



© Omniscience

La biomasse

La biomasse est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique, végétale ou issue des êtres vivants. Elle comprend donc aussi tous les déchets organiques.

Elle est très utilisée, notamment pour produire de la chaleur. Elle représente environ 10% de l'énergie primaire mondiale et se trouve souvent dans les circuits non commerciaux. Pour environ 2,6 milliards d'habitants, elle représente quasiment la seule source d'énergie.

Auteurs

Christian Ngô
(CEA, Écrin)

Jean Bonal
(Écrin)

« La biomasse ne représente qu'une faible part de la consommation énergétique des pays riches, qui parlent pourtant beaucoup d'énergies renouvelables. »

Sur la Terre, plus de 90% de la biomasse est d'origine végétale. Parmi les sources d'énergies utilisées, le bois a été l'une des premières. Son exploitation a commencé il y a environ 500 000 ans, lorsque l'homme a découvert le feu. Il a utilisé le bois pour se chauffer et cuire ses aliments bien avant de maîtriser l'écriture. La cuisson des aliments a permis à l'organisme de mieux les assimiler, ce qui a eu un impact positif sur le développement de l'intelligence humaine.

Si, dans un sens générique, le terme « biomasse » désigne l'ensemble de la matière vivante, depuis le premier choc pétrolier l'usage veut que ce terme soit réservé aux produits organiques végétaux et animaux destinés à des fins énergétiques ou agronomiques. Ainsi, les acteurs du traitement des déchets englobent-ils sous cette dénomination l'ensemble des formes naturelles ou modifiées des matières organiques d'origine végétale ou animale. Il s'agit notamment du bois et de la quasi-totalité de ses résidus, des déchets agricoles et agroalimentaires, des cultures énergétiques, d'une partie des déchets ménagers municipaux et assimilés, des boues des stations d'épuration ou des gaz issus des décharges.

Malgré ses multiples qualités, la biomasse ne représente qu'une faible part de la consommation énergétique des pays riches, qui parlent pourtant beaucoup d'énergies renouvelables. Par contre, les pays les plus pauvres, bien que principaux utilisateurs de la biomasse, ne rêvent que de combustibles fossiles. On se trouve là au cœur d'un véritable paradoxe.

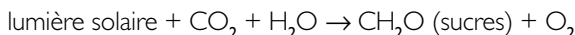
► L'homme et la biomasse

L'homme a toujours eu une relation privilégiée avec la biomasse. En effet, la nourriture est son premier besoin énergétique. Elle est obtenue à partir de l'énergie solaire qui permet aux plantes comestibles de pousser. Celles-ci peuvent être directement consommées par les êtres humains ou les animaux. Ces derniers peuvent servir de nourriture aux premiers en leur fournissant en particulier les protéines qu'ils ne peuvent synthétiser eux-mêmes. Les besoins alimentaires se situent en moyenne autour de 2,7 kilowattheures par personne et par jour. C'est à peu près l'énergie que consomme une ampoule à incandescence de 100 watts allumée nuit et jour. Le métabolisme basal, qui maintient la vie d'un être humain en l'absence de toute activité extérieure, représente une puissance d'environ 80 watts, soit une énergie journalière de 1,9 kilowattheures. Celle-ci permet de faire fonctionner les organes vitaux (cerveau, foie, reins, etc.). C'est peu pour toutes les

fonctions qu'il faut assurer, ce qui montre l'efficacité du vivant. La valeur énergétique des aliments consommés au niveau de la planète représente actuellement environ 500 à 600 Mtep par an, soit de 5 à 6% de la consommation d'énergie primaire mondiale (environ 10 Gtep). Celle-ci n'est bien sûr pas comptabilisée dans le bilan en énergie primaire mais montre que, dans notre civilisation, la nourriture n'occupe plus la place qu'elle occupait pour l'homme primitif. Si l'on ramène la consommation énergétique française par habitant, on trouve environ 150 kWh par jour. Cela comprend la consommation d'un individu (électricité, chauffage, transports, etc.), mais aussi celle de l'industrie et des collectivités. Dans la réalité, cette valeur est supérieure puisqu'une grande partie des produits manufacturés utilisés en France a été fabriquée dans d'autres pays. L'énergie a donc été consommée dans ces derniers. Si l'on ose un rapprochement avec les civilisations antiques, tout se passe comme si un Français avait plusieurs dizaines d'esclaves à son service!

› L'origine de la biomasse

La biomasse est issue directement ou indirectement de la photosynthèse chlorophyllienne dont la réaction de base s'écrit de manière simplifiée et si l'on se ramène à l'atome de carbone :



Cette réaction nécessite un apport énergétique d'environ 500 kJ/mol. Dans la nature, cette énergie est fournie par le rayonnement solaire.

La biomasse est de l'énergie solaire transformée en molécules chimiques complexes que l'on peut utiliser comme source d'énergie. Comme le montre la formule précédente, grâce à la photosynthèse, les végétaux captent l'énergie solaire, absorbent du dioxyde de carbone de l'atmosphère et de l'eau du sol pour croître et fabriquer des hydrates de carbone. Ce processus s'accompagne d'un rejet d'oxygène que les êtres vivants utilisent pour leur respiration, qui se traduit à son tour par un rejet de dioxyde de carbone. Le rendement de la photosynthèse est faible, inférieur en général à 1% dans les pays tempérés. Toutefois, les végétaux sont un bon moyen de stocker l'énergie solaire. Par rapport à d'autres énergies renouvelables qui sont intermittentes comme le solaire ou l'éolien, la biomasse a l'immense avantage d'être aussi un moyen de stockage et cette ressource peut être utilisée à tout moment. Comme la photosynthèse nécessite de grandes quantités d'eau, celle-ci peut être un facteur limitant pour son exploitation.

« **Les végétaux sont un bon moyen de stocker l'énergie du soleil.** »

Le **joule (J)** est l'unité d'énergie du système international. Un **kilojoule (kJ)** est égal à 1 000 joules.

Le **mole (mol)** est l'unité de quantité de matière. Elle correspond à un nombre d'entités élémentaires identiques entre elles (atomes, molécules) égal à $6,022 \cdot 10^{23}$ (nombre d'Avogadro).



© Omniscience

De soleil en soleil ▲

Les végétaux sont un bon moyen de stocker l'énergie du soleil.

ment faible (environ 10^{-9}). On peut illustrer la faible valeur de ce rendement par l'exemple suivant. Si la consommation annuelle d'électricité française (environ 450 TWh) était de l'énergie solaire et que la nature fabriquait du pétrole avec celle-ci, on obtiendrait tout juste la valeur d'un plein d'essence dans cette même année (environ 450 kWh, soit 45 litres d'essence). Ces processus se sont écoulés sur des centaines de millions d'années (et continuent encore aujourd'hui), ce qui a donné naissance aux réserves que l'on exploite.

L'oxygène n'existait pas dans l'atmosphère terrestre originelle. Il a été lentement produit par le processus de photosynthèse qu'utilisent les végétaux pour tirer leur énergie. Les êtres vivants se sont adaptés à la présence d'oxygène bien que ce soit un composé oxydant très réactif, donc toxique. Ils ont développé pour cela le processus de respiration. On a donc un cycle dans lequel la photosynthèse produit de l'oxygène en absorbant du dioxyde de carbone grâce à la chlorophylle et la respiration qui émet du dioxyde de carbone en consommant de l'oxygène grâce à l'hémoglobine. Les cellules utilisant la photosynthèse donnent naissance au monde végétal en captant l'énergie solaire et en utilisant le dioxyde de carbone et l'eau pour fabriquer des hydrates de carbone. Les cellules utilisant la respiration comme source d'énergie absorbent des substances énergétiques et l'oxygène rejeté par les végétaux. Elles ont donné naissance aux bactéries et au monde animal. La fabrication et la consommation d'oxygène s'équilibrent pour donner la concentration actuelle d'oxygène dans l'atmosphère. S'il n'y avait ni photosynthèse, ni respiration, la concentration en oxygène diminuerait lentement car la Terre est constituée d'un grand nombre de substances réductrices qui absorberaient peu à peu ce gaz. Il faudrait environ 4 millions d'années pour que cet oxygène disparaisse complètement. Si l'on supposait maintenant que la photosynthèse s'arrête, les végétaux ne produiraient plus d'oxygène ni de carbone pour le sol. La respiration continuerait à consommer de l'oxygène et le

« La Terre est constituée d'un grand nombre de substances réductrices qui absorberaient peu à peu l'oxygène s'il n'y avait ni photosynthèse, ni respiration. »

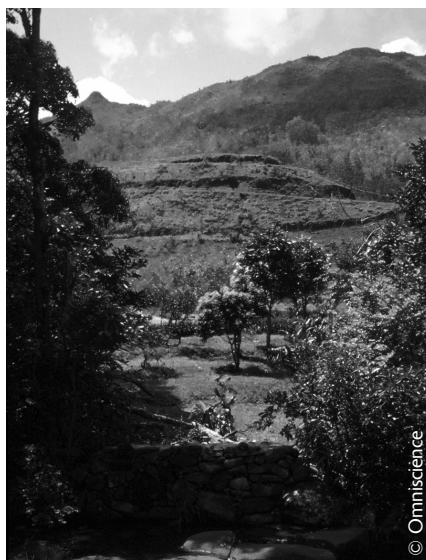
pourrissement des végétaux en surface ferait disparaître le carbone associé. En une vingtaine d'années, ce carbone serait consommé et la concentration d'oxygène diminuerait d'environ 1 %.

► Une ressource potentielle d'énergie

On peut donner quelques estimations relatives aux ressources potentielles en biomasse. Pour un rayonnement moyen de 160W/m^2 et un rendement de 100% pour la photosynthèse, il serait en théorie possible de produire 3000 tonnes par hectare et par an de matières organiques sèches correspondant à une masse de carbone de 1 225 tonnes par hectare et par an. En réalité, plusieurs facteurs viennent réduire le rendement de la photosynthèse dans ses phases initiales. Les pertes de rendement sont dues notamment à la limitation du spectre des longueurs d'onde absorbées, aux défauts d'absorption de la lumière, ou encore à la limite intrinsèque du rendement quantique de la photosynthèse. Par conséquent, le rendement maximal de la photosynthèse ne dépasse pas en théorie 9%. Aux limitations précédentes viennent se rajouter d'autres effets, comme la **photorespiration** qui conduit, quand elle se produit, à une perte supplémentaire. En définitive, le rendement théorique maximal de la photosynthèse est compris entre 5,5 et 9%, mais dans les conditions réelles d'exploitation de la ressource les rendements sont encore plus faibles. Pour des conditions idéales de culture, ceux-ci sont compris entre 2 et 5%. Ramenés à la productivité annuelle, ils ne sont compris qu'entre 0,5 et 2%.

Dans une région donnée et pour une espèce végétale donnée, il n'est pour le moment guère envisageable de pouvoir profondément modifier le rendement de la photosynthèse. Pour accroître la quantité de biomasse disponible à des fins énergétiques, il faut envisager d'autres stratégies comme l'utilisation de la totalité de la plante, l'augmentation des rendements par apport extérieur d'énergie (engrais notamment) ou, plus naturellement, la multiplication du nombre de cycles de culture.

Avec certaines hypothèses réalistes, on peut estimer à 1,3 tep par an et par habitant l'énergie disponible dans les forêts et prairies de notre planète, et à 0,72 tep par an sur les terres arables. Si l'on ramène ces chiffres au territoire français, on obtient respectivement 0,4 et 0,75 tep par an et par habitant.



© Omniscience

^ Une richesse insoupçonnée

La Terre est baignée d'énergie solaire et couverte d'une couche de biomasse végétale plus ou moins épaisse en fonction des conditions climatiques et géographiques. Sous les climats tempérés, ces conditions sont optimales!

La photorespiration (consommation d'oxygène et libération de dioxyde de carbone sans production d'énergie) est un processus biochimique qui se déroule parallèlement et de façon couplée à la photosynthèse. La photorespiration se met en route lorsque la plante vient à manquer de dioxyde de carbone pour la photosynthèse.

« Certaines cultures peuvent être dédiées à la production d'énergie avec de meilleurs rendements. »

Par ailleurs, les surfaces disponibles sont données dans le tableau ci-dessous qui expose la répartition des surfaces disponibles pour produire la biomasse végétale en France et dans le monde (en million d'hectares).

	Surface totale	Forêts	Prairies	Terres arables	Fraction de terres utilisables
monde	15 000	4 100	3 100	1 600	59%
France	54,9	15,3	13	18,4	85%

L'intensité moyenne de la lumière solaire varie aussi selon l'endroit où l'on se trouve. Par exemple, le voisinage de la mer Rouge est soumis à un rayonnement de 300 W/m² en moyenne, le Brésil et l'Australie à 200 W/m², les États-Unis à 185 W/m² et la France à 130 W/m².

Certaines cultures peuvent être dédiées à la production d'énergie avec de meilleurs rendements. Les taillis à courte révolution plantés de peupliers produisent ainsi, par hectare, 3 à 4 fois plus de bois qu'une forêt classique dans les cas les plus favorables.

Quelques exemples > d'utilisation des sols en France

En 2005, on peut estimer qu'environ 4% de la fraction des terres utilisables en France pouvait être dévolue à des cultures énergétiques (total des surfaces en jachère et des terres en friches). (D'après Agreste, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2006)

	Surfaces agricoles utilisées en 2005 (en hectares)	Production en 2005 (en tonnes)
surface agricole utilisée	29 556 652	–
jachères	1 297 949	–
forêts	15 313 396	–
blé tendre	4 859 319	34 840 200
blé dur	421 428	2 037 765
seigle	31 447	1 490 111
orge et escourgeon	1 602 409	10 336 550
avoine	1 111 378	506 091
maïs	1 662 640	13 711 964
sorgho	50 824	263 835
triticale	330 376	1 790 670
total céréales	9 180 124	64 101 853
colza et navette	1 226 077	4 486 027
toumesol	643 729	1 517 824
soja	57 477	142 341
total oléagineux	1 939 694	6 172 272
total protéagineux	423 865	1 711 168
betterave industrielle	379 682	31 073 335

› L'utilisation énergétique de la biomasse

La biomasse végétale peut être utilisée pour produire de l'énergie. On l'utilise principalement comme biocombustible mais on peut aussi fabriquer des biocarburants. Plus de la moitié du bois exploité dans le monde est utilisée comme biocombustible. Sa densité énergétique est environ trois fois inférieure à celle du pétrole et dépend beaucoup de l'humidité qu'il contient. En clair, il vaut mieux brûler du bois sec pour avoir un meilleur rendement !

Il faut rappeler un certain nombre de caractéristiques intéressantes liées à la biomasse. Tout d'abord, c'est une énergie qui s'accumule sur une ou plusieurs saisons, et pour qu'elle soit considérée comme renouvelable, il faut replanter l'équivalent de ce qui est exploité. Ce n'est pas toujours le cas dans certains pays. Une exploitation durable plutôt qu'à court terme de la biomasse est donc nécessaire. Ensuite, c'est une énergie qui contribue peu à l'augmentation de l'effet de serre dans la mesure où la fraction de carbone libérée sous forme de CO_2 au moment de la combustion correspond, en partie, à celle absorbée au moment de la phase de croissance du végétal. De plus, hormis les déserts, c'est une énergie assez bien répartie à la surface de la Terre. Enfin, par comparaison aux énergies fossiles, c'est une énergie qui est en général disponible à faible coût si elle est valorisée près de sa source. Ce coût peut être même très faible, voire négatif dans le cas où la ressource représente un déchet à éliminer.

La richesse des structures chimique et physique de la biomasse conduit à des traitements différents selon les cultures pour en exploiter l'énergie. Ainsi peut-on distinguer plusieurs catégories. La biomasse lignocellulosique, comme le bois ou la paille, contient beaucoup de substances peu hydrolysables en l'état des technologies actuelles. On la valorise par voie sèche avec des procédés thermochimiques ou par voie humide avec des procédés de fermentation méthanique. La biomasse riche en substances glucidiques (céréales, betterave, canne à sucre, etc.) est très largement utilisée à des fins alimentaires, elle s'hydrolyse facilement et se valorise avec des procédés de fermentation ou de distillation. La biomasse oléagineuse est riche en lipides. Elle est aussi utilisée à

Des cultures plus ou moins rentables

Le rendement des cultures à des fins énergétiques est très variable. Par exemple, pour obtenir 10 Mtep, soit la consommation actuelle de biomasse en France, il faut cultiver soit 10 millions d'hectares de colza, soit 7 millions d'hectare de blé, soit 5,5 millions d'hectare de maïs, soit 3 millions d'hectare de betterave, soit 4 millions d'hectare de triculture blé-maïs-betterave. Ces cultures ont respectivement des rendements énergétiques, en tep par hectare et par an, de 1, de 1,3 à 1,4, de 1,7 à 1,9, de 3,5 à 3,8 ou de 2,5 pour la triculture. Rappelons toutefois que la superficie de la France est de 55 millions d'hectares, dont 15 millions sont cultivables...

La réaction d'**hydrolyse** consiste à séparer des corps sous l'action de l'eau.

La **fermentation méthanique** est une décomposition par action bactérienne. Elle se fait en l'absence d'air et utilise de la biomasse humide. Elle permet d'obtenir un mélange gazeux principalement constitué de méthane et de dioxyde de carbone.

Le **diester**, ou diméthylester, est un biodiesel qui peut être obtenu à partir de la graine de colza, par exemple.

L'**ETBE**, ou éthyl-tertio-butyl-éther, est produit par réaction de 47% de bioéthanol et 53% d'isobutène. Il est utilisé comme additif oxygéné dans la formulation des essences sans plomb.

La **liqueur noire** est un résidu obtenu dans le processus de fabrication du papier. Elle est tirée des fermenteurs au cours de la production de sulfate ou de pâte de soude. Son contenu en énergie provient essentiellement de la lignine extraite du bois au cours de sa réduction en pâte à papier.

La combustion en **lits fluidisés** consiste à mélanger des particules combustibles à du sable, élément caloporteur. Ensuite, on soumet ce mélange à un flux gazeux intense, ce qui le fluidifie et favorise les réactions de combustion.

des fins alimentaires (colza, tournesol, arachide, etc.). Ses huiles ou ses dérivés permettent de produire des biocarburants.

La biomasse peut être en général valorisée par les voies thermique ou alimentaire, par les fermentations méthanique et alcoolique, par la synthèse de carburants (**diester**, **ETBE**, etc.), ou par la production de matériaux. Pour les utilisations énergétiques, on peut utiliser des conversions thermochimiques ou biologiques. Les trois principales voies de conversion thermochimique sont la combustion, la pyrolyse et la gazéification. Les deux principales voies de conversion biologique sont la fermentation méthanique (ou digestion anaérobie) et la fermentation alcoolique.

» La combustion

La combustion directe est la forme la plus commune de valorisation énergétique de la biomasse. Elle produit de la chaleur qui peut être utilisée directement ou convertie en partie en électricité. Il est intéressant de l'utiliser dans un dispositif de cogénération qui permet d'exploiter à la fois la chaleur et l'électricité produites. C'est ce qui est fait dans les industries qui ont des besoins en chaleur importants (fabrication du papier; raffinerie, agroalimentaire, etc.) ou dans celles qui ont des sous-produits combustibles comme des déchets de bois ou de la **liqueur noire**. La cogénération est aussi utilisée pour valoriser les déchets urbains.

La combustion de la biomasse produit aussi de l'eau et du dioxyde de carbone. L'excès d'air utilisé est un paramètre important de la réaction. Dans la pratique, il peut varier de 25 à 100% selon la technique de combustion. Dans ce contexte, les technologies en **lits fluidisés** sont de plus en plus répandues du fait de leurs performances.

La biomasse est souvent humide. Ainsi, même après un séchage naturel de deux ans, le bois contient-il encore 15 à 20% d'humidité. Il ne brûle pas mais subit trois transformations successives lorsqu'on le chauffe. Il évapore d'abord l'eau qu'il contient, ce qui consomme de l'énergie. Puis, au-dessus de 200 °C, il émet des gaz qui brûlent et produisent de l'énergie. Enfin, il se transforme en charbon de bois qui représente environ 30% du poids sec initial. Le charbon de bois a été dans le passé un combustible important car sa densité énergétique est deux fois supérieure à celle du bois et il dégage moins de fumées lors de sa combustion. Toute une activité dédiée à la fabrication du charbon de bois existait avant que l'on utilise les combustibles fossiles.

La combustion du bois génère des particules dans ses fumées et des composés organiques volatils. Du monoxyde de carbone et des oxydes d'azote peuvent aussi être émis, selon les conditions de combustion. Dans tous les cas, elle émet du dioxyde de carbone. Mais,