production d'éthanol ex-plantes sucrières	90
2.2.4.2	La production d'éthanol ex-plantes amylacées	91
2.2.5	Le bilan énergétique	93
2.2.5.1	La production d'éthanol à partir de betteraves	93
2.2.5.2	La production d'éthanol à partir de plantes amylacées.	94
2.2.6	Les améliorations potentielles de la production d'éthanol	95
2.2.6.1	Prétraitement des produits amylacés	95
2.2.6.2	Fermentation éthanolique	95
2.2.6.3	Amélioration des performances énergétiques	96
2.3	Les éthers-carburants.	96
2.3.1	Les sources de matières premières pour la production d'éthers-carburants	98
2.3.2	La réaction d'éthérisation	100
2.3.2.1	Les réactions secondaires	102
2.3.2.2	Les catalyseurs d'éthérisation	103
2.3.3	Les procédés d'éthérisation	106
2.4	Éthanol et ETBE, carburants	112
2.4.1	L'éthanol-carburant	112
2.4.1.1	Les propriétés physiques	112
2.4.1.2	Les indices d'octane.	114
2.4.1.3	La volatilité.	114
2.4.1.4	La stabilité en présence d'eau	116
2.4.1.5	Le démarrage à froid	116
2.4.1.6	La compatibilité des matériaux	117
2.4.1.7	Les utilisations de l'éthanol dans les moteurs	117
2.4.2	L'ETBE-carburant	119
2.5	Les transformations par voie chimique de l'éthanol.	121
2.5.1	La production d'hydrogène	121
2.5.1.1	Production d'hydrogène par vaporeformage de l'éthanol	121
2.5.1.2	Purification de l'hydrogène produit	124
2.5.1.3	Production d'hydrogène par oxydation partielle	125
2.5.1.4	Le procédé autotherme	125
2.5.1.5	Conclusion	126
2.5.2	Les autres voies de transformation de l'éthanol en base pour carburant	126
2.5.2.1	L'oligomérisation directe de l'éthanol en hydrocarbures	126
2.5.2.2	La conversion de l'éthanol en deux étapes au travers de l'éthylène	127
2.5.2.3	Conversion de l'éthanol par l'intermédiaire du butadiène	129
2.5.2.4	Transformation de l'éthanol en butanol-1.	130
2.5.2.5	Transformation de l'éthanol par réaction avec une autre molécule	130
2.5.2.6	Conclusion	131
	<i>Références</i>	131

Chapitre 3

LES ESTERS D'HUILES VÉGÉTALES

3.1	Les matières premières d'origine végétale	136
3.1.1	La production mondiale d'huiles végétales	136
3.1.2	La production européenne d'huiles végétales	136
3.1.3	Les rendements agricoles (graines, huiles, tourteaux)	138
3.1.4	La composition des huiles végétales	139
3.1.5	L'obtention des huiles végétales	140
3.1.5.1	L'exemple du colza	140
3.1.5.2	Les autres huiles	143
3.1.6	Les utilisations des huiles végétales	143
3.2	Le méthanol	146
3.2.1	La synthèse du méthanol	146
3.2.2	Les procédés de production de méthanol	146
3.3	Les procédés de production des EMHV	147
3.3.1	La réaction de transestérification	147
3.3.2	Les procédés de catalyse homogène	148
3.3.2.1	Les catalyseurs	148
3.3.2.2	Les spécifications des matières premières	148
3.3.2.3	Les procédés fonctionnant en discontinu	149
3.3.2.4	Les procédés fonctionnant en continu	151
3.3.2.5	Les consommations énergétiques	153
3.3.3	Les procédés de catalyse hétérogène, fonctionnant en continu	153
3.3.3.1	Le catalyseur	153
3.3.3.2	La spécification des matières premières	153
3.3.3.3	Le procédé en continu	154
3.4	La production d'esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV)	156
3.5	Les autres matières premières	156
3.5.1	Les autres huiles végétales	156
3.5.2	Les huiles de friture	157
3.5.3	Les graisses animales	157
3.6	Les autres procédés	158
3.7	Les caractéristiques des produits fabriqués	159
3.8	Les principaux acteurs industriels	164
3.9	Le marché de la glycérine	166
3.10	L'utilisation directe des huiles végétales dans les moteurs diesel	168
3.10.1	Les caractéristiques des huiles végétales	168
3.10.2	L'impact sur la combustion	170
3.10.3	L'impact sur les émissions	171
3.10.4	Le cas particulier des tracteurs agricoles	172
3.10.5	Conclusion	172

3.11 L'utilisation des EMHV dans les moteurs diesel	173
3.11.1 Les propriétés des EMHV	173
3.11.2 Les performances des EMHV en tant que carburant	176
3.11.3 L'impact des EMHV sur les émissions	178
<i>Références</i>	178

Chapitre 4

LES RESSOURCES EN BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

4.1 Le gisement potentiel	181
4.1.1 Les différentes sources de biomasse lignocellulosique	181
4.1.2 Les résidus	184
4.1.2.1 Les déchets de récolte	184
4.1.2.2 Déchets de l'industrie du bois	186
4.1.3 Les cultures dédiées	187
4.1.3.1 Les cultures annuelles	187
4.1.3.2 Les cultures pérennes récoltées annuellement	187
4.1.3.3 Les cultures pérennes récoltées pluri-annuellement	187
4.2 L'adéquation matière première/process de conversion	189
4.2.1 La composition de la matière première	189
4.2.1.1 Les résidus	189
4.2.1.2 Les cultures dédiées	191
4.2.2 Les caractéristiques de la matière première influençant la conversion	192
4.2.2.1 La conversion thermochimique	192
4.2.2.2 La conversion biochimique	192
4.3 Les conditions techniques de production et de mobilisation	193
4.3.1 Les itinéraires techniques	193
4.3.2 La logistique de récolte et de transport	193
4.4 Le gisement mobilisable et l'insertion des cultures de biomasse lignocellulosique dans l'espace rural	194
4.4.1 Les contraintes sur les ressources	194
4.4.1.1 Les contraintes techniques	194
4.4.1.2 Les contraintes environnementales	195
4.4.1.3 Les contraintes législatives	195
4.4.1.4 Les contraintes économiques	195
4.4.1.5 Les contraintes informatives	195
4.4.2 La concurrence des usages	195
4.4.3 L'évaluation du gisement mobilisable	196
4.5 Conclusion	198
<i>Références</i>	198

Chapitre 5

LA TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE PAR VOIE THERMOCHIMIQUE

5.1	La pyrolyse	201
5.1.1	Principe	201
5.1.2	Les mécanismes fondamentaux de pyrolyse	202
5.1.2.1	Pyrolyse de la cellulose	203
5.1.2.2	Pyrolyse des hémicelluloses	203
5.1.2.3	Pyrolyse des lignines	203
5.1.2.4	Pyrolyse de la biomasse lignocellulosique	203
5.1.3	Les principaux paramètres réactionnels	204
5.1.3.1	La température de réaction	205
5.1.3.2	La vitesse de chauffage	205
5.1.3.3	Les temps de séjour	206
5.1.3.4	La pression	206
5.1.3.5	La matière première	206
5.1.4	La pyrolyse rapide pour la production d'huiles	208
5.1.4.1	Principe	208
5.1.4.2	Les caractéristiques et qualités des huiles	209
5.1.4.3	Les principaux procédés de pyrolyse rapide	211
5.1.4.4	Les bilans matière et énergie	217
5.1.5	La pyrolyse lente	218
5.1.6	L'utilisation des huiles de pyrolyse	219
5.1.6.1	La combustion dans les foyers de chaudières	219
5.1.6.2	La combustion dans les turbines à gaz	220
5.1.6.3	L'utilisation directe dans les moteurs diesel	220
5.1.6.4	L'utilisation indirecte dans la filière biocarburants	220
5.2	Procédés de gazéification	223
5.2.1	Les réactions chimiques et les contraintes thermodynamiques pour la production du gaz de synthèse	225
5.2.1.1	Les principales réactions	225
5.2.1.2	Représentation de la biomasse et réaction idéale de gazéification à la vapeur	226
5.2.1.3	Réactions à l'équilibre de la gazéification à la vapeur d'eau	226
5.2.1.4	Éléments de déséquilibres réactionnels	228
5.2.1.5	Les procédés autothermiques et allothermiques	228
5.2.1.6	La réaction de gazéification à l'hydrogène	229
5.2.2	Procédés industriels	229
5.2.2.1	Généralités	229
5.2.2.2	Les principaux types de réacteurs	229
5.2.2.3	Caractéristiques de gaz de synthèse	233
5.2.2.4	Problèmes génériques liés aux technologies de gazéification de la biomasse	233
5.2.3	Les rendements	237
5.2.4	Les unités de démonstration existantes et les besoins en recherche et développement	240

5.3	La liquéfaction directe ou conversion hydrothermale	241
5.3.1	Le principe et les conditions opératoires	241
5.3.2	Les procédés	242
5.4	Les carburants liquides et l'hydrogène produits à partir du gaz de synthèse issu de la biomasse	244
5.4.1	Synthèse du méthanol	244
5.4.2	Synthèse du diméthyléther	246
5.4.3	Le méthanol et le MTBE carburants	247
5.4.3.1	Les caractéristiques du méthanol	247
5.4.3.2	Les caractéristiques du MTBE	249
5.4.4	Le DME-carburant	249
5.4.4.1	Les caractéristiques du DME	249
5.4.4.2	L'utilisation du DME dans les moteurs diesel	250
5.4.5	Synthèse Fischer-Tropsch	251
5.4.6	Le BTL-carburant	252
5.4.7	La production d'hydrogène	253
5.4.8	Polygénération carburant/électricité	255
	<i>Références</i>	255

Chapitre 6

LA TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE PAR VOIE BIOCHIMIQUE

6.1	La production d'éthanol	261
6.1.1	La composition des substrats	262
6.1.2	Les procédés	264
6.1.2.1	Le prétraitement	264
6.1.2.2	L'hydrolyse	269
6.1.2.3	La production des enzymes et leur mode d'action	271
6.1.2.4	La fermentation éthanologique	278
6.1.2.5	L'utilisation de la lignine	285
6.1.2.6	Les différents schémas de production	285
6.1.3	Conclusion	287
6.2	Les autres voies de valorisation énergétique de la biomasse	287
6.2.1	La fermentation méthanique	287
6.2.1.1	L'historique	287
6.2.1.2	Le principe	288
6.2.1.3	Les matières premières	289
6.2.1.4	Les procédés	290
6.2.2	La fermentation acétonobutylique	294
6.2.2.1	Le principe	294
6.2.2.2	L'historique	295
6.2.2.3	Les matières premières	296
6.2.2.4	Le procédé	296
6.2.3	La production d'éthanol ex-CO + H ₂	300

6.2.4	La production d'hydrogène	301
6.2.4.1	La production par fermentation	302
6.2.4.2	La production photobiologique	303
6.2.4.3	Les productions combinées par voies fermentaire et photobiologique	305
6.2.4.4	Conclusions et perspectives	305
<i>Références.</i>		306

Chapitre 7

LES BILANS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES FILIÈRES DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS

7.1	Les aspects économiques.	311
7.1.1	La compétitivité des biocarburants	311
7.1.2	La filière éthanol	313
7.1.2.1	Le coût de production de l'éthanol au Brésil	313
7.1.2.2	Le coût de production de l'éthanol aux États-Unis	315
7.1.2.3	Le coût de production de l'éthanol en Europe	317
7.1.2.4	Le contexte réglementaire pour l'éthanol	317
7.1.3	Le coût de production de l'ETBE	318
7.1.4	Le biodiesel	318
7.1.4.1	Les coûts de production du biodiesel en Europe	319
7.1.4.2	Le contexte réglementaire pour les EMHV	321
7.1.5	Les nouvelles filières biocarburants	321
7.2	Le bilan environnemental des biocarburants.	322
7.2.1	Méthodologie	322
7.2.1.1	Définition des objectifs et du champ de l'étude	323
7.2.1.2	Analyse de l'inventaire	324
7.2.1.3	Évaluation de l'impact	325
7.2.1.4	Interprétation	326
7.2.1.5	Principales limitations des ACV	326
7.2.2	Résultats des ACV pratiquées sur les biocarburants	326
<i>Références.</i>		330

ANNEXES

Annexe 1		
Le raffinage du pétrole brut		331
Annexe 2		
Courbes		336
Index		343