

Alain Damien

LA BIOMASSE ÉNERGIE

2^e édition

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Illustration de couverture : © patleem – Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2008, 2013
ISBN 978-2-10-070328-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
--------------	---

A

Définitions et généralités

1 • Les composés organiques produits par la Nature	5
1.1 La production directe de biomasse	5
1.2 La production indirecte de biomasse	9
1.3 Le carbone fossile	10
1.4 Les produits intermédiaires	10
2 • Les définitions réglementaires de la biomasse	11
2.1 La réglementation de l'Union européenne	11
2.2 La réglementation française	12
2.3 Les précisions de l'ONU	13
3 • Les définitions normatives de la biomasse	15
4 • Quelques considérations énergétiques sur la biomasse énergie	17
4.1 Principe des unités de production de biocarburant	17
4.2 L'efficacité énergétique hydrocarbonée	19

B

La ressource

5 • Les cultures dédiées à la production d'énergie	23
5.1 Les plantes agricoles	23
5.2 Le bois et les forêts	58
5.3 Les plantes aquatiques et les algues	75
5.4 Les plantes invasives	83
6 • Les résidus de la biomasse	87
6.1 Agriculture	87
6.2 Les forêts	94
7 • La biomasse des déchets	99
7.1 Les déchets fermentescibles des ordures ménagères	99
7.2 Les boues de STEP	100
7.3 Les liqueurs noires	102
7.4 Les industries agroalimentaires	103
7.5 Les déchets verts	104
7.6 Les déchets de la voirie et des marchés	104
7.7 Les déchets des emballages en bois	104
7.8 Les bois de construction et de démolition	104
7.9 Les résidus des industries de transformation du bois	104

C

Les modes de transformation de la biomasse en énergies

8 • La combustion	109
8.1 Les chaudières et foyers	109
8.2 Les moteurs et turbines	113
9 • La gazéification	119
9.1 Le principe	119
9.2 L'usage de la gazéification en traitement de biomasse	120
9.3 Les technologies de gazéification	122

10 • La pyrolyse	133
10.1 Le principe	133
10.2 L'usage de la pyrolyse en traitement de biomasse	134
10.3 Les technologies de pyrolyse	135
11 • La torréfaction	143
11.1 Le principe	143
11.2 Le mode opératoire	143
11.3 Les coûts	145
12 • La méthanisation	147
12.1 Méthanisation et compostage	148
12.2 Principe de la méthanisation	149
12.3 Les réacteurs de méthanisation	152
12.4 La purification du biogaz	155
13 • La fermentation alcoolique	159
13.1 Le principe	159
13.2 La production industrielle d'éthanol en fonction des plantes	164
14 • Le biogaz des décharges	171
15 • La synthèse Fischer-Tropsch	175
15.1 Historique du procédé	175
15.2 Emploi du procédé	177
16 • La synthèse du méthanol	179
16.1 La synthèse chimique actuelle	179
16.2 La production issue de la biomasse	179
17 • La transestérification	181
17.1 Le procédé	181
17.2 L'application industrielle	182
18 • La production de gaz naturel de synthèse	185
19 • La production de biohydrogène	187
19.1 Le reformage	187
19.2 Les synthèses enzymatiques	188

D

Les biocombustibles et les biocarburants

20 • Les biocombustibles solides	191
20.1 Le bois de feu	191
20.2 Les plaquettes forestières	192
20.3 Les granulés ou pellets	193
20.4 Les grains récoltés	196
20.5 Les écorces	196
20.6 Les copeaux et sciures	197
20.7 Les biocombustibles solides	197
20.8 Le charbon de bois	197
20.9 Les pailles	198
21 • Les biocombustibles solides en propulsion de véhicules	201
21.1 Le gaz des forêts	201
21.2 Le gazauto	202
22 • Les biocombustibles gazeux	205
22.1 Le biogaz	205
22.2 Le biohydrogène	205
22.3 Le bio-SNG	206
23 • Les biocarburants et les biocombustibles liquides	209
23.1 Éthanol et ETBE	210
23.2 Méthanol et MTBE	216
23.3 Le butanol	217
23.4 Les huiles	217
23.5 Esters méthyliques d'acides gras (EMAG) ou esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) ou « Diester »	220
23.6 Diméthyléther ou DME	222
23.7 Les pyrolysats ou huiles brutes de pyrolyse	223
23.8 Les liqueurs noires	225
23.9 Le biogazole de synthèse	225
24 • Performances comparées des biocarburants	229

E

Situation de la biomasse énergie

25 • Une réglementation favorable	235
25.1 La production de chaleur	236
25.2 L'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel	237
25.3 La production d'électricité	238
25.4 La production de biocarburants	241
25.5 Les soutiens à l'agriculture	244
25.6 Les amortissements	246
25.7 L'élimination des déchets des usages de la biomasse	246
25.8 Les aspects sanitaires des usages de la biomasse animale	246
26 • La biomasse énergie impacte la biomasse non-énergie	249
26.1 Biomasse et consommation d'eau	249
26.2 Biomasse et production alimentaire	250
26.3 Biomasse et matériaux	251
26.4 Le retour au sol de la matière organique	252
26.5 Les conduites de culture	255
27 • Les aspects négatifs de la biomasse énergie	259
27.1 Une réduction de la production de gaz à effet de serre contestée	259
27.2 Une réduction de la surface forestière	260
27.3 L'effet des pratiques agricoles ou forestières intensives	261
27.4 Les transferts longue distance de biomasse	262
28 • Les aspects positifs de la biomasse énergie	263
28.1 Une énergie nouvelle renouvelable disponible	263
28.2 Un combustible peu dangereux	263
28.3 Une amélioration de la situation des agriculteurs	264
28.4 Un couteau suisse énergétique	264
28.5 Une réduction de la production de gaz à effet de serre	265
28.6 Un moyen de traitement de la pollution	266
Conclusion	269
Glossaire	271
Index	293

INTRODUCTION

Vers la fin des années soixante, lycéen, j'apprends le russe et mes parents m'offrent alors un très gros dictionnaire français-russe des éditions de Moscou. En pensant à ce pays disposant d'une vaste forêt sibérienne, j'y ai recherché récemment en vain la traduction du mot « biomasse ». L'édition 1967 du dictionnaire Quillet ne comporte pas non plus ce terme. Ce concept semble donc récent : jadis, on faisait du feu, on brûlait du bois, on se réchauffait devant la cheminée... Il n'était alors nullement question de production d'énergie par la biomasse, bien que la découverte du feu remonte à la préhistoire.

Cette expression semble apparaître avec la naissance des « énergies nouvelles renouvelables – ENR ». Il s'agit dans un premier temps de ces énergies que Dame Nature propose à profusion de façon renouvelée sans trop se poser la question des limites quantitatives locales ou de leur dispersion temporelle indépendante des besoins instantanés des consommateurs. Les premières énergies renouvelables citées sont alors le solaire, l'hydraulique, l'éolien, la houle, les courants marins, les marées, les vagues, la géothermie et... la biomasse.

La prise en compte de la biomasse se trouve ensuite accentuée par la prise de conscience de l'effet de serre. L'accroissement permanent de la concentration en CO₂ de l'atmosphère modifie progressivement le climat de la planète en accroissant les gradients de température de cette gigantesque machine thermique : les phénomènes climatiques extrêmes (typhons, sécheresses, inondations, tempêtes...) s'en trouvent renforcés. La biomasse énergie apparaît alors comme le moyen de « faire tourner » les atomes de carbone entre les usages énergétiques, l'atmosphère et les plantes, sans apport supplémentaire de CO₂ à l'atmosphère. Des aspects chaleur et électricité, la biomasse se trouve dès lors réorientée vers les biomatériaux (matières plastiques issues de l'amidon) et les biocarburants afin de se substituer au pétrole.

Après les énergies fossiles (carbone organique), fissiles et fertiles (nucléaire) apparaît l'énergie fatale de la biomasse, celle qui de toute façon sera produite et qu'il vaudrait mieux ne pas gaspiller : fraction fermentescible des ordures ménagères, boues de station d'épuration, biogaz des décharges d'ordures ménagères. Composés de matière organique, ces matériaux seront intégrés ultérieurement, pour partie dans la biomasse, après une multitude de discussions entre experts afin de mieux les situer entre le carbone fossile et les déchets plus ou moins dangereux.

La biomasse est une question complexe, les aspects technologiques de traitement sont probablement les plus aisés à cerner. Le choix des espèces végétales adaptées aux conditions pédoclimatiques locales nécessite plus de délai puisqu'il convient

d'expérimenter sur des cycles annuels. La ressource biomasse énergie, au demeurant limitée, nécessite de faire des choix qui restent à traduire au niveau de la réglementation : est-il raisonnable de placer sur un pied d'égalité la chaleur, l'électricité et les biocarburants, alors qu'il existe d'autres ENR pour produire chaleur et électricité ? Nous aborderons successivement ces différents aspects dans cet ouvrage : les définitions et généralités ; la ressource biomasse ; les moyens de transformation de la biomasse ; les biocombustibles et les biocarburants ; la place de la biomasse et enfin un glossaire indispensable pour cette forme d'énergie aux confins des techniques agricole, forestière, agroalimentaire, thermique, électromécanique et chimique.

A

Définitions et généralités

La définition de la biomasse énergie présente aujourd'hui certaines ambiguïtés. Nous débutons ce chapitre par la description des éléments générant la biomasse. Puis nous examinerons successivement l'éclairage fourni par la réglementation et par la normalisation. Conférer le caractère biomasse à un matériau revient à le faire entrer dans une catégorie de combustible qu'il convient d'aider à se développer par des mécanismes financiers et/ou fiscaux en dépit de sa non rentabilité intrinsèque afin qu'il se substitue à un combustible fossile. Nous terminerons sur certains aspects énergétiques spécifiques à la biomasse.

1 • LES COMPOSÉS ORGANIQUES PRODUITS PAR LA NATURE

A

DÉFINITIONS ET GÉNÉRALITÉS

La biomasse est produite par les organismes vivants principalement par l'activité photosynthétique des plantes, mais aussi des animaux, des insectes, des micro-organismes... Elle est essentiellement constituée de polymères complexes de carbone, hydrogène, oxygène et azote, de soufre en faible proportion et d'éléments inorganiques. L'aspect renouvelable introduit une distinction qui permet de n'en retenir qu'une fraction d'une part, d'y ajouter la production fatale de déchets issus d'autres composés organiques naturels industriellement transformés, donc pas toujours naturels, d'autre part.

1.1 La production directe de biomasse

Il s'agit là de biomasse brute : arbres et arbustes des forêts, végétaux poussant naturellement ou productions agricoles, matières aquatiques diverses comme le goémon, les algues ou le varech.

Le monde animal n'intervient pas en production directe d'énergie : aucun animal n'est élevé ou chassé pour produire exclusivement de l'énergie. En effet, la teneur en eau est généralement élevée, 80 % pour l'être humain, ce qui ne permet pas de disposer d'un PCI élevé. Ceci pourrait évoluer si l'on pouvait disposer localement d'une énergie de séchage peu onéreuse. On peut imaginer que les nuages de criquets africains puissent éventuellement devenir une ressource énergétique sous réserve de pouvoir les collecter et de les sécher, à l'énergie solaire par exemple.

Le monde végétal constitue la seule ressource de biomasse énergie cultivée spécifiquement ou produite naturellement et récoltée : bois et produits agricoles, voire aquacoles. Il se répartit en deux catégories :

- Les organismes hétérotrophes (incapables d'effectuer par eux-mêmes la synthèse de leurs constituants issus de la matière minérale) et chimiotrophes (récupérant l'énergie d'oxydation des composés organiques réduits qu'ils assimilent) comme les champignons.
- Les organismes autotrophes (aptés à assimiler les éléments inorganiques pour les besoins de la synthèse de leurs constituants organiques) et phototrophes (captant l'énergie lumineuse afin de fournir l'énergie nécessaire aux différentes étapes chimiques de production de leurs constituants). Ce sont les végétaux chlorophylliens.

Ces derniers constituent le principal gisement de biomasse et il convient de rappeler ici succinctement le principe de la production de matière végétale par photosynthèse pour en appréhender les limites.

1.1.1 Structure de la feuille

La **feuille** est un organe plat de la plante qui présente une grande surface en regard de l'environnement, ce qui lui permet de capter au mieux la lumière solaire.

Le **pétiole** ou « queue » désigne la partie rétrécie de la feuille la rattachant à la tige ou à la branche. Il constitue le faisceau conducteur de la sève.

Les **nervures** sont l'ensemble des vaisseaux conducteurs de la sève faisant saillie sur la face inférieure de la feuille. Leur disposition spatiale caractérise chaque espèce. Les monocotylédones présentent des nervures parallèles, alors que les dicotylédones sont pourvues de nervures divergentes. Les nervures assurent l'apport d'eau et des sels minéraux au sein de la feuille, le transport de la matière synthétisée vers la tige.

Le **stomate** est un pore disposé à la surface des feuilles traversant leur épiderme permettant les échanges gazeux (O_2 et CO_2) et la transpiration (H_2O).

Le **limbe** remplit l'espace entre les nervures, il contient la majeure partie de la chlorophylle et assure la photosynthèse au moyen du parenchyme chlorophyllien.

Le parenchyme chlorophyllien se présente sous deux formes :

- Les dicotylédones disposent d'un parenchyme chlorophyllien palissadique tapissant la face supérieure des feuilles et un parenchyme chlorophyllien lacuneux réparti sur la face inférieure. Les stomates sont disposés sous les feuilles.
- Les monocotylédones ne présentent pas de différenciation marquée entre les deux parenchyms chlorophylliens.

1.1.2 Structure de la cellule chlorophyllienne

La cellule chlorophyllienne comprend :

Une **paroi** constituant une enveloppe externe rigide. Elle est constituée de cellulose [polymère du glucose ($C_6H_{10}O_5$)_n – n s'exprime en centaines ou milliers], de protéines et de lignine [polymère de coniféryle, de p-coumaryle et d'alcools sinapiques]. Elle enveloppe la membrane plasmique.

La **membrane plasmique** est constituée de lipides, de protéines et de sucres structurant les échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule ou entre deux compartiments cellulaires. Elle contient des tensioactifs, les phospholipides.

Le **cytoplasme** désigne l'ensemble du matériel cellulaire à l'intérieur de la membrane plasmique à l'exception du noyau.

Le **noyau** est un organite qui dispose de la plupart du matériel génétique de la cellule. Il contrôle les réactions chimiques du cytoplasme et stocke les informations nécessaires à la division cellulaire.

La **vacuole** est une cavité située dans le cytoplasme. Elle contient un liquide constitué d'eau, des glucides, des ions et des pigments : le suc vacuolaire. Les vacuoles peuvent aussi protéger la plante contre les prédateurs : elles contiennent parfois des composés toxiques ou désagréables au goût.

Des **chloroplastes**, qui contiennent la chlorophylle. La photophosphorylation se déroule dans les chloroplastes des végétaux et des algues. Le chloroplaste présente une taille variant de 1 à 10 nm. Il est constitué d'une enveloppe renfermant des

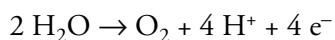
brins d'ADN, des ribosomes, des stroma, des amas d'amidon, des globules lipidiques et des grana formés de thylacoïdes accolés. Ces grana sont rendus solidaires au moyen de thylacoïdes inter-granaires. Les thylacoïdes contiennent le système photosynthétique absorbant la lumière, les complexes de transport des électrons, les enzymes et protéines de synthèse de l'ATP.

1.1.3 Les réactions de photosynthèse

La synthèse des glucides chez les végétaux vise à mettre en réserve de l'énergie (saccharose, amidon) et à produire les éléments glucidiques des membranes (cellulose, glycolipides, glycoprotéines, lignine...).

La photosynthèse s'opère en deux phases successives :

Réactions photochimiques assurant l'oxydation de l'eau (« phase claire »)

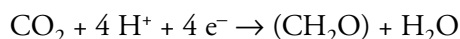


Les réactions de la lumière induisent une formation d'énergie sous forme d'ATP et de pouvoir réducteur sous forme de NADPH, H^+ . Ces deux composés ATP et NADPH, H^+ sont consommés par la synthèse des glucides. Ce processus de production d'ATP couplé au transport des électrons est dénommé photophosphorylation ou phosphorylation photosynthétique.

Ces réactions s'effectuent dans les thylacoïdes et permettent le transfert des électrons jusqu'au couple $\text{NADP}^+ / \text{NADPH}$ pour permettre la synthèse d'ATP.

La lumière est captée par les pigments (caroténoïdes, xanthophylles) présents dans la cellule, transformée puis transmise par résonance à la chlorophylle **b**, puis à la chlorophylle **a** qui cède un électron à un accepteur.

Réactions biochimiques de synthèse des sucres (« phase sombre »)



La carboxylation désigne l'addition d'une molécule de CO_2 à une molécule organique présente. Ce gaz carbonique peut être atmosphérique ou dissout dans l'eau, il pénètre par les stomates dans la feuille.

Les glucides sont élaborés à partir de l'eau et du gaz carbonique. La séquence des réactions mises en jeu constitue le cycle de Calvin. Le CO_2 fixé dans les voies de carboxylation est libéré, repris par la Rubisco et converti en glucose à travers une suite de réactions enzymatiques au niveau du stroma du chloroplaste. Le cycle de Calvin se divise en deux phases :

- Les réactions de synthèse des hexoses.
- Les réactions de régénération du ribulose 1,5 bisphosphate (RUBP), accepteur du CO_2 .

Il existe trois voies d'assimilation du CO_2 employées par les végétaux. La production maximale de matière sèche d'un couvert végétal, hors facteur limitant, est fonction de la quantité de rayonnement intercepté par la culture et de l'efficacité de conversion de ce rayonnement en biomasse. Les cultures en C_4 ont des efficacités de conversion des rayonnements supérieures aux espèces en C_3 . Les cultures en C_4 présentent des potentiels de production plus élevés sous réserve d'être adaptées aux conditions climatiques locales afin d'intercepter le maximum du rayonnement.