

## Chapitre 3

# Les Ressources d'Énergie Renouvelable

### 3.1 Introduction

Les Sources d'énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions *sources d'énergie renouvelables* ou *énergies d'origine renouvelable* qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

L'humanité n'a disposé, pendant la plus grande part de son histoire, que des énergies renouvelables pour couvrir ses besoins énergétiques. À l'époque paléolithique, les seules énergies disponibles étaient la force musculaire humaine et l'énergie de la biomasse utilisable grâce au feu; mais de nombreux progrès ont permis d'utiliser ces énergies avec une efficacité grandissante (inventions d'outils de plus en plus performants).

Le progrès le plus significatif a été l'invention de la traction animale, qui est survenue plus tard que la domestication des animaux. On estime que l'homme a commencé à atteler des bovins à des araires ou des véhicules à roues durant le quatrième millénaire avant J-C. Ces techniques inventées dans l'ancien croissant fertile ou en Ukraine ont par la suite connu un développement mondial. L'invention de la marine à voile a été un progrès très important. Celle des moulins à eau et moulins à vent a également apporté une énergie supplémentaire considérable. A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était encore assurée par des énergies renouvelables. L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin des moulins à eau et de l'énergie éolienne au 19<sup>ème</sup> siècle; les moulins à eau et à vent ont disparu, remplacées par les minoteries industrielles. Au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders). Par contre, l'énergie hydraulique a connu un nouvel âge d'or avec l'hydroélectricité, apparue en Suisse, Italie, France et États-Unis à la fin du

---

19<sup>ème</sup> siècle.

Au 19<sup>ème</sup> siècle également, François de Larderel met au point en Italie les techniques d'utilisation de la géothermie ; en 1911, la première centrale géothermique était construite à Larderello. Dans les années 1910, les premiers chauffe-eau solaires individuels apparaissent en Californie. Puis, les éoliennes sont réapparues, bénéficiant de techniques plus performantes issues de l'aviation ; leur développement a pris de l'ampleur à partir des années 1990. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque décollent au début des années 2000.

## 3.2 Énergie solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les microondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire. Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

### 3.2.1 Énergie solaire thermique

Dans les conditions terrestres, le rayonnement thermique se situe entre 0.1 et 100 micromètres. Il se caractérise par l'émission d'un rayonnement au détriment de l'énergie calorifique du corps émetteur. Ainsi, un corps émettant un rayonnement thermique diminue son énergie calorifique et un corps recevant un rayonnement thermique augmente son énergie calorifique. Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0.4 et 0.8 micromètre. Ainsi, en entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle ici d'énergie solaire thermique. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée par exemple pour réchauffer ou sécher des objets (y compris le corps humain) en les exposant au soleil. L'énergie thermique, captée à l'aide de concentrateur thermiques ou capteurs solaires, peut être utilisée directement ou indirectement :

- directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires),
  - indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou héliothermodynamique))
-

L'énergie solaire thermique peut également être utilisée pour la cuisine. Apparue dans les années 1970, la cuisine solaire consiste à préparer des plats à l'aide d'un cuiseur ou d'un four solaire. Les petits fours solaires permettent des températures de cuisson de l'ordre des 150 °C, les paraboles solaires permettent de faire les mêmes plats qu'une cuisinière classique à gaz ou électrique. À grande échelle, la Fondation Desertec construit dans le Sahara des centrales solaires thermiques à concentration. D'après ses ingénieurs, les déserts de la planète reçoivent toutes les 6 heures du soleil l'équivalent de ce que consomme l'humanité chaque année et quelques centaines de km<sup>2</sup> d'étendue désertique pourrait satisfaire l'ensemble des besoins énergétiques de la planète.

### 3.2.2 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques:

**Les modules solaires monocristallins** possèdent le meilleur rendement au m<sup>2</sup> et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.

**Les modules solaires polycristallins** représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.

**Les modules solaires amorphes** sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

## 3.3 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable.

---

C'est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Éole (en grec Aiolos), le maître des Vents dans la Grèce antique.

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières:

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...);
- Production d'énergie électrique; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Le rendement énergétique de même que la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent; dans la plage de fonctionnement de l'éolienne, la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

Les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la plage de 11 à 90 km/h (3 à 25 m/s), que ce soit celles d'Enercon, celles d'AREVA pour l'offshore, ou celles d'ALSTOM, pour les éoliennes terrestres comme en offshore. Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'utilisation massive d'éolien nécessite, soit une énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène, méthanation ou air comprimé).

À la fin de 2013, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 318.6 GW, en augmentation de 35.6 GW en un an (+12,4 %), dont 11.3 GW pour l'Union européenne; le marché a connu un net ralentissement pour la première fois dans l'histoire de l'ère industrielle de l'éolien: les installations en 2012 avaient totalisé 44.2 GW, dont 11.8 GW pour l'UE; cette baisse du marché est due surtout à l'écroulement du marché des États-Unis (1084 MW contre 13078 MW en 2012), à cause de la reconduction très tardive du système d'incitation fédéral; le marché européen a légèrement fléchi en raison de l'adoption par plusieurs gouvernements de nouvelles politiques moins favorables; par contre, la Chine a représenté à elle seule près de la moitié du marché mondial: 16.1 GW. L'Europe a eu en 2013 une part de marché de 34.1 %, derrière le marché asiatique (51.2 % contre 35.6 % en 2012), et loin devant le marché nord-américain qui a chuté à 9.3 % contre 31.4 % en 2012. L'Europe reste cependant en tête pour la puissance totale en

---

fonctionnement: 38.3 % contre 36.4 % pour l'Asie et 22.3 % pour l'Amérique du Nord.

Les fermes éoliennes en mer (éolien offshore) prennent une part grandissante dans cet essor, en particulier en Europe qui atteint fin 2013 une puissance installée totale d'éolien offshore de 6 949 MW, dont 3 657 MW au Royaume-Uni.

Les éoliennes ont produit 446 TWh en 2011, soit 2 % de la production d'électricité mondiale (22 126 TWh). Voici l'historique des installations annuelles de 1996 à 2013:

En 2012, la production mondiale d'électricité éolienne a atteint 534.3 TWh, en augmentation de 18.3 % par rapport à 2011; son taux moyen annuel d'accroissement depuis 10 ans a été de 26.1 %; elle représente 11.4 % de la production totale d'électricité renouvelable et 2.4 % de la production mondiale d'électricité. L'énergie éolienne est la deuxième source d'électricité renouvelable après l'hydraulique. L'Europe de l'Ouest est en 2012 la première région productrice avec 36.8 %, devant l'Amérique du Nord (28.6 %) et l'Asie de l'Est et du Sud-Est (23.3 %); l'Asie du Sud (5.6 %), l'Europe Centrale (2.1 %) et l'Océanie (1.5 %) ont amorcé leur démarrage depuis quelques années; l'Amérique centrale (0.7 %), l'Afrique du Nord (0.4 %), l'Afrique Subsaharienne (0.04 %) et le Moyen-Orient (0.04 %) sont encore peu impliqués. La production a été multipliée par dix en une décennie; les taux moyens de croissance sur 10 ans sont particulièrement élevés en Asie de l'Est et du Sud-Est (+57.5 % par an) et en Amérique du Nord (+30.4 %), qui rattrapent rapidement l'Europe de l'Ouest (+18.4 %). En 2012, la filière éolienne a été, après l'hydraulique, la seconde par sa contribution à la croissance de la production d'électricité renouvelable (30 %).

Le plus grand problème de l'énergie éolienne est son caractère intermittent: elle n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques. Une éolienne produit, en moyenne, l'équivalent de moins de 20 % du temps. La plupart du temps, la nécessité d'assurer la constance de la production électrique oblige à coupler un parc éolien avec d'autres sources d'électricité disponibles immédiatement, à la demande telles que les énergies hydrauliques (barrages) ou fossiles (centrales à charbon ou à gaz) par exemple. Si bien que, dans l'optique d'un réseau incluant également des énergies fossiles, la production électrique n'est au bout du compte pas exempte d'émissions de dioxyde de carbone mais néanmoins moins polluante qu'un réseau d'énergie totalement fossile.

Le vent est une ressource aléatoire, bien que d'autres estiment qu'à l'échelle de temps de l'ordonnement d'un réseau électrique la météo soit suffisamment sûre pour que la ressource soit prévisible.

### Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité

---

par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage.

### **Stockage hydraulique**

Une méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler avec des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes. Cette technique est à la fois la plus simple et la plus prometteuse après le simple couplage à un potentiel hydraulique supérieur ou égal au potentiel éolien, comme c'est le cas dans le partenariat Danemark-Norvège.

- Une ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70 % pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Les 30 % restants sont envoyés sur le réseau.
- En périodes de moindre vent, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydro-électrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau.
- Le principe peut être inversé avec un puits vidé de son eau grâce aux surplus d'électricité, et rempli gravitairement en alimentant en eau des turbines. Pour les petites installations, il est envisageable d'utiliser les retenues collinaires créées par les exploitants agricoles à des fins d'irrigation;
- La source de production éolienne doit être utilisée en priorité pour recharger les lacs d'accumulation quand la consommation est assez faible, la souplesse de l'hydro-électricité permettant ensuite une modulation précise de la production. Dans un tel cadre, c'est la capacité hydroélectrique qui est déterminante, ce qui fait de l'éolien un appoint à l'hydroélectricité;
- La capacité de pompage-turbinage ne doit pas être saturée par une autre source de production.

### **Stockage par transformation**

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité. Dans la nacelle des éoliennes, au lieu d'un alternateur se trouve donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir.

Du point de vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique sur le pic de consommation, où l'électricité est payée plus cher, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers stockage puis stockage vers électricité).

---

Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide.

En 2009, les Néerlandais de Dutch Rainmaker ont réalisé une éolienne dont l'énergie est utilisée pour condenser la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant. Le premier prototype a ainsi condensé 500 l d'eau douce en 24 h.

En 2010, l'institut allemand Fraunhofer explique dans un communiqué avoir réussi à mettre au point un processus de production de méthane à partir de la production en excès des éoliennes. L'électricité est utilisée pour faire une électrolyse d'eau, produisant de l'oxygène (rejeté) et de l'hydrogène. Cet hydrogène est recombinaison à du CO<sub>2</sub> (sans doute par réaction de Sabatier) pour produire du méthane, qui est réintroduit dans le circuit de distribution public de gaz naturel. La première partie de cette réaction était déjà utilisée par Poul La Cour en 1890.

## 3.4 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes: chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique lié au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du Soleil, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur Terre (énergie éolienne, énergie des vagues, la biomasse, les énergies fossiles, etc.). Sous l'action du Soleil, l'eau s'évapore des océans et forme les nuages qui se déplacent au gré des vents. Des abaissements de température au-dessus des continents provoquent la condensation de la vapeur d'eau. La pluie et la neige (les précipitations) alimentent ainsi les glaciers et l'eau des rivières qui s'écoulent petit à petit dans les océans, c'est le cycle de l'eau.

L'énergie hydraulique est connue depuis longtemps. C'était celle des moulins à eau, entre autres, qui fournissaient de l'énergie mécanique pour moulinier le grain, fabriquer du papier ou puiser de l'eau pour irriguer les champs par exemple.

Dès les années 1900, les progrès technologiques de l'hydroélectricité suisse sont à l'origine d'intenses spéculations boursières sur les sociétés hydroélectriques, qui profitent aux implantations industrielles dans les Alpes.

L'énergie hydraulique peut être convertie directement en énergie mécanique, par exemple en utilisant la force de l'eau d'un ruisseau pour faire tourner la roue d'un moulin à eau

---

ou d'une noria. L'énergie hydraulique peut aussi être convertie en une autre énergie (fréquemment l'électricité):

- une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute et du débit d'un cours d'eau;
- une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées;
- une hydrolienne utilise celle des courants marins;
- l'énergie des vagues peut aussi être exploitée.

### 3.5 Énergie marine

L'énergie marine ou énergie des mers est l'énergie renouvelable extraite du milieu marin. Les mers et océans représentent 71 % de la surface du globe. Ils pourraient en théorie fournir 30 000 GTep à partir du seul rayonnement solaire sur leur surface, 40 GTep par la force du vent en mer, dont une partie se transforme en houle et vagues, et 2 GTep par la force des courants de marées dus principalement à l'attraction lunaire.

Il faut ajouter à cela l'énergie potentielle liée aux différences de température selon la profondeur et celle des gradients de salinité dans les estuaires. À titre de comparaison, pour 2050, les besoins de l'humanité sont estimés à 16.5 GTep.

Pendant longtemps les énergies des mers ont été les oubliées des budgets de recherche.

Les énergies marines incluent:

- l'énergie marémotrice, due aux mouvements de flux et de reflux des marées;
- l'énergie hydrolienne, exploitant les courants marins;
- l'énergie houlomotrice, produite par le mouvement des vagues;
- l'énergie thermique des mers, exploitant les gradients de température entre les eaux de surface et les eaux profondes;
- l'énergie osmotique, basée sur les différences de salinité des eaux douces et salées;
- l'éolien off-shore, éolien situé en mer sur des plateformes ancrées ou flottantes;
- l'énergie de la biomasse marine;
- une variante sous-marine du cerf-volant supportant une turbine (c'est ici le courant marin qui maintient le cerf-volant fixé par un câble au fond et qui exécute une trajectoire permanente en forme de huit.

### 3.6 Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois

---

l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple: en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

L'augmentation de la consommation et du coût des différentes énergies ainsi qu'une certaine volonté d'émettre moins de gaz à effet de serre la rendent plus attrayante.

### 3.6.1 Types de géothermie

On distingue habituellement trois types de géothermie:

- la géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température;
- la géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C); avec plusieurs approches développées et explorées depuis les années 1970:
  - géothermie des roches chaudes sèches (Hot Dry Rock ou HDR pour les anglophones), basée sur la fracturation et la création d'un *échangeur thermique profond* qu'il faut périodiquement décolmater;
  - géothermie des roches naturellement fracturées ou Hot Fractured Rock (HFR);
  - géothermie stimulée EGS (Enhanced Geothermal System), imaginée aux États-Unis en 1970.
- la géothermie très profonde à très haute température.

Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma

Un des témoignages les plus anciens date de 2 000 ans avant Jésus-Christ. Il cite les îles Lipari (Italie) qui exploitaient déjà une eau naturellement chaude pour leurs thermes. Les techniques modernes de forage ont permis d'atteindre des eaux chaudes jusqu'à 12 262 m de profondeur avec le forage sg3 qui dans les régions froides de la péninsule de Kola (Russie) exploite une eau à plus de 180 °C.

Les Philippines produisent 28 % de leur électricité à partir de la géothermie et l'Islande a atteint la production de 100 % de son électricité par l'hydroélectricité et la géothermie.

---

### 3.6.2 Principes

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium).

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température appelé gradient géothermique qui définit que plus on creuse et plus la température augmente; en moyenne de 3 °C par 100 mètres de profondeur.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur (même si le flux de puissance obtenu diminue avec la profondeur, puisque l'essentiel de ce flux provient de la radioactivité des roches de la croûte terrestre).

Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable (dans certaines limites), car elle dépend

- pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie se chiffre en milliards d'années;
- pour la géothermie de surface, des apports solaires.

Elle est en général diffuse et rarement concentrée, avec un flux moyen de 0,1 MW/km<sup>2</sup> et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie) a l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne). Elle peut quand même contribuer à un réchauffement local des milieux là où les calories seront relarguées si elles le sont massivement.

## 3.7 Biomasse

Le pouvoir calorifique de la matière organique, qui n'est que la moitié environ de celui du charbon, peut servir à produire de l'électricité à partir de procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, combustion directe) ou à partir de procédés biochimiques (digestion anaérobie ou méthanisation). La biomasse ligneuse, c'est-à-dire le bois, la bagasse (fibre de la canne dont on a extrait le sucre), la paille, etc., est essentiellement utilisée dans des

---

procédés à base de combustion. En Europe, ce sont les industries de transformation du bois (principalement les usines de pâte à papier) qui, en brûlant leurs résidus, produisent de la chaleur et de l'électricité (c'est la cogénération). Les meilleurs rendements sont en effet obtenus dès qu'il y a une production simultanée de chaleur, les 2/3 de l'énergie potentielle du combustible étant transformés en chaleur. L'utilisation de 1 tonne de bois permet d'éviter le dégagement dans l'atmosphère de 1 tonne de CO<sub>2</sub> d'origine fossile. La biomasse se caractérise généralement par une faible teneur en cendres et sa quasi absence de soufre. De plus le CO<sub>2</sub> rejeté par la combustion de la biomasse dans les centrales est réabsorbé par les végétaux pour leur croissance (photosynthèse): faisant partie d'un véritable cycle, il ne s'ajoute pas à celui déjà contenu dans la biosphère, contrairement au carbone issu des combustibles fossiles. Valoriser le biogaz en électricité et/ou chaleur évite l'émission de méthane (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère.

le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agrocarburant). Cette filière, correspondant à des objectifs de développement durable, est en développement rapide. L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive pour l'usage des ressources (terres arables, eau, etc), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc. De plus, bien que présentant de nombreux avantages écologiques et en termes de développement local, elle peut être polluante (CO, CO<sub>2</sub>, fumées, goudrons) si mal utilisée ou si la biomasse utilisée est polluée par des métaux lourds, radionucléides, etc. (sachant que les ressources fossiles sont également naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois). Comme dans le cas des ressources fossiles, il s'agit d'une forme de stockage de l'énergie solaire par l'intermédiaire du carbone, provenant originellement du CO<sub>2</sub> capté par les plantes ou le phytoplancton. En brûlant, elle libère ce CO<sub>2</sub>, comme le charbon, le gaz ou le pétrole, mais ce carbone a récemment été extrait de l'atmosphère via la photosynthèse et peut être à nouveau capté par les plantes, alors que ce processus a eu lieu il y a des millions d'années pour les ressources fossiles et que les plantes et algues marines ne suffisent plus à absorber le carbone issu des hydrocarbures fossiles. La biomasse peut être tirée de la nature ou cultivée (agrocarburants, agrocombustibles). La biomasse est utilisée par l'homme depuis qu'il maîtrise le feu. Elle reste la première énergie renouvelable utilisée dans le monde, pour le chauffage et la cuisson des plats de cuisine, mais essentiellement dans les pays peu industrialisés. L'énergie tirée de la biomasse intéresse à nouveau les pays riches confrontés au dérèglement climatique et à la perspective d'une crise des ressources en hydrocarbures fossiles. C'est une filière en

---

développement rapide, y compris sous des formes industrielles avec les agrocarburants et le bois énergie à usage industriel. Avec 30.7% du total mondial, les États-Unis sont le premier producteur d'électricité à partir de la biomasse, devant l'Allemagne et le Brésil (7.3 %). Dans l'absolu, le bilan quantitatif CO<sub>2</sub> d'une installation est nul quand toute l'énergie qu'il a fallu dépenser pour extraire du combustible de la biomasse provient elle aussi de la biomasse. En régime industriel établi, il est possible d'utiliser de la biomasse pour le fonctionnement de l'installation, en veillant à ne pas libérer d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane CH<sub>4</sub> notamment qui a un pouvoir réchauffant environ 21 fois plus important que le CO<sub>2</sub> à court terme, mais qui disparaît plus vite que celui-ci. Une fuite sérieuse dans une installation de méthanisation rendrait son bilan GES très négatif. Son introduction dans les systèmes énergétiques contribue à réduire (en termes de bilan global) les émissions de gaz à effet de serre, voire à restaurer certains puits de carbone (semi-naturels dans le cas des boisements et haies exploités).

---