

UMBB- Faculté des Sciences

Département de Chimie

Energies

Renouvelables.

Cours et QROC

Soraya DEMIM

Avant-propos

Cet ouvrage en Energies Renouvelables est un outil pédagogique, destiné aux étudiants LMD en science de la matière et sciences technologique. Plus particulièrement, les étudiants en Chimie de l'Environnement, en Génie Civil et en Génie Mécanique. Il peut être aussi utile à un plus large publique soucieux de revenir à des notions fondamentales.

Le manuscrit comporte quatre chapitres : Biomasse et production de chaleur, Géothermie et production de chaleur, Système solaire actif et Energie éolienne.

Chaque chapitre est conçu comme un cours, où les notions et les concepts sont présentés dans un ordre aussi logique que possible. Un développement théorique et un développement technologique sont abordés pour chaque technique.

Ce support ne peut se substituer à un cours magistral, mais peut l'accompagner et consolider les connaissances acquises durant le cursus.

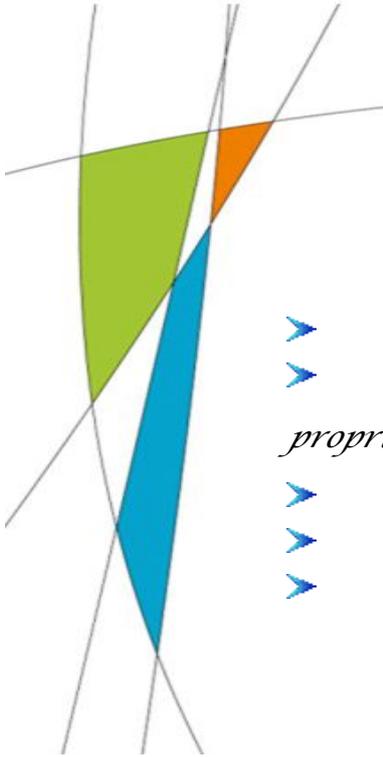
Que cet ouvrage soit une aide précieuse à nos étudiants.

Enfin, je souhaite la réussite et le succès à nos étudiants.

Soraya DEMIM

Chapitre 1

Biomasse et production de chaleur



Objectif

Ce chapitre sera consacré à

- *Définir la biomasse.*
- *Caractériser Le bois : Composition chimique et propriétés physique.*
- *Comprendre le principe de la combustion.*
- *Déterminer les paramètres d'une bonne combustion.*
- *Distinguer les équipement de combustion du bois.*

Biomasse et production de chaleur

1. Biomasse

Au sens large, la « biomasse » désigne l'ensemble de la matière vivante. Ce terme englobe toutes les matières organiques provenant de formes biologiques diverses : végétaux ou animaux, de la culture aux déchets. La biomasse végétale comprend des plantes très diverses, les oléagineux, les graminées proches du maïs, la cannes à sucre, le bois, etc. Quant aux déchets, ils sont soit solide soit liquide.

Il existe plusieurs filières de conversion de la biomasse en énergie. On retrouve :

- La combustion directe, c'est-à-dire brûler le bois ou la biomasse, et utiliser l'énergie thermique ainsi produite.
- La combustion par pyrolyse, libérant de l'énergie thermique et divers produits.
- La fermentation alcoolique (glucose en bio-éthanol).
- La fermentation aérobie, ce procédé permet de récupérer de la chaleur.
- La synthèse de biométhane.

La biomasse est classée couramment, selon le taux d'humidité, en deux grandes familles :

- La « biomasse sèche » qui comprend la « biomasse ligneuse » (bûches, rémanents forestiers et petits bois de haie, produits connexes de la transformation du bois, élagages (taillage) urbains et des bords de routes, bois de rebut (déchet), ainsi que les pailles et autres résidus de récoltes ;
- La « biomasse humide » qui regroupe les flux de déchets organiques issus de l'activité agricole (déjections animales), des industries agro-alimentaires (distilleries, etc.) et des collectivités (déchets verts, boues d'épuration, ...).

2. Source

On distingue trois types de ressources de biomasse selon leur provenance : le bois-énergie, les cultures énergétiques dédiées et les coproduits agricoles ou agro-industriels.

2.1.1. Filière bois

Trois principales filières sont à considérer :

- Les ressources issues de l'exploitation forestière et des espaces boisés qui génèrent des plaquettes forestières (bois déchiqueté). Celles-ci proviennent de résidus d'élagage (ébranchage, taillage) ou de défrichage (debroussaillage) qui peuvent ainsi contenir des écorces, des branches, des brindilles, des feuilles ou encore des aiguilles. Les opérations entrant en jeu dans leur production sont l'ébranchage et la découpe, le débardage (transport), le déchiquetage et le séchage ;
- L'industrie du bois de première transformation (scieries) et seconde transformation (menuiseries, tourneries) qui génère des écorces, des copeaux et sciures, des plaquettes, des granulés.
- Les centres de tri ou de déchets industriels banals qui permettent la valorisation de bois de rebut (déchet) non souillé : emballages industriels (caisses, emballages), palettes et emballages légers (cageots et cassettes pour fruits et légumes).

Important

- Une plate-forme de préparation est nécessaire pour produire du combustible à partir de bois de rebut non souillé. Elle se compose d'un pré-broyage grossier, d'un broyage fin, d'un déferrailage et d'un criblage.
- Les combustibles bois se présentent donc sous des aspects très divers (plaquettes, écorces, sciures, copeaux, chutes, granulés, etc.) et avec des caractéristiques différentes, notamment en termes de taux d'humidité, de granulométrie et de taux de cendres.

2.1.2. Produits et sous-produits agricoles

Le gisement des produits agricoles est assez important et complémentaire. Il s'agit de produits restants après les valorisations actuelles des cultures agricoles : pailles, issues de silo, solides de nettoyage...

Les sous-produits de l'industrie des agro-ressources est un réservoir constitué de sous-produits issus des utilisations industrielles des produits agricoles. Il s'agit par exemple des tourteaux (de colza ou de tournesol principalement), des coques ou des noyaux de fruits, de grignons d'olives, etc.

Toutes ces matières peuvent être très différentes en termes de caractéristiques physico-chimiques (humidité, taux de cendres,).

2.1.3. Cultures énergétiques dédiées

Les cultures dédiées sont des cultures annuelles dont l'objectif principal est leurs utilisations à des fins énergétiques. On distingue :

- Les espèces herbacées pérennes : ont une durée de vie comprise entre 10 et 20 ans et sont récoltées annuellement. La première récolte est réalisée deux ans après la plantation.
- La culture de bois à croissance rapide : ont une durée de 20 ans approximativement, plantées à haute densité. Les souches sont récoltées tous les 2 ou 3 ans. Il s'agit le plus souvent de peupliers, saules, etc.

3. Biomasse et combustion : cas bois.

3.1. Bois

3.1.1. Origine

De nombreux gisements de bois sont disponibles et peuvent conduire à des combustibles après une phase de conditionnement :

- Exploitation de la forêt (bûcheronnage, élagage, débardage...);
- Première transformation du bois (scieries, panneaux, etc.);
- La seconde transformation du bois (menuiseries, ameublement, construction);
- Industrie des emballages : palettes, caisses...;

- Entreprises de démolition et de rénovation;
- Décharges et déchetteries.

a. La forêt

La disponibilité de bois mobilisable en forêt est liée à différents facteurs qui sont l'âge des peuplements et leurs caractéristiques (essences...), l'emplacement et l'accessibilité des terrains (pentes, accès...), mais aussi le marché de l'offre et de la demande.

La forêt peut proposer du bois de feu, des houppiers (branches et cimes) et des branches d'élagage.

b. Sous-produits des entreprises de la filière bois

Les résidus de l'industrie du bois peuvent être séparés en résidus massifs (chutes...) et en résidus fractionnés (écorces, sciures ...).

Les résidus massifs, préalablement transformés en plaquettes, sont utilisés en chaufferie automatique alors que les résidus fractionnés requièrent des installations plus spécifiques.

c. Sous-produits des entreprises de récupération d'emballages

Trois types de produits peuvent être utilisés à des fins énergétiques : les emballages industriels (caisses, emballages, ...), les palettes et caisses palettes et les emballages légers (cageots et cassettes). Ces combustibles ne peuvent être utilisés dans leurs états initiaux, des traitements spécifiques doivent être réalisés au préalable tels le déferraillage et le broyage.

3.1.2. Composition et propriétés du bois

3.1.2.1. Composition chimique

Le bois, matière organique, est composé de trois polymères : la cellulose, la lignine et les hémicelluloses.

- La cellulose polymère à haute poids moléculaire, l'élément de base de sa composition est un motif cellobiose (deux glucoses), se présente sous forme de fibrilles. Constitue la structure de la paroi cellulaire du bois, représente de 40 à 50 % de la masse de matière sèche.
- La lignine, polymère phénolique, représente 16 à 33% de la masse sèche selon les espèces.
- Les hémicelluloses, polymères ramifiés à basse masse molaire, sont constituées de sucres en C5 (pentoses) ou C6 (hexoses) et peuvent représenter de 10 à 30 % de la masse de matière sèche.

En plus de ces éléments constituant la structure du bois, le bois peut contenir, en masse, de 5 à 30 % de matière extractibles (tanins, huiles résines, etc.) et jusqu'à 1 % de constituants inorganiques, contenant en particulier du calcium, du sodium, du potassium et de la silice. Ces minéraux peuvent être contenues dans le bois lui-même (quantités variables selon les essences) ou provenir des impuretés accrochées aux écorces.

La composition du bois varie selon : l'essence, les conditions de croissance, l'âge de l'arbre, période d'abattage et la nature du sol

L'analyse élémentaire du bois révèle la composition suivante : carbone, hydrogène et oxygène, dont les proportions suivantes : Carbone : 50 % ; Hydrogène : 6 % ; Oxygène : 44 %.

La « molécule bois » a pour formule approchée : $\text{CH}_{1,44} \text{O}_{0,66}$. Le bois peut également contenir de l'azote, 1 % en masse en moyenne, et des composés minéraux.

3.1.2.2. Caractéristiques physiques

Les bois de chauffage se présentent sous forme de bûches et sous forme divisée : plaquettes, sciures, copeaux... Les principales caractéristiques physiques citées ci-dessous ne constituent pas une liste exhaustive.

a. Taux d'humidité

Le bois peut contenir une quantité importante d'eau (plusieurs fois sa masse sèche). C'est un facteur déterminant à son utilisation comme combustible. L'humidité impacte sur la conservation, sur la masse volumique et sur le contenu énergétique du bois.

La quantité d'eau contenue dans le bois se mesure relativement à la masse de bois, on exprime cette quantité par :

- La masse de bois anhydre H_s :

$$H_s = 100 \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{anhydre}}}$$

- La masse de bois humide H_b :

$$H_b = 100 \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{humide}}}$$

Les combustibles ont une humidité variant de 10 à 60 % selon qu'il s'agit de bois séché ou de bois juste abattu.

b. Masse volumique

Le bois est un matériau poreux présentant une très forte variabilité. On définit :

- La masse volumique vraie du matériau ou masse volumique de la matière ligneuse qui est pratiquement indépendante de l'essence : $\rho = 1530 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- La masse volumique apparente du bois massif. Celle-ci dépend de la porosité du bois et de son humidité. La masse volumique apparente du bois anhydre peut varier de $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les essences les moins denses à plus de $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ pour les plus denses ;

- La masse volumique du bois divisé (cas le plus fréquent pour le bois combustible). Celle-ci dépend de la masse volumique du bois, de son humidité et surtout de sa granulométrie.

c. **Granulométrie**

La granulométrie est la répartition des particules, composant un combustible, par taille. Cette caractéristique intéresse uniquement les combustibles divisés et en aucun cas le bois sous forme de bûches.

d. **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)**

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est la quantité d'énergie maximale que peut générer la combustion d'une unité de masse d'un combustible sec alors que l'eau produite par cette combustion est condensée.

Le PCS du bois varie peu selon l'essence et approche les 20 000 KJ.kg⁻¹. En tenant compte de la composition élémentaire du bois, le PCS peut être exprimé par l'une des deux formules :

$$\text{PCS} = 43730 X_c - 350,9$$

$$\text{PCS} = 47500 X_c - 2380$$

Avec : PCS exprimé en kJ.kg⁻¹, X_c fraction massique en carbone.

e. **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)**

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est la quantité de chaleur maximale fournie par une unité de masse de combustible sec lorsque l'eau formée lors de la combustion est à l'état de vapeur. Le PCI est en lien étroit avec le PCS. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\text{PCI}_{\text{anhydre}} = \text{PCS} - L_v \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2M_{\text{H}}} \times x_{\text{H}}$$

Avec : L_v enthalpie de vaporisation de l'eau, M_{H₂O} masse molaire de l'eau, M_H masse molaire de l'hydrogène atomique, x_H fraction massique d'hydrogène dans le combustible anhydre.

Le PCI dépend de l'essence et de l'humidité du combustible. Plus le taux d'humidité du bois est élevé plus le PCI est bas.

f. Teneur en cendre

La teneur en matières minérales de la biomasse est généralement appelée « teneur en cendres » ; elle comprend les matières minérales composant la biomasse auxquelles s'ajoutent la terre, le sable et autres contaminants (métaux lourds, ...). La teneur en cendres est le rapport entre le poids de cendres par rapport au poids total du combustible sec, exprimée en pourcentage. Sa valeur est comprise entre 0,5 et 3,5 %. Dans certains cas, elle peut atteindre la valeur de 8 %. La composition et la concentration des cendres dépendent de plusieurs facteurs tels : la nature du bois, l'âge, la composition du sol, la saison et le mode de manutention. Connaître la composition des cendres est importante avant toute élimination ou utilisation éventuelle.

g. Capacité thermique massique à pression constante

La capacité thermique massique à pression constante est définie comme la quantité d'énergie à fournir pour élever une unité de masse (kg) d'une unité de température (°C ou K) à pression constante.

La capacité thermique massique à pression constante du bois dépend de sa température et de son humidité, est indépendante de sa masse volumique. La variation de la capacité thermique massique du bois anhydre ($C_{p\text{anhydre}}$) peut être donnée par la relation suivante :

$$C_{p\text{anhydre}} = 0,1031 + 0,003867 T$$

Avec : $C_{p\text{anhydre}}$ exprimé en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, T température thermodynamique en K.

h. Conductivité thermique

La conductivité thermique indique la densité de flux de chaleur traversant une épaisseur unité de matériau siège d'un gradient de température ; exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. La conductivité thermique du bois dépend de la masse volumique apparente du bois et de son humidité, elle est proportionnelle à l'humidité et à la masse volumique apparente. La conductivité thermique est quasiment la même dans les directions tangentielle et radiale, mais 2,5 fois plus élevée dans la direction axiale.

$$\lambda_{\text{axial}} = 2,5 \lambda_{\text{radial,tangentiel}}$$

La conductivité transverse est évaluée par la relation suivante :

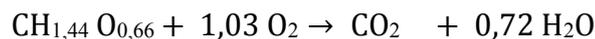
$$\lambda_{\text{radial,tangentiel}} = d (0,200 + 0,0052H_s) + 0,024$$

Avec : d densités du bois par rapport à l'eau, Hs humidité sur sec du combustible (en %).

3.2. Combustion

3.2.1. Notions de base

La combustion est l'oxydation complète des éléments contenus dans le bois qui conduit à la formation de CO₂ et de H₂O, ainsi qu'à la production de chaleur. Le bois doit être chauffé par une source externe pour libérer des gaz combustibles, qui s'enflammeront lorsque la température sera suffisante. Environ 85 % de la masse de bois brûle ainsi sous forme de gaz : le bois est chauffé et à partir de 300 °C des gaz sont dégagés (phase de pyrolyse), qui au contact de l'air sont oxydés. Les 15 % restants brûlent par combustion hétérogène : de l'air (Oxygène) est injecté dans les braises et capte le carbone constitutif pour dégager du CO₂. L'équation de combustion est donnée comme suit :



Dans les conditions réelles de combustion, le comburant utilisé est l'air. L'air est constitué de 21 % d'O₂ et de 79 % de N₂. L'équation de combustion devient alors :



En résumé, la combustion du bois se déroule comme suit : séchage du combustible ; dégradation thermique (pyrolyse) et combustion des gaz ; oxydation lente du résidu charbonneux.

L'étape primaire de combustion est la pyrolyse qui produit à partir de 300 °C les gaz inflammables, le charbon de bois et les goudrons. Les réactions de combustion ont lieu soit en phase gazeuse, avec production d'une flamme, soit en surface du charbon de bois et sont responsables de l'incandescence.

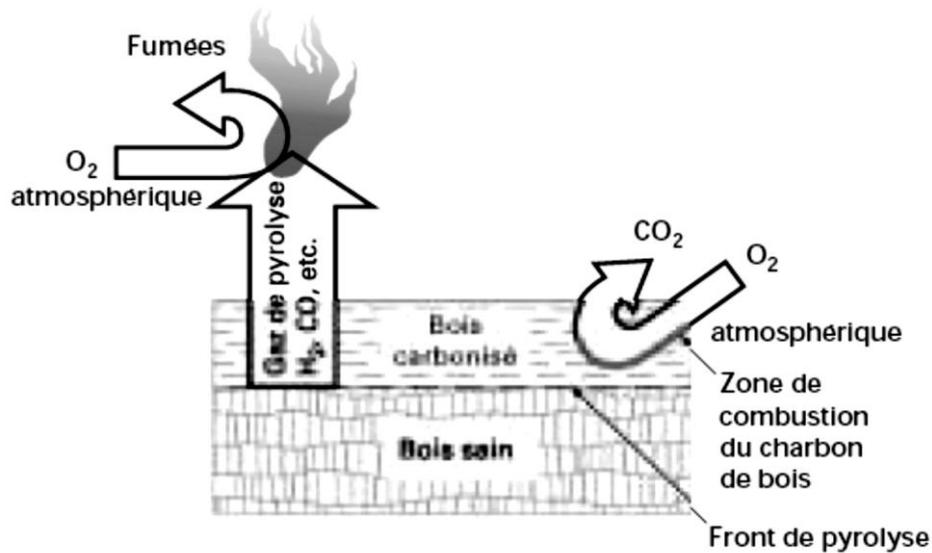
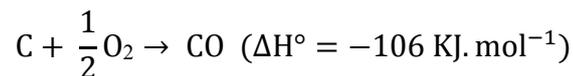


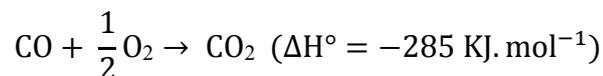
Figure 1 : Schéma de principe de la combustion (Deglise et Donnot, 2004)

Le bois sain chauffé commence à se pyrolyser à partir de sa surface en donnant des gaz combustibles et un résidu solide combustible. Les produits de la pyrolyse migrent alors vers la surface au travers du charbon de bois. La combustion ou la transformation chimique du gaz et du charbon commence lorsque des oxydants ou des réducteurs sont mis en contact des produits de la pyrolyse.

La combustion se fait à des températures comprises entre 1500 et 2000 °C, le produit primaire de la première réaction est le CO, selon l'équation suivante :



Le CO s'oxyde ensuite au cours du refroidissement des gaz selon la réaction :



Il est important de laisser le temps aux réactions d'oxydation de CO d'agir, sinon ce CO se retrouvera entraîné dans les fumées et devenir ainsi un polluant rejeté dans l'atmosphère.

Dans les cas de mauvais réglage de la combustion par défaut d'air ou par un temps de séjour faible, une partie du carbone des gaz se retrouve dans les fumées et une quantité importante de suies est formée.

Dans la flamme, la température élevée peut conduire à la formation de NO_x par oxydation de l'azote atmosphérique.

En ce qui concerne la réaction d'oxydation du charbon de bois, elle conduit à la formation de CO₂ par oxydation du CO, oxyde primaire de la combustion du carbone.

Le résidu de la combustion comporte des cendres, constituées majoritairement de SiO₂ et d'oxyde d'alcalins ou d'alcalino-terreux (K₂O, CaO, MgO) et des oxydes métalliques de fer, etc., dont la température de fusion est voisine de 900 °C.

Important

- En amont de la combustion, dans certains cas, la biomasse subit des prétraitements tels un séchage et une réduction de taille.
- La présence de métaux alcalins et de chlore dans la biomasse peut induire des dépôts de particules, de la corrosion et à la formation de dioxines et de furannes. Pour éviter ces problèmes le bois peut être lavé à l'eau en exposant la biomasse soit naturellement à la pluie soit dans une installation industrielle.

3.2.2. Paramètre de combustion

Pour améliorer le processus de combustion, il est nécessaire de maintenir une température suffisante dans le foyer (pour faciliter l'évaporation de l'eau et produire des gaz légers lors de la dégradation thermique) et de maîtriser l'apport d'oxygène dans la chambre de combustion. De ce fait, 4 règles de base doivent être respectées (règles des 4T) :

- **Température** : pour avoir une combustion totale, il est nécessaire d'atteindre un niveau de température minimal qui fournisse à la fois une énergie suffisante pour entretenir une dégradation complète du bois et les réactions d'oxydation des gaz produits. En première approche, une température de 600 °C apparaît comme un minimum dans le cas du bois, 800 à 900 °C étant certainement le niveau idéal.
- **Teneur en oxygène** : pour oxyder tous les gaz produits par la pyrolyse du bois, une teneur en oxygène (d'air) suffisante est nécessaire. Dans le cas du bois, il est courant d'injecter entre 50 et 150 % d'air en plus que le minimum nécessaire ; l'air est nécessaire pour :
 - brûler le résidu carboné, l'air primaire ;
 - brûler les gaz combustibles, l'air secondaire.

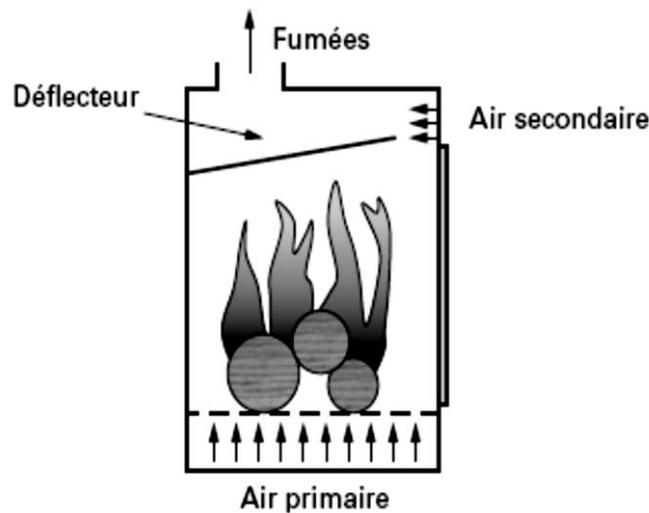


Figure 2 : Alimentation en air primaire et secondaire
(Autret et Rogaume, 2011)

- **Turbulence** : pour favoriser les contacts entre les gaz de pyrolyse et l'oxygène une optimisation des mélanges est nécessaire. Des dispositifs de déflecteurs et d'injection d'air secondaire sont utilisés ; ces dispositifs permettent d'augmenter les débits et les vitesses d'air secondaires.
- **Temps de séjour** : pour finir la combustion, il est nécessaire d'avoir un long temps de contact entre les gaz combustibles chauds et l'air comburant. Un réseau de chicanes est placé sur les installations modernes pour prolonger le temps de contact entre les gaz et l'air.

Important

- Dans les conditions de combustion avec excès d'air, tout l'oxygène n'est pas utilisé et une partie est retrouvée dans les fumées.
- La combustion incomplète du bois produit des polluants tels le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, les poussières et les hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- Il est recommandé de brûler du bois ayant une humidité sur brut inférieure à 20 %. Dans la réalité, les bois utilisés ont des taux d'humidités compris entre 20 et 30 %, voire plus.
- Le secteur domestique est responsable de la production d'une quantité importante de pollution car les systèmes de chauffage ne disposent pas de filtres.

3.3. Rendement des installations de combustion

Le rendement thermique d'une installation de combustion est le rapport de la quantité de chaleur utile sur la quantité totale de chaleur libérable par le combustible (pouvoir calorifique) exprimé en pourcent.

Rendement installation

$$= \frac{\text{quantité de chaleur disponible pour le chauffage de la pièce}}{\text{quantité totale de chaleur produite par l'appareil}}$$

Une conception et un dimensionnement appropriés de ces installations est en faveur d'un rendement élevé. La règle des 4T doit être respectée ; une température suffisante dans le foyer et une maîtrise de l'apport d'oxygène dans la chambre de combustion (débit d'air et points d'injection) sont plus que nécessaires. Le débit de fumées doit aussi être pris en considération lors de la conception.

Un bon rendement garantit aussi une économie des ressources et une réduction des émissions d'imbrûlés (polluants gazeux et particules fines).

3.3.1. Appareils de combustion du bois

Les différents appareils de chauffage au bois peuvent être classés selon :

- Le type de chargement (manuel ou automatique),
- Le type de chauffage (appoint ou relié à un réseau),
- Le type de foyer de combustion.

A. Classement par type de chargement

- Chargement manuel. Installation de faible puissance : cheminées, poêles et inserts, alimentées par des bûches. Le fonctionnement dépend de l'utilisateur.
- Chargement automatique. Installation à rendement plus important que ceux des appareils à chargement manuel grâce à une meilleure combustion. Le combustible utilisé est de type divisé : granulés, plaquettes,...

B. Classement par type de chauffage

- Appareils d'appoint retrouvés dans de nombreuses habitations : poêles, inserts, cheminée, cuisinières. La chaleur est transmise par convection et rayonnement autour de l'appareil.
- Appareils reliés au réseau de chauffage central : chaudières. Le fonctionnement est manuel ou automatique.

C. Classement par type de combustion

Les procédés de combustion dépendent du combustible utilisé et de la taille de l'appareil. On distingue :

C1. Appareils divisés

Les appareils divisés regroupent les appareils de type cheminées, poêles, inserts, foyers fermés, cuisinières.

- *Cheminées*

Le rendement est de l'ordre de 10 %, ce rendement peut être amélioré par l'ajout d'un dispositif spécifique de récupération de chaleur.

- *Poêles*

Les poêles sont utilisés pour chauffer essentiellement une pièce ou pendant les mois d'hiver. La transmission de la chaleur dans une pièce se fait par convection. D'autres pièces peuvent être aussi chauffées par la distribution d'air chaud dans des gaines.

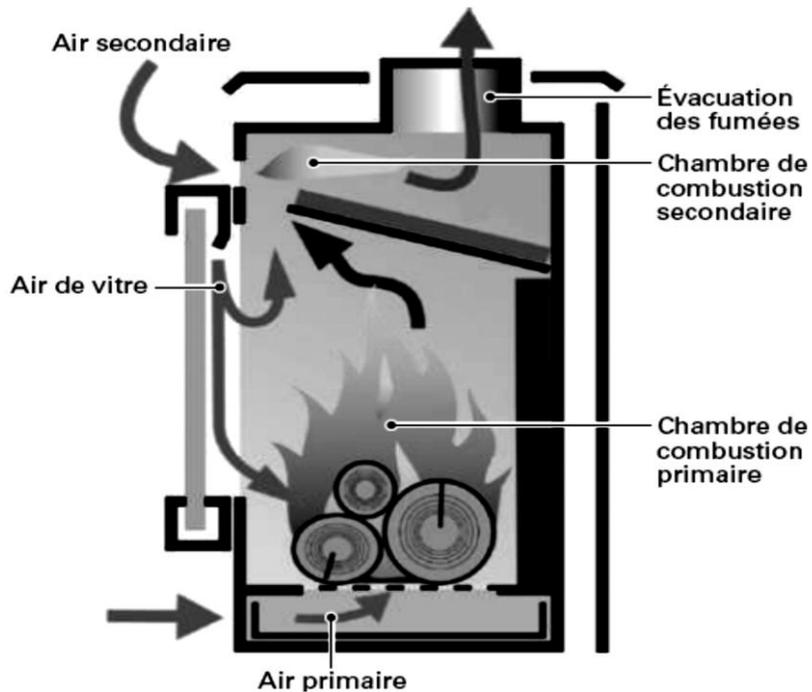


Figure 3 : Vue en coupe d'un poêle (Rogaume, 2005)

- *Cuisinières*

Cet appareil assure à la fois la cuisine et le chauffage. Son utilisation nécessite le chargement de bois, le décendrage et le ramonage. Ce dispositif ne chauffe que la pièce où il est installé ; son rendement est de l'ordre de 30 à 70 %.

- *Foyers fermés. Inserts*

Le foyer fermé et l'insert sont des appareils conçus en usine, de conception similaire mais dont les dimensions sont différentes. Le foyer est installé dans une maison puis recouvert selon le style désiré, l'insert est placé directement dans une cheminée existante.

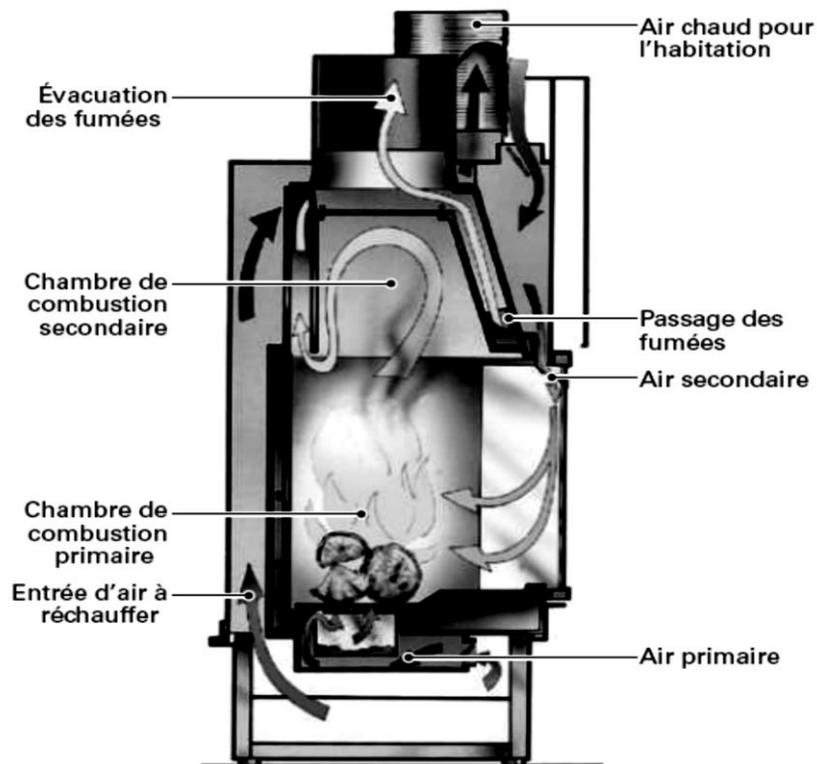


Figure 4 : Vue en coupe d'un foyer fermé (Rogaume, 2005)

Le rendement de ces appareils est de l'ordre de 40 à 80 % grâce à un apport contrôlé d'air ; favorisant ainsi une bonne combustion. De plus, il est possible de récupérer plus de chaleur par l'utilisation d'un échangeur dans lequel de l'air ou de l'eau circuler.

Une mauvaise utilisation de ces équipements engendrera une surchauffe de la pièce concernée et un mauvais chauffage du reste de la maison.

Un entretien régulier de ces installations est nécessaire : chargement et déchargement.

C2. Chaudières à bûches

Les chaudières sont des installations reliées à un chauffage central, un fluide caloporteur, de l'eau, est chauffé et mis en circulation dans un réseau de conduite et de radiateurs.

Il existe plusieurs technologies : les semi-inversées, la combustion inversée ou la combustion de type turbo ; toutes ces classes sont à tirage naturel à l'exception des chaudières type turbo. La différence principale réside dans le principe de la combustion et du parcours des gaz dans la chambre de combustion.

- ***Chaudière à combustion directe***

Dans ce type de modèle, les buches sont posées directement sur la grille, placée juste au-dessus du fond de la chaudière. Les cendres sont récupérées aisément au-dessous de la grille. L'air primaire, nécessaire lors de la première phase de combustion, passe à travers la grille. De l'air secondaire est injectée au-dessus du monticule de buches pour favoriser la combustion complète des gaz. Les fumées sont évacuées via un échangeur (lames d'eau) vers la cheminée.

- ***Chaudières à combustion semi-inversée***

La chaudière à combustion semi-inversée permet une recirculation des gaz de combustion dans la chambre, permettant ainsi une meilleure oxydation des gaz avec un temps de combustion plus élevé. Les besoins en air primaire sont réglés en fonction des besoins de chauffage. A la sortie de la chambre primaire, de l'air secondaire est injecté pour finir l'oxydation.

Les rendements thermiques sont avantageusement améliorés par ce procédé, peuvent atteindre la valeur de 80 %.

- ***Chaudières à combustion inversée***

Dans le cas de ces chaudières, l'air primaire pénètre dans la chambre par le haut et la combustion se fait au travers de la grille, le bois étant disposé sur la grille. L'air secondaire est injecté sous la grille. Le rendement thermique de ces installations est important de l'ordre de 85 %.

Aussi, il est important de veiller à l'état de la grille ; celle-ci est soumise à de haute température et se détériore plus rapidement.

- ***Chaudières de type turbo***

Ces installations fonctionnent selon le principe des chaudières inversées, avec un tirage forcé assuré par un ventilateur. Le ventilateur assure une double fonction, gère l'apport d'air dans la chambre et force le tirage de la cheminée ; le réglage du ventilateur permet ainsi de répondre aux besoins spécifiques en énergie.

Le rendement thermique de ces installations est de l'ordre de 85 à 90 %. Ces performances fragilisent l'état des grilles, nécessitant un entretien plus important.

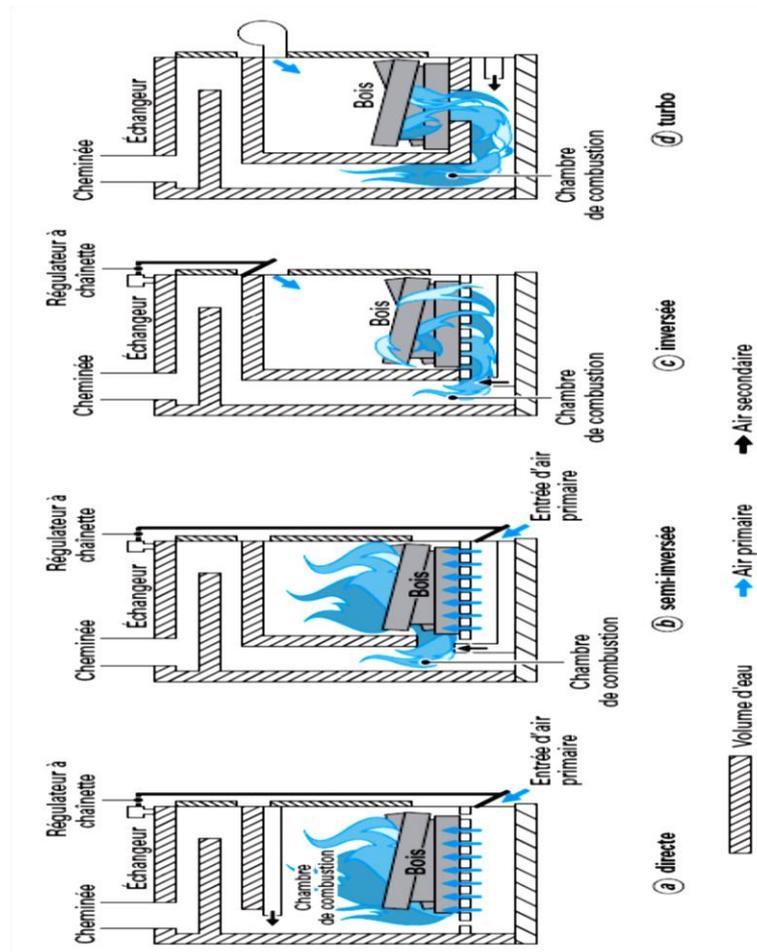


Figure 5 : Différents types de chaudières à bûches (Rogaume, 2005)

C3. Chaudières automatiques

Les chaudières automatiques sont simples à utiliser, mais très peu développées. L'alimentation du foyer à combustion se fait via un tapis ou une vis sans fin depuis un silo. Selon le type de bois brûlé, le type de stockage, le mode de transfert et le type de combustion au sein de la chaudière différences technologies sont retrouvées.

QROC

Vrai ou faux ? Si la phrase est fautive, proposez une réponse correcte.

1. Trois polymères principaux composent le bois : la cellulose, les hémicelluloses et la chitine.
2. La « biomasse humide » regroupe les déchets organiques et biomasse ligneuse.
3. Les hémicelluloses représentent de 10 à 30 % de la masse de matière sèche du bois.
4. Le taux d'humidité d'un combustible a un effet sur sa masse volumique.
5. La masse volumique réelle de la matière ligneuse est indépendante de l'essence.
6. Le pouvoir calorifique inférieur ou PCI est la quantité de chaleur minimale fournie par une unité de masse de combustible sec lorsque l'eau formée par la combustion demeure à l'état de vapeur.
7. La capacité thermique massique à pression constante du bois dépend de son humidité et de sa masse volumique.
8. Les combustibles bois se présentent sous des formes diverses et avec des caractéristiques semblables telles la granulométrie et de taux de cendres.
9. Le secteur domestique est responsable de la production d'une quantité importante de pollution.
10. La transmission de la chaleur par les appareils d'appoint à l'air se fait par conduction et rayonnement autour de l'appareil.

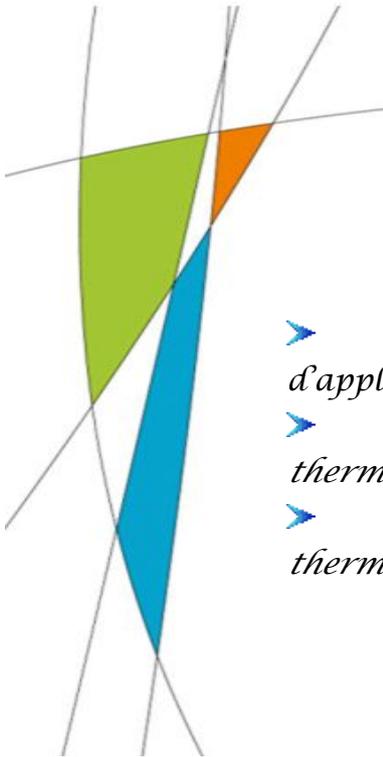
SOLUTION

1. Faux. Les trois polymères qui composent le bois : la cellulose, les hémicelluloses et l'hémicellulose.
2. Faux. La « biomasse humide » regroupe seulement les déchets organiques
3. Vrais.
4. Vrais.
5. Vrais.
6. Faux. Le PCI est la quantité de chaleur maximale fournie par une unité de masse de combustible sec lorsque l'eau formée par la combustion demeure à l'état de vapeur.
7. Faux. La capacité thermique massique à pression constante du bois dépend seulement de sa température et de son humidité et est indépendante de sa masse volumique.

8. Faux. Les combustibles bois se présentent sous diverses formes et présentent des caractéristiques physiques différentes.
9. Vrais.
10. Faux. La transmission de la chaleur par les appareils d'appoint à l'air se fait par convection et par rayonnement autour de l'appareil.

Chapitre 2

Géothermie et production de chaleur



Objectif

Ce chapitre vise à

- Définir la géothermie, ses ressources, ses domaines d'application.
- Comprendre le principe de production de la chaleur thermiques.
- Concevoir les modalités de production de l'énergie thermique.

Géothermie et production de chaleur

1. Introduction

Géothermie, vient du grec « géo », terre et « thermie », chaleur ; est l'exploitation de la chaleur naturelle de la terre pour produire de l'électricité et pour des applications directes de la chaleur. Cette énergie est caractérisée par son caractère concurrentiel et durable.

La production électrique intéresse certaines zones liées au volcanisme récent alors que la filière thermique peut être exploitée pratiquement en tous lieux. La filière thermique comporte de nombreuses applications, du chauffage d'une maison individuelle au chauffage collectif (milliers de logements).

2. Origine de la chaleur

Deux phénomènes importants expliquent l'origine de la chaleur rencontrée dans la croûte terrestre : la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches constituant la croûte et la dissipation de l'énergie « primitive ».

2.1. Désintégration des éléments radioactifs

La désintégration des éléments radioactifs contenus dans la croûte représente plus de 90 % de l'énergie dissipée. Ce concept se base sur le pourcentage supposé d'éléments radioactifs contenus dans les structures terrestres. Certains éléments à courte période ont pu contribuer de façon significative à l'émission de la chaleur primitive, mais ces derniers ont disparu depuis longtemps. D'autres éléments radioactifs sont présents à ce jour, tel l'uranium, le thorium et le potassium ; ils jouent un rôle considérable dans la production de chaleur.

Par leurs désintégrations, le nombre d'éléments radioactifs est en constante décroissance depuis le début de la formation du globe. De ce fait, la chaleur dégagée est en régulière diminution. Les chercheurs estiment que le flux total de chaleur a été divisé par deux depuis l'origine de la vie. Ce phénomène naturel très lent dénote du refroidissement progressif de la planète.

2.2. Dissipation de l'énergie primitive

La Terre s'est formée lors d'une phase d'accrétion, qui correspond à l'agrégation de gaz, de poussières et de divers corps célestes. Durant ce processus, la terre a accumulé une énergie considérable dans sa masse.

La chaleur ainsi stockée se dissipe vers la surface à travers les masses solides par phénomène de conduction et au travers des milieux chauds et visqueux par convection.

La zone supérieure de la lithosphère présente un caractère isolant. Très localement des flux de chaleur importants ont été observés, et à certains points des fuites de lave ont été constatés.

3. Gradient géothermal et flux de chaleur terrestre

Le gradient géothermal G ($K \cdot m^{-1}$) est l'augmentation de la température en fonction de la profondeur. La densité de flux de chaleur terrestre est la quantité de chaleur transmise puis dissipée par unité de surface et de temps ($W \cdot m^{-2}$).

Sur la base du gradient géothermique, Armstead (1978) classe les différentes zones du globe en trois groupes :

- Zones non thermiques, les gradients de température s'échelonnent entre 10 et 40°C par km ;
- Zones semi-thermiques, ayant des gradients de température s'élevant jusqu'à 70 °C par km ;
- Zones hyperthermiques, présentent des gradients de températures plusieurs fois supérieurs à ceux rencontrés dans les zones non thermiques.

La chaleur stockée dans les profondeurs de la terre se transmet vers la surface sous des formes et des intensités variées.

Dans les zones géologiquement calmes, en dehors des frontières des plaques, le transfert d'énergie s'effectue par conduction. Le gradient géothermal est en moyenne d'environ 3k/100 m, et est régulièrement répartie.

Dans les régions géologiquement actives, telles les frontières de plaques, une quantité d'énergie très importante est transmise par convection ; se traduisant localement par des densités de flux de chaleur très élevés. Les zones volcaniques enregistrent un gradient de l'ordre de 50 K par 100 m.

Important

- Les circulations hydrothermales peuvent conduire à d'importantes variations locales du gradient.
- En surface, la température de la terre est étroitement liée à celle de l'environnement.

4. Principaux types de ressources géothermiques

L'énergie calorifique des sous-sols est stockée dans de grands gisements, on retrouve trois ressources : gisements en zones géologiquement stables, gisements en zone géologiquement actives, gisements des roches peu ou pas perméables.

A. Gisements en zones géologiquement stables

Les bassins sédimentaires contenant des aquifères sont composés d'une succession de terrains à caractère poreux et perméables (calcaires, grès, conglomérats, sables, ...). A des profondeurs de l'ordre de 1000 à 2000 m, la densité de flux thermique est en général faible ($0,060 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) et la température du fluide géothermal est comprise entre 50 et 100 °C. Ces gisements sont de grande extension, offrant ainsi une grande continuité horizontale. Les données collectées pour un site peuvent être extrapolé à d'autres sites limitrophes. L'exploitation de ces sites est essentiellement à usages thermiques (chauffage d'habitations, de serres agricoles, pisciculture,...) ; on parle alors de géothermie basse énergie ou basse enthalpie.

Les nappes aquifères peu profondes, de quelques mètres à moins d'une centaine de mètres de profondeur et ayant des températures comprises entre 10 et 20 °C, peuvent être également exploitées. Des pompes à chaleur sont utilisées. Cette technologie est utilisée pour le chauffage et/ou la climatisation d'immeubles. Ce procédé désigne la géothermie très basse énergie.

Important

Les gisements les plus réponsus à la surface du globe terrestre sont de nature basse et très basse énergie.

B. Gisements en zone géologiquement actives

Ce gisement est constitué d'une source de chaleur alimentée par une intrusion magmatique remontant près de la surface. Le fluide est contenu dans le gisement grâce à une couverture imperméable. Il circule à l'intérieur du réservoir en empruntant des fractures. Des sources thermales apparaissent lorsqu'une partie du fluide géothermal remonte vers la surface en traversant les fractures.

Dans les régions à volcanisme récent, où des intrusions magmatiques pénétrant la croûte et atteignant une profondeur proches de la surface (moins de 5 km) sont observé, le gradient géothermal est très élevé (20 K par 100 m).

Dans ces régions et entre 500 et 1500 m de profondeur, on trouve des gisements de haute énergie (haute enthalpie) ou gisements hyperthermiques.

Les fluides géothermaux qu'ils renferment atteignent des températures de l'ordre de 220 à 350 °C, se présentent sous forme de vapeur sèche ou de vapeur humide (mélange d'eau et de vapeur). Ces sources sont utilisées pour produire de l'électricité : grâce à des turbines, la vapeur extraite est détendue.

D'autres terrains volcaniques moins chauds, gradients de 5 à 10 K par 100 m, peuvent être exploités pour usage thermique et pour produire de l'électricité. Ces ressources se présentent sous forme d'eau chaude et dont la température se situe entre 90 °C et 180 °C. Ces réservoirs sont qualifiés de gisements de moyenne énergie.

Important

Les gisements de haute et moyenne énergie n'existe que dans des zones restreintes, zone situées aux frontières des plaques.

C. Gisement des roches peu ou pas perméables

Généralement, les formations rocheuses constituant la croûte terrestre sont peu ou pas perméables car elles renferment une très faible quantité d'eau. Ce faible volume ne permet pas d'extraire la chaleur contenue dans le sous-sol à travers la réalisation des forages.

Deux voies sont exploitées pour ces extractions :

- Installer dans le sol à faible profondeur des capteurs enterrés (réseaux de tubes) dans lequel va circuler, en circuit fermé, un fluide caloporteur. par l'intermédiaire de pompe à chaleur, La chaleur captée est transférée au milieu à chauffer. C'est le domaine de la géothermie de surface ou de la géothermie des pompes à chaleur dites à « capteurs enterrés » ;

- Créer des conditions d'existence de réservoirs géothermiques naturels (par fracturation hydraulique pour augmenter la perméabilité) dans lesquels serait injectée depuis la surface de l'eau sous très forte pression. Un ou plusieurs forages sont réalisés. L'eau chaude est ensuite récupérée après son passage dans le réservoir créé. Ce cas définit le domaine de la géothermie profonde des roches fracturées. Cette technique peut être destinée à la production d'électricité ou au chauffage. Cette procédure n'est pas encore exploitée car la faisabilité technique n'est pas acquise (stade de recherche).

5. Élément d'un gisement géothermal

Pour pouvoir exploiter un gisement géothermal, il faut obligatoirement 3 éléments :

- Une source de chaleur,
- Un mode de prélèvement de la chaleur au niveau de la source,
- Un système de transfert de chaleur de la source vers l'utilisateur.

a. Source de chaleur

Caractérisée par son niveau de température et par la structure du milieu dans laquelle l'énergie est stockée.

La température est fonction du gradient de température du site. Son niveau déterminera les applications possibles : production d'électricité, chauffage direct ou assister par une pompe à chaleur.

b. Mode de prélèvement

- Pour les milieux aquifères, le prélèvement se fait par extraction du fluide du sous-sol. Le réservoir doit pouvoir laisser circuler le fluide.
- Pour les milieux non aquifères, le prélèvement de la chaleur du sous-sol est possible via un échange avec un fluide exogène (sondes géothermiques, roches profondes fissurées).

c. Mode de transfert

Se fait généralement par un forage.

- Pour les réservoirs aquifères, le fluide naturel est le fluide caloporteur. Ce dernier cèdera sa chaleur en surface.
- Pour les sondes verticales, la chaleur est prélevée par l'intermédiaire d'une boucle fermée contenant un fluide caloporteur (eau glycolée ou de la saumure).

- Pour les roches profondes, de l'eau de surface est injectée dans un puits d'injection puis récupérée.

6. Utilisations des ressources géothermales

Les applications de la géothermie sont liées à la température de la ressource. Pour des températures comprises entre 20 et 200 °C, deux types d'applications sont envisagées : jusqu'à environ 110 à 120 °C production de chaleur, et à partir de 120 °C production d'électricité. On retrouve une :

- Production d'électricité par conversion thermoélectrique à partir d'eau/vapeur issus du sous-sol lorsque la température est supérieure à 100°C, ou par échange dans le cas des roches profondes fracturées.
- Distribution de chaleur par réseau de chaleur : exploitation d'aquifères. Utilisation directe de la chaleur pour le chauffage milieu urbain de l'habitat et des équipements associés.
- Utilisation directs autres que réseau de chaleur. Les applications sont nombreuses : culture de serres, piscicultures, piscines, thermalisme, centre de loisirs, ...
- Application assistée par pompe à chaleur sur aquifères peu profonds ou par échange avec le sol : chauffage/climatisation immeubles du secteur tertiaire, petit collectif d'habitation, logement individuel.
- Production de froid : à partir de chaleur il est possible de produire du froid. Des groupes frigorifiques à absorption sont utilisés. Deux types de cycles sont utilisés. Pour des températures inférieures à 0 °C, des cycles à ammoniac-eau sont employés. Pour la réfrigération ou la climatisation, les cycles eau-bromure de lithium sont utilisés. Ces procédés existent en Chine et aux États-Unis.

7. Production d'énergie thermique

7.1. Techniques de captage de la chaleur pour le chauffage

Le système géothermique peut être installé pour un bâtiment neuf ou ancien. Un conduit s'enfonce dans le sol à l'horizontale ou à la verticale, puise la chaleur et la transporte jusqu'à la thermopompe géothermique. Par un changement d'état du fluide caloporteur, la thermopompe capte l'énergie thermique et la redistribue dans le bâtiment par un plancher. Dans le domaine du chauffage, deux techniques sont retrouvées :

- Captage de la chaleur du sol à de faibles profondeurs, technique utilisée pour les pavillonnaire et les petites résidences.
- Captage de la chaleur issue de nappes phréatiques, généralement situées à de grandes profondeurs. Ce procédé est utilisé pour les grands résidentiels.

7.2. Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont des machines qui permettent d'utiliser l'énergie des sources froides (l'air ambiant, l'eau des nappes souterraines, le sol, ...) pour chauffer ou refroidir des structures.

7.2.1. Principe

La chaleur d'une source froide (milieu à basse température) est prélevée puis transférée vers une source chaude (milieu à haute température) via un fluide frigorigène et un travail.

Dans le cas d'une habitation, la source chaude est le milieu à chauffer et la source froide est le milieu extérieur. La chaleur est prélevée soit :

- de l'air ambiant ;
- d'un terrain où est implantée la maison ;
- d'eau d'une rivière passant à proximité ou dans l'eau d'un aquifère souterrain.

7.2.2. Description et fonctionnement

Une pompe à chaleur à compression est une machine thermodynamique qui comprend quatre éléments principaux :

- Un compresseur,
- Deux échangeurs de chaleur : l'évaporateur et le condenseur,
- Un détendeur.

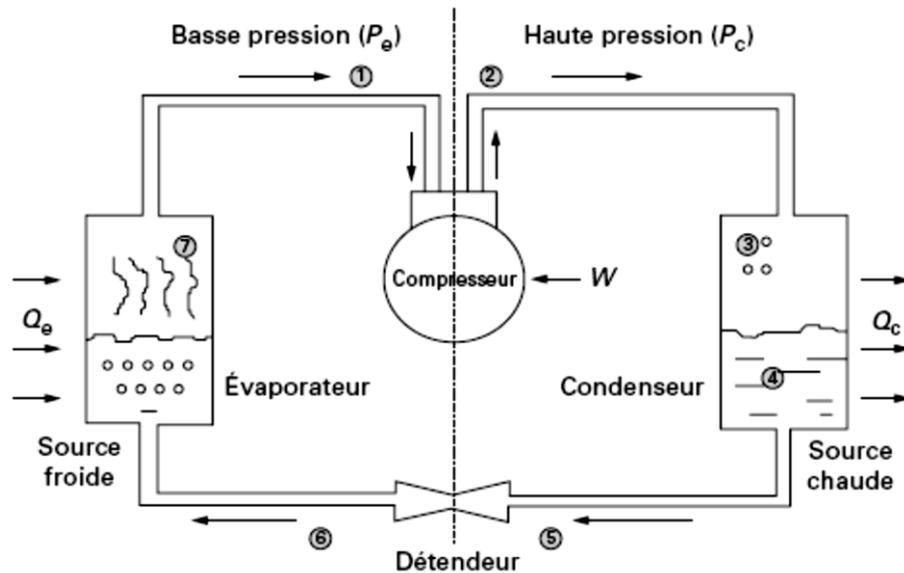


Figure 1 : Schéma de fonctionnement (Laplaige et Lemale, 2010(b))

Un fluide frigorigène traverse ces éléments en circuit fermé et en changeant d'état physique :

- Au niveau de l'évaporateur, le fluide change d'état et se transforme en vapeur.
- Au niveau du compresseur, la vapeur est comprimée ce qui engendre une augmentation de sa température.
- Au niveau du condenseur, la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Le fluide redevient liquide en se condensant.
- Au niveau du détendeur, la pression du fluide est réduite accompagnée d'une forte baisse température. Le fluide est ainsi prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.

Important

- Les fluides frigorigènes ont des caractéristiques spécifiques de changements d'état : température de vaporisation et température de condensation.
- Les volumes de fluides frigorigènes dépendent principalement de la source et du mécanisme d'échanges dans le condenseur et l'évaporateur.
- Les pompes à chaleur peuvent fournir de la chaleur l'hiver et du froid l'été.

7.2.3. Captage de la chaleur du sol à de faibles profondeurs

La chaleur contenue dans les premiers mètres des sols peut être extraite en tout lieu. Deux types principaux de capteurs sont utilisés : les capteurs horizontaux et les sondes verticales.

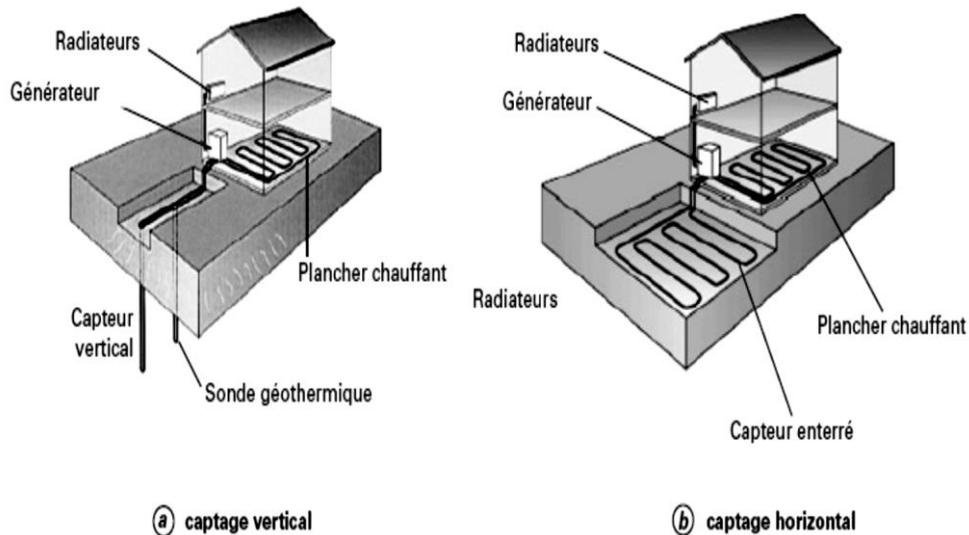


Figure 2 : Pompe à chaleur sur capteurs enterrés avec captage vertical et captage horizontal (Laplaige et Lemale, 2010(c)).

a. Techniques avec capteurs horizontaux

Cette technique de captage de chaleur est appelé également « géosolaire».

Des travaux de décapage ou de tranchées sont réalisés, sur une surface de 1,5 à 2 fois la surface à chauffée et à une profondeur d'environ de 60 m, pour enfouir les capteurs. Le capteur, tuyauteries en polyéthylène d'un diamètre extérieur d'une vingtaine de mm, est constitué par une ou plusieurs boucles. Grâce à un circulateur, de l'eau glycolée est mis en mouvement en circuit fermée.

Dans le cas des systèmes à détente directe des tubes en cuivre gainés de polyéthylène sont utilisés.

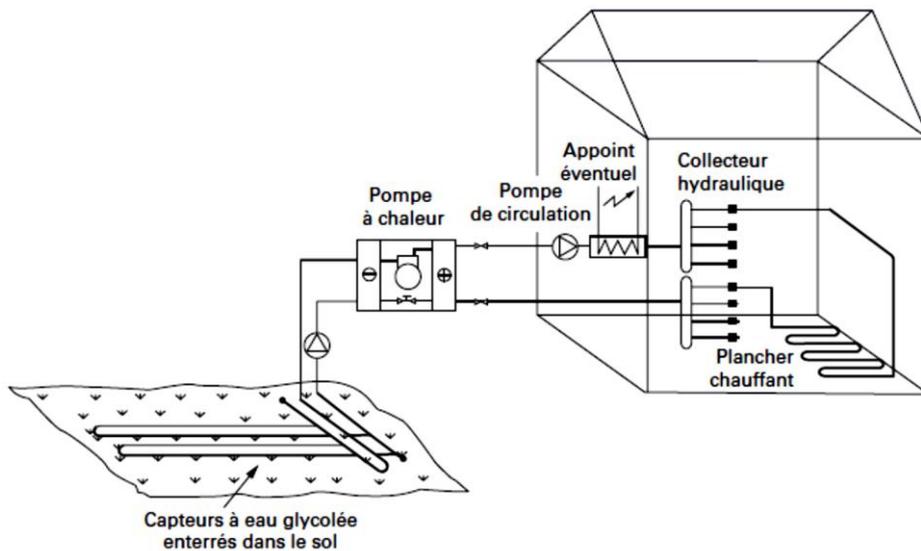


Figure 3 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à capteurs horizontaux et plancher chauffant-rafraîchissant (Laplaige et Lemale, 2010(c))

Le système de captage est branché à une pompe à chaleur qui transfère la chaleur au bâtiment.

En générale, l'ajout d'un appoint n'est pas nécessaire, la pompe à chaleur peut assurer la couverture totale des besoins de chauffage.

Important

- La nature du terrain et son niveau d'humidité affectent la capacité de prélèvement de chaleur dans le sous-sol.
- Cette technique permet aussi de rafraîchir un bâtiment en été grâce à la pompe à chaleur. La chaleur est prélevée dans le bâtiment et évacuée dans le terrain par le capteur enterré.
- Les conditions climatiques influent sur la température du sous-sol à cette profondeur. La recharge thermique de ce dernier est assurée par le rayonnement solaire et de la pluviométrie.

b. Techniques avec capteurs verticaux

Le capteur ou sonde géothermique vertical permet de limiter la surface de terrain nécessaire pour implanter le capteur. Le capteur est inséré dans un forage de 132 à 165 mm de diamètre selon une conformation de deux tubes (en U) ou 4 tubes (double U), d'un

diamètre compris entre 25 et 40 mm. Le forage est ensuite rempli avec un mélange de ciment et de bentonite, stabilisant ainsi la géométrie originelle du trou. La profondeur du forage peut atteindre 200 m. Selon les besoins thermiques un ou plusieurs forages sont aménagés.

La technique des capteurs verticaux peut être utilisée pour chauffer une maison individuelle, des logements collectifs, des bâtiments de petit ou moyen tertiaire ; plusieurs sondes peuvent être utilisées.

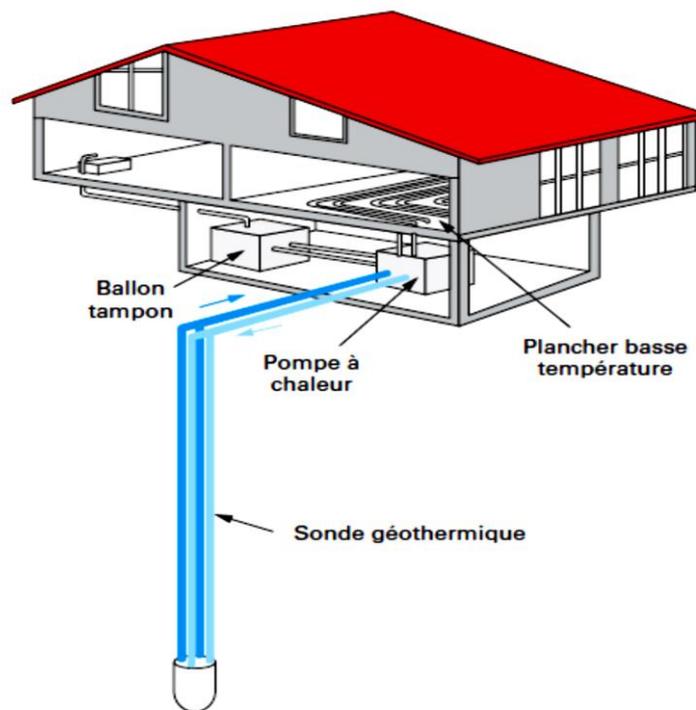


Figure 4 : Schéma d'une sonde géothermique (Laplaige et Lemale, 2010(c)).

Cette technologie est retenue à la technologie des capteurs horizontaux dans les cas suivants :

- Surface d'enfouissement insuffisante.
- Une importante déclivité du terrain.
- Nature du terrain ne permettant pas l'excavation.
- Remplacement d'un chauffage existant traditionnel par une technologie géothermique.

Important

- La profondeur des sondes géothermiques permet d'exploiter les pompes à chaleur dans de bonnes conditions en hiver, même quand la température de l'air extérieur est très basse en s'affranchissant des variations de température journalières et saisonnières.
- Une installation correctement dimensionnée et fonctionnant avec du matériel de qualité aboutit à de bonnes performances.
- L'espacement et la disposition relative entre les sondes impactent sur la température du sol dans le temps, une diminution de température de la source peut être observée. Pour pallier à ce problème, il est recommandé de laisser des espaces compris entre 7 et 10 m entre les différents forages et d'utiliser la pompe à chaleur en été pour le rafraîchissement.
- L'enfouissement des capteurs horizontaux peut être réalisé assez facilement en comparaison des géosondes qui nécessitent des sociétés très spécialisées.
- La mise en place des géosondes nécessite des forages coûteux, il est nécessaire de réaliser une étude préalable pour garantir les performances énergétiques.
- Les systèmes à détente directe ne peuvent fonctionner qu'en mode chauffage. Cependant, ils permettent de produire également de l'eau chaude sanitaire et fonctionnent surtout sans appoint.

7.2.4. Captage de chaleur sur des aquifères superficiels

La géothermie des aquifères superficiels (nappes d'eau souterraines) concerne l'exploitation thermique des aquifères situés jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. A ces profondeurs, la température moyenne de l'eau est de l'ordre d'une dizaine de degrés Celsius et constante quelle que soit la saison, l'utilisation des pompes à chaleur est nécessaire.

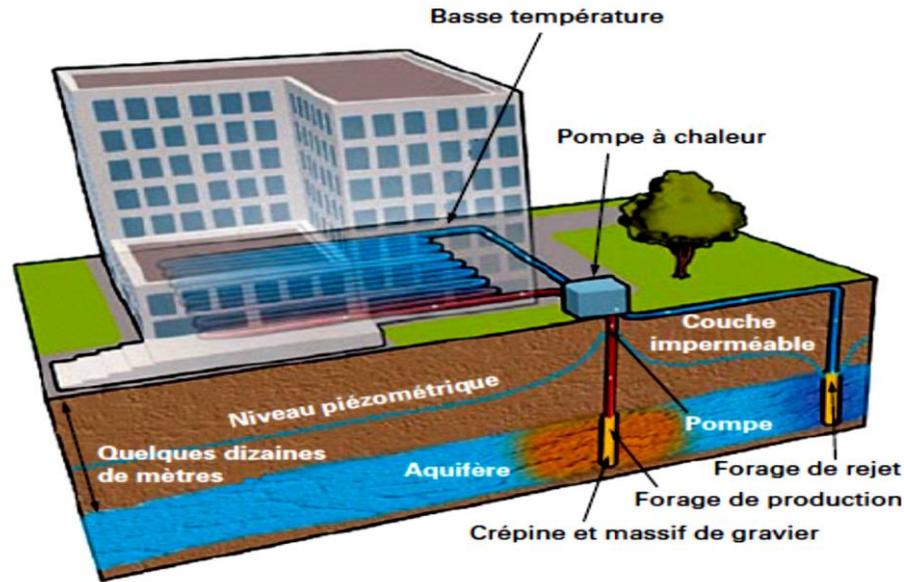


Figure 5 : Récupération de la chaleur sur aquifère (Laplaige et Lemale, 2010(a))

L'énergie thermique des nappes peu profondes est d'origine solaire et terrestre. Cependant, Au-delà de 20 m de profondeur, l'effet solaire est quasiment inexistant, et la température croît graduellement sous l'effet du gradient géothermique.

7.2.4.1. Présentation de la filière

Les composantes du prélèvement sur eau de nappe sont :

- Un aquifère (nappe) dans lequel de l'eau est puisée au moyen d'un forage. Les principales caractéristiques de cet aquifère sont la température, les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du réservoir et les caractéristiques physico-chimiques du fluide géothermal.
- Une pompe à chaleur qui récupère la chaleur de l'eau de nappe, élève le niveau de température de la chaleur prélevée, et la transfère au bâtiment à chauffer ;
- Un bâtiment équipé d'un circuit de distribution de chaleur, comme un plancher ;
- Un deuxième forage par lequel l'eau de nappe refroidie est rejetée dans l'aquifère à une distance suffisante du premier forage.

7.2.4.2. Fonctionnement

Une installation standard est constituée de trois ensembles :

- Ouvrages sous-sol constitué d'un ou de plusieurs forages et équipés de pompes immergées. La réinjection peut se faire par gravité ou à l'aide d'une pompe en surface.
- Circuit intermédiaire entre les forages et la pompe à chaleur. Constitué de canalisations assurant les liaisons hydrauliques et le cas échéant d'un échangeur. Pour les immeubles tertiaires, l'eau souterraine est séparée du circuit d'eau chaude de la pompe à chaleur de l'immeuble par l'utilisation d'échangeur à plaques. Pour les applications résidentielles, l'eau de la nappe circule habituellement dans la pompe à chaleur.
- Production et distribution de la chaleur, assurée par une pompe à chaleur dimensionnée selon les besoins thermiques de l'utilisateur.

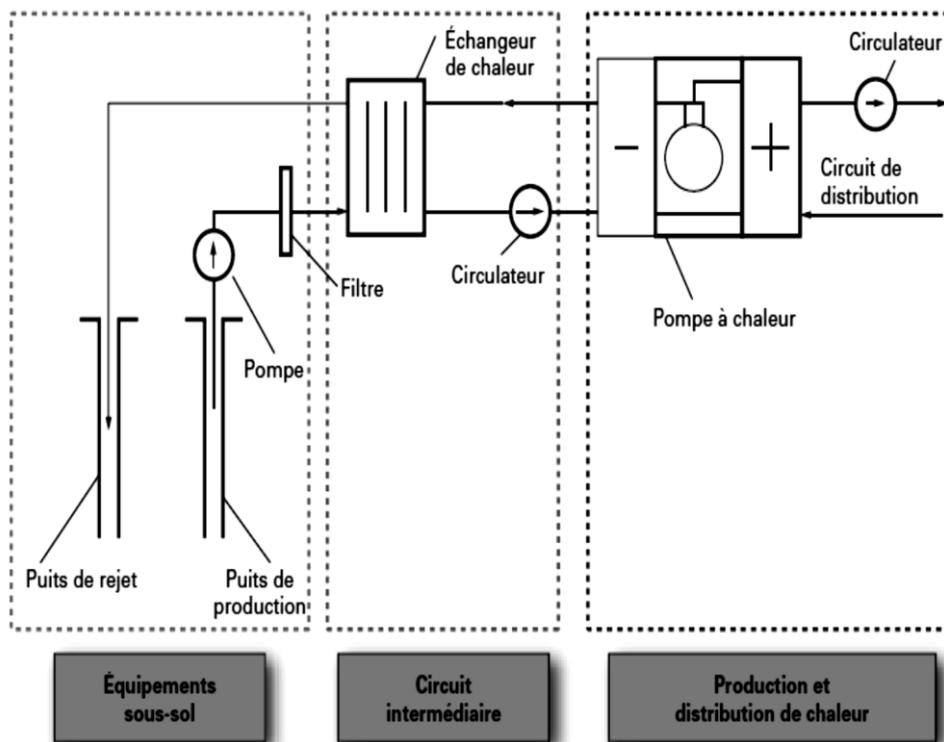


Figure 6 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur fonctionnant sur nappe phréatique. Principaux circuits (Laplaige et Lemale, 2010(a))

L'eau puisée de la nappe phréatique, dont la température se situe en moyenne à 15°C, est refroidie d'environ 3 à 5 K en transmettant son énergie, via un échangeur de chaleur, au circuit intermédiaire alimentant la pompe à chaleur. La pompe à chaleur permet de transférer cette énergie à l'eau de circuit de distribution à un niveau de température suffisant pour l'utilisation souhaitée (en pratique 35 à 45°C).

Après récupération de cette énergie, des volumes importants d'eau refroidis sont rejetés dans l'environnement. Deux voies sont envisageables : le rejet souterrain ou le rejet en surface (rivière, réseau pluvial...), dans les deux cas des risques environnementaux subsistent. Cependant, le rejet dans l'aquifère d'origine est généralement celui qui est retenu. Dans ce cas une étude hydrogéologique doit être réalisée pour déterminer la distance entre les puits afin d'éviter que l'eau réinjectée, plus froide, ne vienne affecter thermiquement le point de puisage.

Important

L'eau géothermale présente des caractéristiques physico-chimiques particulières pouvant engendrer des problèmes de corrosion au niveau des appareils de chauffage. Pour pallier à cet inconvénient, un échangeur de chaleur avec un circuit secondaire d'eau douce est utilisé.

QROC

Vrai ou faux ? Si la phrase est fautive, proposez une réponse correcte.

1. Le gradient géothermal est une grandeur qui mesure la température en surface du globe.
2. Les gisements de basse énergie sont très répandus à la surface du globe terrestre.
3. La géothermie à base enthalpie peut être utilisée pour produire le froid.
4. Dans les régions géologiquement calmes l'énergie est transmise par convection.
5. L'utilisation des sondes géothermiques verticales est retenue pour des terrains de faible déclivité.
6. Le transfert d'énergie dans les zones géologiquement actives s'effectue par convection.
7. Les réservoirs d'eau chaude se sont constitués par des infiltrations d'eau circulant dans une couche géologique perméable et non poreuse, recouverte de terrains imperméables.
8. Les pompes à chaleur permettent de valoriser des sources de chaleur à basse température pour couvrir des besoins de chauffage d'une habitation.
9. La géothermie est utilisée uniquement pour produire de la chaleur.
10. Les fluides frigorigènes utilisés dans les pompes à chaleur sont choisis en fonction de leurs températures de vaporisation et de condensation.

SOLUTION

1. Faux. Le gradient géothermal mesure l'augmentation de la température en fonction de la profondeur.
2. Vrais.
3. Vrais
4. Faux. Dans les régions géologiquement calmes l'énergie est transmise par conduction.

5. Faux. Les sondes géothermiques verticales sont retenues lorsque la déclivité du terrain est importante.
6. Vrais
7. Faux. Les réservoirs d'eau chaude se sont constitués par des infiltrations d'eau circulant dans une couche géologique perméable et poreuse, recouverte de terrains imperméables
8. Vrais
9. Faux. La géothermie peut être utilisée pour produire de la chaleur et pour produire de l'électricité. L'élément déterminant est la température de la ressource.
10. Vrais.

Chapitre 3

Systeme solaire actif



Objectif

- Ce chapitre vise à rappeler*
- *dans un premier volet et d'une manière succincte ce qu'est l'énergie solaire : soleil, origine de cette énergie et les caractéristiques du rayonnement solaire.*
 - *et dans un second volet et d'une façon plus détaillée, le principe et les aspects techniques de la conversion de l'énergie solaire, à savoir :*
 - L'énergie solaire thermique ;*
 - L'énergie solaire thermodynamique*
 - L'énergie solaire photovoltaïque.*

Système solaire actif

L'énergie solaire est l'énergie primaire de toutes les énergies présente sur terre, à l'exception de la géothermie, qui puise son énergie au cœur de la terre. Elle représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse), du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et, sous forme stockée durant des millions d'années des réserves d'énergie fossiles.

1. Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 Km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre. Formé de quatre zones : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne.

Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K, sa température superficielle est de 5770 K.

1.1. Origine de l'énergie solaire

L'énergie solaire est produite par les réactions de fusions thermonucléaires : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons). Ces réactions ont lieu dans le noyau à une température estimée à 15 millions de degrés et une pression évaluée à $2 \cdot 10^{11}$ bars. Cependant ces réactions nucléaires ne se produisent plus à une distance d'environ un quart du rayon solaire (175 000 Km). La vie est donnée par le rayon de la bombe thermonucléaire. L'énergie produite est dispersée par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère ; cette énergie s'échappe alors sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

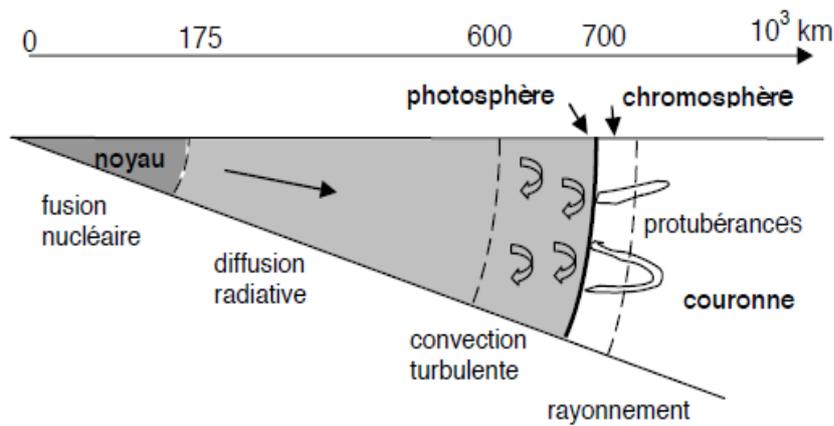


Figure 1 : Coupe schématique du soleil (Bernard, 2011)

1.2. Caractéristiques du rayonnement solaire

a. Energie renouvelable

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Cet apport est à l'origine de la biomasse et des cycles de vie, notamment l'eau, le vent et les courants océaniques).

b. Spectre solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde (spectre).

Le faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

Le spectre de la lumière solaire est continu, comporte des longueurs d'onde comprises entre $0,2 \mu\text{m}$ (ultraviolet) et $4 \mu\text{m}$ (infrarouge).

c. Rôle de l'atmosphère

Le flux solaire intercepté par le disque terrestre est d'environ $1\,350 \text{ W/m}^2$ en dehors de l'atmosphère (constante solaire). Il s'agit du rayonnement solaire instantané. Cette valeur n'est pas constante à cause des légères variations de la distance terre/soleil et de l'activité solaire.

Le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux initial. Il dépend de l'angle d'incidence, de l'épaisseur de l'atmosphère traversée et de l'absorption par les gaz atmosphériques et la

vapeur d'eau. Le flux solaire incident dans les régions désertiques est estimé à 1000 W/m².

Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre : l'absorption et de la diffusion.

- L'absorption est sélective et dépend de :
 - L'ozone qui forme un écran qui arrête les UV ($\lambda < 0,28 \mu\text{m}$) nocif pour la vie ;
 - L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0,69 et 0,76 μm) ;
 - Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2 \mu\text{m}$) ;
 - La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR.
- La diffusion se produit avec les molécules de l'air, celles de la vapeur d'eau et les particules en suspension. Elle est d'autant plus importante que la longueur d'onde λ du rayonnement est petite et que l'air humide est pollué.

d. Rayonnement perçu au sol

Au sol, on distingue plusieurs composantes.

- **Le rayonnement direct** est caractérisé par sa linéarité. Tous les rayons sont parallèles entre eux. Ce type de rayon peut être concentré par des miroirs.
- **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols) dans toutes les directions. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.
- **L'albédo** est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site, la neige, réfléchit énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie presque rien.
- **Le rayonnement global** est tout simplement la somme de ces diverses contributions.

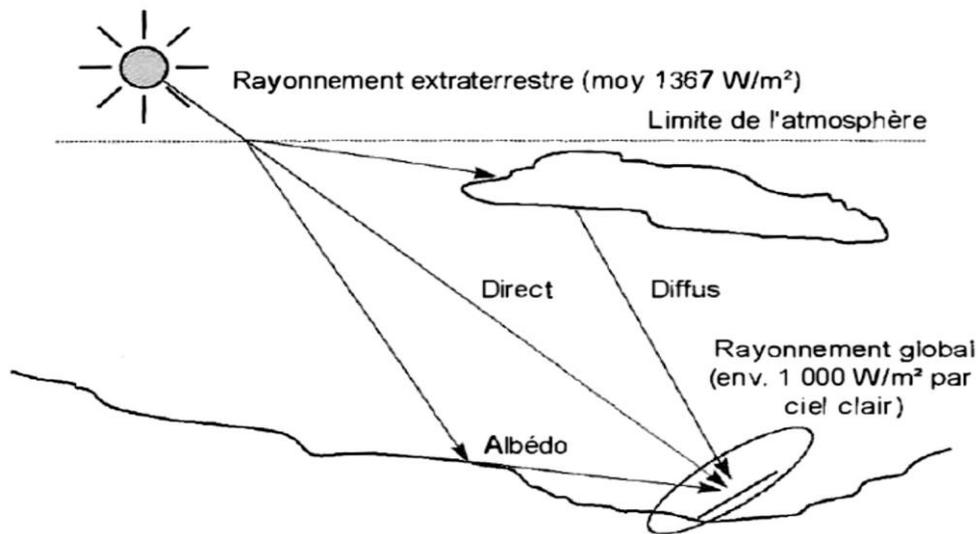


Figure 2 : Composante du rayonnement solaire au sol
(Labouret et Viloz (2005)).

e. Variation du rayonnement globale

La répartition spatiale et temporelle du bilan radiatif est hétérogène. Cependant, le bilan énergétique global annuel est en équilibre, il est d'environ $3 \text{ KJ/cm}^2 \cdot \text{Jour}$. À chaque apport solaire coexiste une perte de rayonnement infrarouge.

Certaines régions sont excédentaires et d'autres sont déficitaires en énergie. Les causes de ce déséquilibre sont multiples :

- La sphéricité de la terre associée à l'inclinaison de son axe de rotation et à sa trajectoire elliptique autour du soleil, entraîne une variation spatiale et temporelle du flux solaire absorbé. Celui-ci dépend donc de la latitude et de la saison considérée. Seul l'équateur reçoit un ensoleillement pratiquement constant au cours d'une année.
- Sur une journée, l'équilibre temporel ne peut être réalisé à cause du cycle jour-nuit. La partie non ensoleillée continue de rayonner dans l'infrarouge : énergie partiellement perdue dans l'espace. Engendrant une tendance au refroidissement.
- L'albédo de la planète dépend fortement de la couverture nuageuse. Celle-ci n'est pas uniforme.

Les régions tropicales sans nuages subissent un ensoleillement important mais perdent beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement infrarouge.

La zone centrée sur l'équateur est souvent nuageuse. Les pertes par rayonnement infrarouge y sont limitées. Le rayonnement solaire est en partie réfléchi compte tenu de l'albédo solaire élevé de cette région. Le bilan énergétique est globalement positif (région excédentaire en énergie).

Des gradients importants existent l'été entre les zones océaniques et continentales. Ces variations sont dues à la différence de réchauffement entre l'eau et le sol terrestre.

La zone équatoriale est souvent nuageuse ce qui modifie l'albédo. La fraction du rayonnement solaire réfléchi par la couverture nuageuse augmente, entraînant localement un bilan négatif.

Important

Des phénomènes de transport d'énergie des régions excédentaires vers les régions déficitaires tendent à homogénéiser les champs de température et de pression de la planète ; conditionnant son équilibre thermique.

2. Conversion de l'énergie solaire

Trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire sont envisagées : La thermique, la thermodynamique et le photovoltaïque.

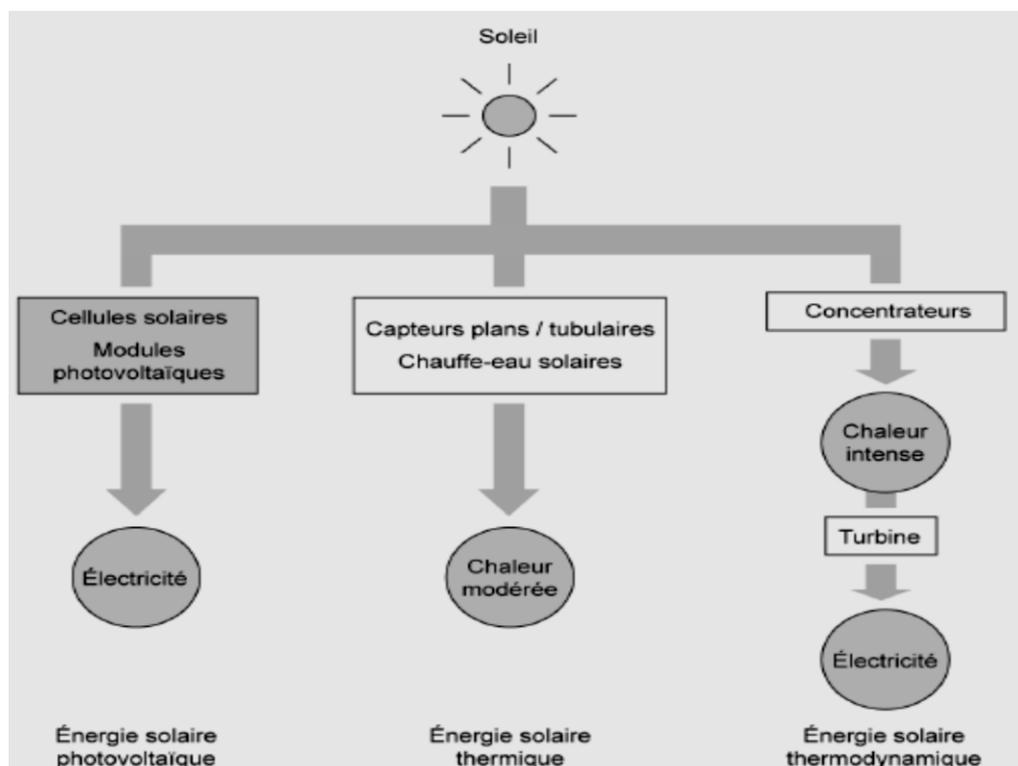


Figure 3 : Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire (Labouret et Villos, 2012)

2.1. Le solaires thermiques

L'énergie solaire thermique produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge du Soleil afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide.

L'énergie solaire thermique s'utilise principalement au travers de deux applications : le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux.

2.1.1. Principe

Le solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire par la mise en œuvre de capteurs solaires. Un capteur solaire thermique est un dispositif convertissant l'énergie de la lumière solaire en énergie thermique (chaleur). L'énergie thermique est ensuite absorbée par un fluide caloporteur, par exemple de l'eau ou de l'air. Le fluide transportant la chaleur, circule alors dans un réseau à des fins d'utilisation ou de stockage.

Important

- Un chauffage d'appoint est nécessaire pour les périodes climatiques défavorables.
- Lorsque l'ensoleillement est insuffisant pour avoir une bonne température de l'eau, le chauffe-eau solaire est relié à une chaudière d'appoint pour suppléer le panneau.

2.1.2. Principes des capteurs solaires

Il existe plusieurs types de capteurs : plans, sans vitrage, à tubes sous vide, leur utilisation dépendra de la quantité de chaleur à produire, le type d'installation à aménager (centrales, maisons...), et la région dans laquelle on se trouve.

a. Capteur non vitré

Modèle, simple et économique, très utilisé pour le chauffage des piscines de plein air dont le niveau de température de l'eau est inférieur à 30 °C. Composé d'un absorbeur, métallique ou synthétique (polyéthylène et EPDM) et revêtu d'une peinture sombre et sélective, et d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés. Un liquide caloporteur circule dans l'absorbeur. Ce capteur est résistant au rayonnement ultraviolet et aux variations de température.

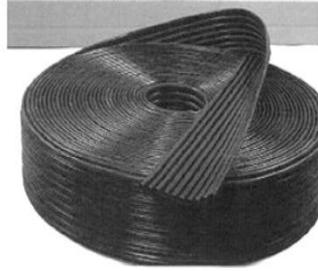


Figure 4 : Photo de capteur solaire en matière plastique conditionné en bobine (Desmons, 2009)

b. Capteur plan vitré

Le capteur plan vitré est composé d'un coffre isolant sur lequel est fixé un vitrage (simple ou double) ou certains plastiques transparents. À l'intérieur du coffre est disposée une surface absorbante. La surface s'échauffe après absorption des rayons lumineux incidents, et échange alors de la chaleur avec un fluide caloporteur contenu dans des tubes.

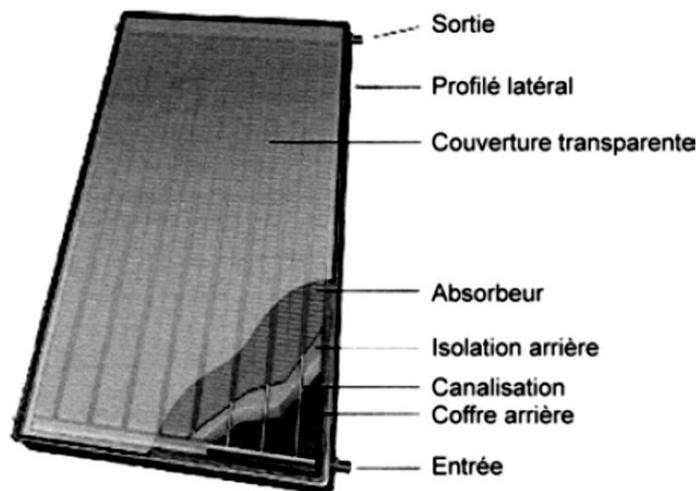


Figure 5 : Vue écorchée d'un capteur plan vitré (Desmons, 2009)

c. Capteur à tubes sous vide

L'absorbeur est couvert d'ailettes pour optimiser l'absorption du rayonnement solaire. Aussi, il est enveloppé dans un tube en verre pour empêcher tout transfert thermique (par convection). Le fluide caloporteur circule à l'intérieur de l'absorbeur.

Ces capteurs ont un rendement supérieur à celui des capteurs plans. Ils permettent l'obtention de températures plus élevées comprise entre 50 et 95 °C, et peuvent être utilisés dans les régions très froides.



Figure 6 : Raccordement hydraulique de capteurs sous vide
(Desmons, 2009)

d. Capteurs à tubes sous vide à caloduc

L'absorbeur dans ce type de capteur est appelé caloduc, à l'intérieure une petite quantité de solution à base de glycol circule sous vide partiel. Lors d'exposition de ces capteurs au soleil, il y a vaporisation de la solution. La vapeur ainsi produite remonte par effet thermosiphon en partie haute du tube et transfère sa chaleur au réseau secondaire dans le collecteur. Un nouveau cycle prend effet après condensation de la solution et sa descente dans le caloduc.

Ce modèle de capteur, exploite l'énergie du changement d'état «Chaleur latente de vaporisation », présente de meilleures performances pour la production d'eau chaude à haute température.



Figure 7 : Vue de capteurs à tube sous vide à caloduc (Desmons, 2009)

2.1.3. Exemple pratique : Le chauffe-eau solaire

Le système de production d'eau chaude sanitaire à partir d'un capteur plan est composé d'un capteur, d'un échangeur de chaleur, d'un ballon de stockage, de tuyauteries et de pompes.

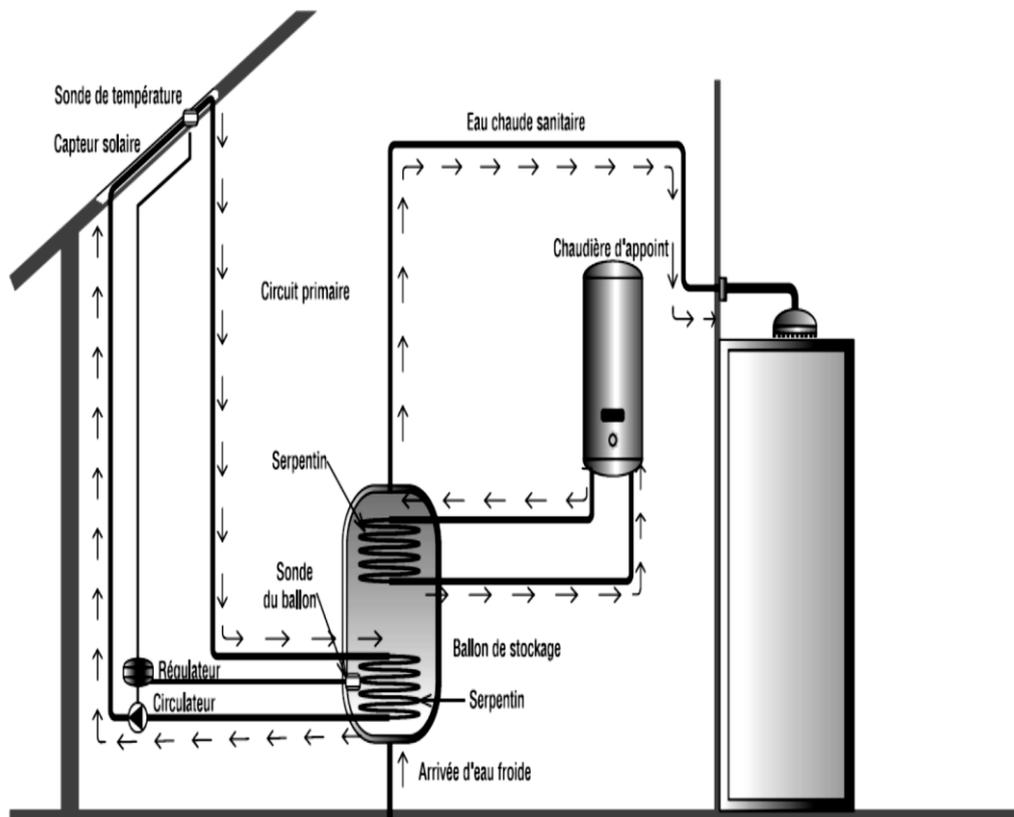


Figure 8 : Chauffe - eau solaire (Pauchet, 2007)

a. Le capteur solaire plan

Elément fondamental de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Il est constitué de : surface absorbante, fluide caloporteur, couverture transparente, isolant.

L'absorbeur est en général une plaque métallique (en cuivre, en aluminium ou en acier) caractérisé par ses propriétés d'absorption et de conduction de chaleur. La conversion rayonnement-chaleur s'effectue en surface de l'absorbeur. Les photons qui frappent cette plaque métallique, sont absorbés et augmente l'agitation des molécules (augmentant la température du matériau). La chaleur absorbée est ensuite distribuée vers les conduits d'eau fixés sur la plaque d'absorbeur.

Le fluide caloporteur est l'eau. Divers additifs peuvent y être ajoutés tel l'antigel (glycol).

Important

- La capacité d'absorption de la chaleur varie en fonction du revêtement de la surface extérieur du capteur. Des couches sélectives sont généralement utilisées, elles ont l'avantage d'avoir une émissivité réduite le champ des longueurs d'ondes du rayonnement thermiques, ce qui diminue les déperditions thermiques.
- Certains capteurs sont prévus pour être vidangés en cas de gel ou de surchauffe.

b. Transfert de chaleur

L'énergie captée transformée en chaleur est ensuite transférée par circulation du fluide caloporteur dans les tuyauteries vers le système de stockage. Les tuyauteries utilisées sont en cuivre, en aluminium ou en acier galvanisé et protégées avec une isolation thermique contre les pertes thermiques et les intempéries. Deux types de transfert sont possibles :

- Circulation naturelle (thermosiphon) : la circulation du fluide caloporteur est due à la différence des températures et des densités de l'eau dans le capteur et dans le ballon de stockage. L'eau chauffée, moins dense, s'élève par thermosiphon. Le ballon doit être placé plus haut que le capteur ;
- Circulation forcée : ce système utilise une pompe de circulation. Celle-ci met le liquide caloporteur en mouvement quand il est plus chaud que l'eau sanitaire du ballon. Un régulateur commande le dispositif.

Important

Le cuivre est un matériau durable, l'aluminium résiste moins à la corrosion et l'acier galvanisé à un faible taux de conduction de la chaleur.

c. Restitution de chaleur

L'échange de chaleur peut se faire avec échangeur, il y a dans ce cas un circuit primaire dans le capteur et un circuit secondaire dans le stockage qui récupère la chaleur du circuit primaire. Les échangeurs intégrés au ballon de stockage sont de type serpentin, les échangeurs externes au ballon sont des échangeurs à plaques.

d. Stockage de l'eau chaude

Le ballon isolé constitue une réserve d'eau sanitaire.

e. L'appoint

Les unités de stockage sont équipées d'un dispositif d'appoint qui prend le relais en cas de besoin (hiver, longue période de mauvais temps).

2.2. Solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique regroupe l'ensemble des procédures de transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Par un cycle thermodynamique, les rayons solaires sont transformés en chaleur, puis en énergie mécanique et enfin en énergie électrique.

2.2.1. Principe

Des concentrateurs, miroirs galbes, captent et concentrent les rayons solaires pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) ; générant de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine à vapeur par exemple.

Important

La température est plus élevée dans le système thermodynamique ; entre 100 et 1500 °C, contre 20 à 100°C pour le thermique.

2.2.2. Aspect technique

Grâce à des réflecteurs les rayons solaires sont concentrés sur un liquide ; celui-ci chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur. Cette chaudière est reliée à une turbine et à un alternateur pour générer de l'électricité. Ce procédé est semblable à celui utilisé dans les centrales thermiques conventionnelles.

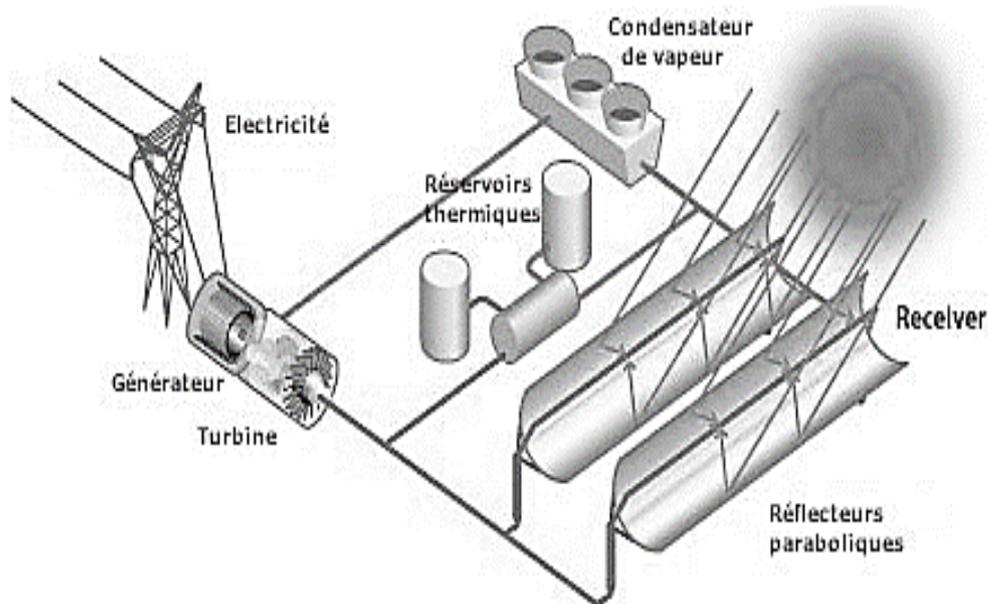


Figure 9 : Schéma d'une centrale solaire (Le Moal et Nicolas, 2013)

2.2.3. Composants pour la production de chaleur et la conversion en électricité

Le cœur d'une centrale solaire thermodynamique est constitué par le système concentrateur, le récepteur solaire auquel est associé le fluide de transfert. Il existe plusieurs concepts de récepteurs solaires, et différents fluides caloporteurs pour convertir en électricité l'énergie solaire concentrée.

2.2.3.1. Systèmes concentrateur

Ce sont des systèmes qui captent les radiations solaires directes et les concentrent sur un récepteur dans lequel s'écoule un fluide caloporteur. Durant cette étape, le rayonnement solaire est converti en puissance thermique.

La captation du rayonnement solaire, fait appel à des systèmes optiques : surfaces réfléchissantes constituées de miroirs. Les systèmes concentrateurs sont définis par la forme géométrique des surfaces et par la complexité des structures soutenant les miroirs.

On distingue quatre familles de centrales solaires à concentration :

- Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques ;
- Les centrales à tour à récepteur central ;
- Les systèmes parabole-moteurs.
- Les réflecteurs linéaires de Fresnel.

Ces dispositifs se distinguent par leurs dimensions élémentaires, donc leur puissance, leurs performances optiques et thermiques et leur coût.

- Réflecteurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs suivent la course du soleil et concentrent le flux solaire sur des tubes horizontaux fixés aux récepteurs. Un fluide caloporteur circule dans les tubes. C'est la technologie la plus utilisée (74% des centrales solaires thermodynamiques). Les principales caractéristiques sont :

- Température de fonctionnement : 270°C – 450°C
- Réflecteurs : Parabolique (suivi 1 axe)
- Récepteur : Linéaire mobile
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, huile, air

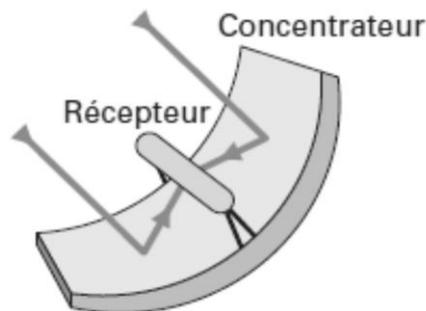


Figure 10 : Réflecteurs cylindro-paraboliques (Ferrière, 2008)

- Héliostats et tours à concentrations

Les héliostats sont des réflecteurs qui suivent le soleil sur deux axes, les rayons solaires sont ensuite concentrés en haut d'une tour fixe. Ce type de dispositif équipe seulement 15 % des centrales thermodynamiques. Les principales propriétés sont :

- Température de fonctionnement : 450°C – 1000°C
- Réflecteurs : Héliostats (suivi 2 axes)
- Récepteur : Central
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, air

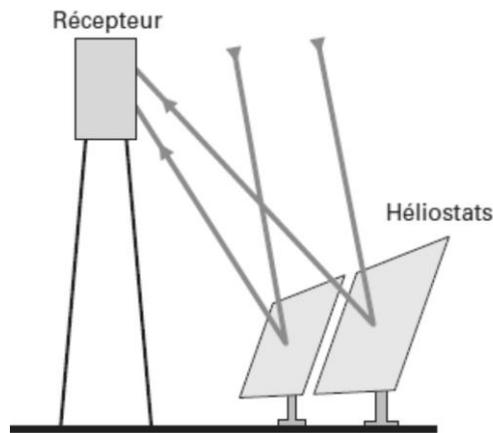


Figure 11 : Héliostats et tours à concentrations (Ferrière, 2008)

- Miroirs paraboliques

Ces miroirs sont auto-orientable, suivent le soleil selon deux axes et concentrent le flux solaire en un point focal : enceinte remplie de gaz. L'échauffement du gaz entraîne un moteur de type Stirling. Ce type de miroirs équipe seulement 2% des centrales solaires thermodynamiques. Les principales propriétés sont :

- Température de fonctionnement : 600°C – 1200°C
- Réflecteurs : Parabole (suivi 2 axes)
- Récepteur : Central et mobile
- Fluides caloporteurs : Air

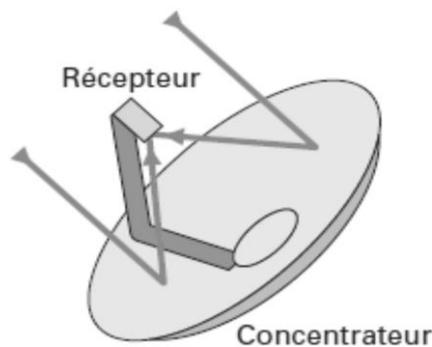


Figure 12 : Miroirs paraboliques (Ferrière, 2008)

- Réflecteurs linéaires de Fresnel

Les réflecteurs Fresnel utilisent une succession de miroirs plans. Chaque rangé peut pivoter et suivre le soleil librement. Le flux solaire est concentré sur un tube

contenant le fluide caloporteur. Ces dispositifs équipent 9% des centrales solaires thermodynamiques. Les principales caractéristiques sont :

- Température de fonctionnement : 270°C – 450°C
- Réflecteurs : Linéaire (suivi 1 axe)
- Récepteur : Central Linéaire fixe
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, huile

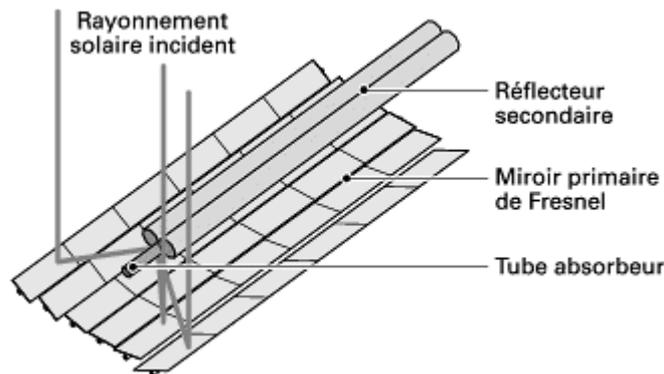


Figure 13 : Réflecteurs linéaires de Fresnel (Ferrière, 2008)

2.2.3.2. Fluides caloporteurs et fluides de travail

Le choix du fluide de transfert (caloporteur) est primordial :

- Il détermine la température maximale admissible ;
- Il oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur ;
- Il conditionne largement la possibilité et la commodité du stockage.

Le fluide de transfert peut aussi avantageusement être le fluide de travail du cycle thermodynamique ; on fait dans ce cas l'économie d'un échangeur.

Pour transporter la chaleur issue du champ solaire jusqu'à la turbine, un fluide caloporteur et/ou un fluide de travail sont utilisés. Le fluide est choisi en fonction de la température désirée, de la méthode de fonctionnement (génération direct/indirect) et du type de stockage employé.

2.2.3.3. Génération d'électricité

Différentes technologies existent pour convertir l'énergie thermique en électricité : cycles vapeur conventionnel, cycle ORC (Organic Rankine Cycle), cycles de Rankine, cycles à gaz hautes températures type Stirling et Brayton. Le choix du procédé dépend principalement de la température du fluide de travail.

2.2.3.4. Le stockage de l'énergie thermique

Pour ajuster la production à la consommation, il est nécessaire de stocker l'excédent d'énergie thermique du milieu de journée pour produire de l'électricité en fin de journée. Les technologies de stockage font appel à l'utilisation des variations d'enthalpie sans changement d'état dans des fluides ou dans des matériaux solides.

2.3. Énergie solaire photovoltaïque

L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité grâce à des modules ou des panneaux photovoltaïques. Les photons lumineux (composants de la lumière) sont absorbés dans un matériau semi-conducteur, puis convertis en courant électrique. Deux types d'installation sont retrouvés :

- Les installations raccordées au réseau dont l'électricité produite est injectée dans le réseau collectif ;
- Les installations autonomes destinées à alimenter un appareil sans fil, ou un site isolé, non raccorde au secteur.

2.3.1. Effet photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion de la lumière solaire en courant électrique dans un matériau semi-conducteur, composant les panneaux photovoltaïques. L'effet photovoltaïque résulte de la libération des électrons sous l'influence de l'énergie rayonnante (photons). Ces électrons sont à l'origine d'un courant électrique continu, qui est ensuite transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. Un générateur photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

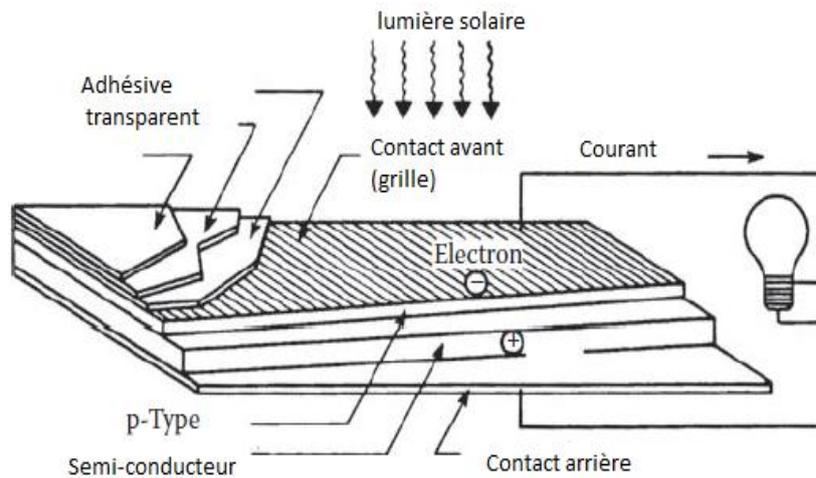


Figure 14 : Schéma l'effet photovoltaïque (Foster et al., 2009)

2.3.1.1. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Les solides sont composés d'atomes, chaque atome est composé d'un noyau contenant des protons et des neutrons et un ensemble d'électrons. Les photons absorbés transfèrent leurs énergies aux électrons périphériques. En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou, se traduisant par une charge positive

Les électrons ainsi libérés seront attirés vers l'extérieur grâce à un collecteur de charge pour produire un courant électrique. Les matériaux qui permettent ce type de phénomène sont particulier et appelés semi-conducteurs. Le mécanisme physique qui gère ce phénomène électrique est la photoconductivité.

Il existe un seuil minimum d'énergie des photons nécessaire à la libération des électrons. Ce seuil dépend principalement de la structure du matériau. Ce seuil est appelé le gap optique (E_g) du matériau ou la largeur de bande interdite. Le photon doit avoir une énergie supérieure à celle de l' E_g pour être absorbé et créer la paire électron-trou. Les propriétés optiques et électroniques sont liées.

Important

Quelle que soit l'énergie du photon, à condition qu'elle soit supérieure à E_g , chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou d'énergie E_g .

2.3.1.2. Type de semi-conducteur

Actuellement, le silicium est le matériau le plus utilisé. Celui-ci se trouve en abondance sur la planète, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. Constituant principal de sable, il est surtout sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2). En fonction de la structure microscopique du silicium plusieurs types de cellules sont retrouvés :

- **Silicium monocristallin** : son rendement est de l'ordre de 15%, très difficile à obtenir. Après réduction de l'oxyde au four électrique, on obtient du silicium pur à 98%, insuffisant pour réaliser une cellule photovoltaïque. Une seconde opération de purification est nécessaire d'où son prix élevé.
- **Silicium polycristallin** : est obtenu par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est plus faible, de l'ordre de 10%.
- **Silicium amorphe ou en couche mince** : les cristaux de silicium sont déposés en mince couche sur un substrat : verre ou un matériau synthétique. En général, il est utilisé pour des appareils de faible puissance (calculatrice). Le rendement est de l'ordre de 7% et diminue avec le temps.

On trouve aussi d'autres matériaux, tel :

- **GaAs** : Arséniure de gallium. Matériau monocristallin, ayant un très bon rendement mais dont le prix est très élevé le destine au domaine spatial.
- **CdTe** : tellure de cadmium. Matériau polycristallin déposés sur un substrat en verre.
- **CIS** : diséléniure de cuivre et d'indium. Ce matériau attribue aux photopiles une bonne stabilité dans le temps.
- **TiO₂** : dioxyde de titane. Cette technologie est au stade expérimental.

Les performances d'une installation photovoltaïque est fonction de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils sont placés.

2.3.2. Conception technique

Pour bien concevoir une installation solaire photovoltaïque, il faut tout d'abord connaître le potentiel solaire du site et identifier les besoins énergétique, en ce sens :

- la quantité journalière d'énergie solaire disponible sur le site doit être déterminée.
- les quantités d'énergies journalière consommées doivent être évaluées : consommation de toutes les lampes et de tous les appareillages et en multipliant ces consommations par la durée d'utilisation.

- un plan d'installation et d'approvisionnement doit être établi au préalable avec une prévision d'une surconsommation éventuelle et une estimation des déperditions d'énergie imputables à des défauts d'efficacité.
- les dimensions et les capacités de l'ensemble des composants de l'installation doivent être estimés : modules, régulateur et batteries.

Une installation photovoltaïque est constituée de :

a. Panneau photovoltaïque

Un panneau ou un module photovoltaïque est un convertisseur d'énergie composé de plusieurs cellules placées sous une plaque de verre ; le verre protège les cellules des chocs et des intempéries. Généralement, la surface de ces structures est comprise entre 0,1 et 3 m². Selon le nombre et la taille des cellules qui composent le module la puissance s'échelonne entre 1 et 300 W. Pour des puissances plus importantes plusieurs modules peuvent être associés en créant un champ voltaïque. Différentes technologies de panneaux sont proposées selon le domaine d'application, la nature exacte des besoins et les paramètres locaux.

b. Batteries : stockage de l'énergie solaire

Les batteries sont des structures de stockage d'énergie captée durant les périodes d'ensoleillement ; la nuit et en période nuageuse l'énergie est restituée. Il existe plusieurs types et tailles de batteries. Le choix est fonction des besoins et du budget de l'utilisateur. Des entretiens et des contrôles réguliers de ces batteries sont nécessaires pour garantir leurs longévité et performances.

c. Régulateurs de charge et onduleurs : gestion de l'énergie solaire

Le régulateur de charge est un appareil qui prévient tout risque de dommage de l'installation et des batteries. Il prévient tout risque de surcharge ou de décharge des batteries et signale tout dysfonctionnement inhérent aux batteries et au générateur.

Les onduleurs sont des dispositifs qui convertissent le courant continu en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de certains équipements et appareils.

Le régulateur de charge et l'onduleur doivent être adaptés à l'installation.

d. Câblage, lampes et appareils électriques

Le câblage utilisé dans l'installation photovoltaïque est similaire au système raccordé au réseau. Cependant, le diamètre des câbles doit être plus important ; ceci est imputé à la très basse tension de l'électricité générée par les modules photovoltaïques.

Les équipements électriques et les lampes sont choisis spécifiquement au courant continu généré par ces modules. Les lampes les plus utilisées sont de type fluorescente ou à diode électroluminescente (DEL/LED).

Le choix de ces équipements est fondé sur des critères de consommation, d'efficacité énergétique et en prévision de toutes chutes de tension.

2.3.3. Photovoltaïque autonome

Le photovoltaïque autonome peut être une solution bon marché et remplacer l'électricité du secteur, le groupe électrogène au diesel, et les piles. Ce type d'installation diffère des installations photovoltaïques raccordées au réseau ou aux groupes électrogènes dans la conception et les composants. La principale différence entre des deux procédés réside dans le stockage de production non consommée, le photovoltaïque autonome stocke l'électricité dans des batteries alors que le photovoltaïque raccordées injecte le surplus de production dans le réseau.

Important

L'efficacité du solaire photovoltaïque est de l'ordre de 15 %, jugée faible, et son coût élevé permettent difficilement de justifier une utilisation répandue. Par contre, il peut s'agir d'une solution pertinente pour atteindre l'autonomie énergétique lorsque le réseau de distribution est hors de portée, pour des zones reculées par exemple. En effet, combinée à d'autres technologies (l'éolien), elle demeure une source d'énergie sûre, pertinente et peu polluante.

2.3.4. Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque

2.3.4.1. Avantage

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules =20 ans).

- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Sécurité absolue si l'installation est conforme.
- Le risque de choc électrique est réduit et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.
- Absence de pollution : aucune émission de gaz à effet de serre, aucun bruit ou risque majeur.

2.3.4.2. Inconvénients

- Le coût initial des systèmes PV est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée.
- Dans la plupart des installations, l'électricité doit être stockée dans des batteries. Or, les batteries :
 - Requièrent une maintenance régulière,
 - Doivent être remplacées périodiquement
 - Peuvent avoir un impact sur la performance du système (lorsque les produits locaux sont de mauvaise qualité ou ne peuvent pas être remplacés)
- Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé.
- Les systèmes PV doivent être conçus et installés par des techniciens spécialisés car toute erreur de conception ou de réalisation engendrera des dysfonctionnements conduisant à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives.
- Les systèmes PV de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagement.
- L'électricité solaire photovoltaïque est désavantageuse pour les charges thermiques (cuisson, chauffage, ou repassage).

QROC

Vrai ou faux ? Si la phrase est fautive, proposez une réponse correcte.

1. L'énergie solaire est l'énergie primaire de toutes les énergies présente sur terre.
2. Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre : l'adsorption et de la diffusion
3. L'énergie solaire thermique produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire ultraviolet du Soleil pour de chauffer un fluide.
4. Un capteur non vitré permet l'obtention de températures très élevées de l'ordre de 75°C.
5. Le solaire thermodynamique désigne l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur.
6. Les concentrateurs sont des systèmes qui captent les radiations solaires directes et les concentrent sur un récepteur dans lequel s'écoule un fluide caloporteur.
7. Le stockage de l'énergie thermique est une nécessité pour pouvoir produire de l'électricité la nuit.
8. Le photovoltaïque consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité.
9. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques à l'origine d'un courant électrique alternatif.
10. Le rendement du solaire photovoltaïque est généralement de l'ordre de 35 %.

SOLUTION

1. Faux. L'énergie solaire est l'énergie primaire de toutes les énergies présente sur terre à l'exception de la géothermie.
2. Faux. Deux phénomènes atténuent le rayonnement solaire traversant l'atmosphère terrestre : l'absorption et de la diffusion.
3. Faux. L'énergie solaire thermique produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge du Soleil afin de chauffer un fluide.

4. Faux. Un capteur non vitré ne permet pas l'obtention de températures de l'ordre de 75°C. Il permet plutôt de chauffer une eau à 30°C.
5. Faux. Le solaire thermodynamique désigne l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en électricité.
6. Vrais
7. Vrais
8. Vrais
9. Faux. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur à l'origine d'un courant électrique continu.
10. Faux. Le rendement du solaire photovoltaïque est généralement de l'ordre de 15 %.

Chapitre 4

Energie Eolienne



Objectif

Ce chapitre est destiné à :

- Décrire et caractériser la composante vent .*
- Expliquer le principe et les aspects techniques de la production de l'énergie électrique à l'aide des éoliennes.*
- Apprendre ce qu'est l'énergie éolienne offshore.*
- Définir l'impact des éoliennes.*

Energie éolienne

1. Le vent

1.1. Description

Le vent est un courant de compensation de la masse d'air qui résulte des différences de pression d'air. Selon Burton et al. (2001), les vents sont animés par l'énergie qui provoque des différences de température de la surface. Dans l'atmosphère l'air chaud monte et circule puis retombe à la surface des zones froides.

Des écarts de pression s'établissent à proximité de la surface et sont dues aux rayonnements solaires et à la rotation de la terre. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des zones de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air dégagent une énergie cinétique qui peut être élevée. Cette énergie est fonction de la masse volumique de l'air, des volumes échangés et du carré de la vitesse du vent. Les propriétés du vent : vitesse, direction, fluctuations, aléa, etc. pour une période donnée sont essentielles pour le gisement éolien.

1.2. Caractéristiques

Le mouvement des masses d'air obéit aux lois de la mécanique des fluides. La vitesse du vent est influencée par la topographie : altitude, profil du terrain (plaine, colline, sillon montagneux, ...) et rugosité (végétation, immeuble, ...).

La ressource éolienne présente des fluctuations. La vitesse et de la direction du vent peuvent varier sur une durée de temps déterminée mais aussi en fonction de la saison et pour un domaine géographique donné. Caractérisant ainsi une distribution aléatoire communément appelée « aléa éolien ».

A. Influence de la topographie locale

Dans les basses couches de l'atmosphère, la vitesse de vent est influencée par les frottements de l'air au niveau des terrains. Cet écoulement est fonction de la rugosité des terrains et des contours des paysages. Selon les cas, on peut observer des turbulences et des dégradations de productivité comme au contraire on peut constater des effets accélérateurs (effet de tunnel ou de colline). La vitesse de vent augmente avec l'altitude.

B. Variations temporelles du vent : l'aléa éolien

Pour une région donnée et en fonction du temps la vitesse et la direction du vent sont variables, on observe des :

- Variations interannuelles : d'une année sur l'autre des variations sont observées. Un supplément ou un déficit de ressource éolienne peut être enregistré. L'évaluation du gisement se réfère à des chroniques de mesures réelles (station météorologique, mât de mesures) qui soient les plus complètes possible et sur une longue durée. La collecte de données d'une vingtaine d'année est nécessaire pour dégager la tendance du gisement éolien à long terme pour une région donnée.
- Variations intra-annuelles ou saisonnières : traduisent l'évolution normale ou parfois inhabituelle de la ressource éolienne en fonction de la saison pour un site donné.
- Variations intra-journalière : caractérisent les écarts de la ressource éolienne, particulièrement entre le jour et la nuit.
- Variations à l'échelle de la minute ou d'une dizaine de secondes : il s'agit des régimes transitoires. Des rafales de vent peuvent être observées sur un site donné. Ces dernières déterminent le niveau de turbulence.

Important

- Une vitesse instantanée se mesure habituellement sur une durée moyenne de 10 minutes.
- La vitesse moyenne annuelle permet d'évaluer la productivité annuelle d'un site. Cependant il est important d'étudier les profils temporels (à l'échelle de l'heure, de la journée, des saisons), pour mieux évaluer cette donnée.

1.3. Choix du site

La rentabilité d'une machine éolienne dépend des caractéristiques des vents mais aussi sur le site d'installation. Les emplacements les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagés. Cependant, les premiers sites posent des risques de corrosion et les seconds des problèmes de givrage.

La recherche des sites constitue donc la première étape à effectuer pour évaluer la possibilité d'exploiter le vent. Des relevés météorologiques complets sur sites doivent

être effectués durant au moins une année pour déterminer la vitesse moyenne et la quantité d'énergie annuelle.

Les vents réguliers comme les alizés, vitesse moyenne de 6 à 8 m/s voire jusqu'à 10 m/s sont les plus intéressants, donnent le maximum d'énergie annuelle.

Les sites ayant une quantité d'énergie annuelle insuffisante, et les sites présentant des variations brutales de la vitesse du vent (mistral par exemple) sont à exclure.

Aussi, le relief local doit être pris en considération pour l'interprétation des mesures effectuées.

1.4. Modélisation de la ressource éolienne locale

La connaissance la plus précise de la ressource naturelle d'un site donné est nécessaire avant d'aménager une installation de production éolienne. La modélisation de cette ressource est primordiale pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation de machines.

De ce fait, plusieurs méthodes d'évaluation et de mesures in situ pourront être corrélées :

- Simulation de la tendance à long terme du gisement éolien à une échelle régionale ou mieux à une échelle réduite grâce à des logiciels,
- Installation in situ d'un ou plusieurs mâts de mesures de vent, à une hauteur de 10m à 60m ou 100m, pour enregistrer en temps réel divers paramètres : vitesse et direction du vent, température de l'air, hygrométrie, etc. Ces enregistrements sont réalisés sur une longue période : plusieurs mois, une année et plus.
- Mesures des composantes verticale et horizontale du vent à l'aide de campagnes d'émissions sonores ou d'aérosols pilotées par les appareils de mesures mobiles.

Toutes ces mesures seront corrélées pour caractériser la variable statistique représentative du vent local.

2. Energie éolienne

La production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à savoir très développé dans divers disciplines : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique, électronique, bâtiments et travaux publics, réglementation et droit, et environnement.

2.1. Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne est l'exploitation de l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation, et est utilisée de deux façons :

- Directement pour entraîner une pompe de relevage d'eau, par exemple ;
- Pour entraîner une génératrice électrique.

Pour la production d'énergie électrique, deux configurations sont envisagées :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ;
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

L'énergie électrique produite par ce procédé peut :

- être un complément aux méthodes traditionnelles (centrale thermique classique, nucléaire, ...),
- être utilisé sur des sites non raccordés aux réseaux électriques,
- permettre le désenclavement des régions peu urbanisés,
- alimenter les unités de dessalement.

2.2. Principe

Une éolienne (aérogénérateur) est un générateur d'électricité fonctionnant grâce à la vitesse du vent ; l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie électrique.

Grace à la force du vent, l'hélice d'une éolienne entre en mouvement rotationnel et produit ainsi une énergie mécanique. Cette dernière est convertit en électricité par une génératrice.

Le meilleur rendement est observé lorsque l'hélice est face au vent, perpendiculaire.

Le maximum de puissance d'une éolienne est obtenu pour des vents de force moyenne, la puissance nominale est atteinte pour une vitesse de vent de 50 Km/h (14 m/s).

Pour des vents plus forts, l'éolienne est freinée par un système électronique de régulation, tout en maintenant sa puissance nominale. Au-delà de 90 Km/h (25 m/s), la machine est arrêtée pour lui éviter de supporter des charges très importantes.

2.3. Type d'éolienne

On distingue deux familles d'éolienne : à axe vertical et à axe horizontal.

a. Eolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne ne dispose pas de système d'orientation ; fonctionne quelle que soit la direction des vents. Le dispositif de génération électrique est installé sur le sol et il n'y a pas d'édification de tour. Par cette disposition, proche du sol, l'efficacité de la machine est réduite car le capteur d'énergie se situe dans une zone défavorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très importantes.

b. Eolienne à axe horizontal

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances très importantes (plusieurs mégawatts). On retrouve deux types de configuration : les éoliennes « amont » et les éoliennes « aval ».

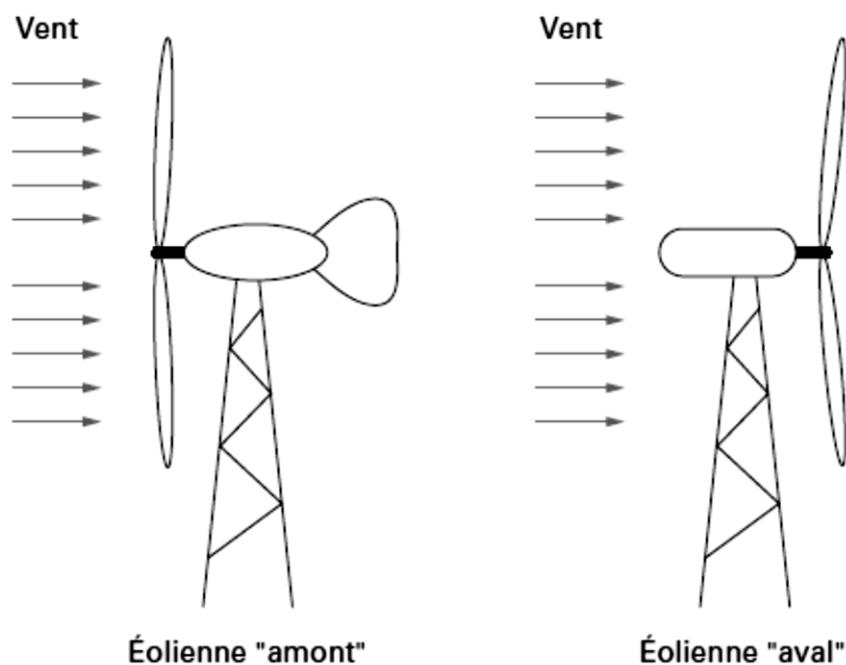


Figure 1 : Configurations à axe horizontal
(Leconte, Rapin, Szechenyi, 2001)

L'éolienne « amont » est équipée généralement d'un système spécifique d'orientation. Les pales se situent du côté de la tour exposé au vent avec un risque de collision avec la tour. Pour éviter ce risque les pales sont rigides. L'air qui s'écoule sur les pales est faiblement perturbé par la tour.

Dans le cas de l'éolienne« aval », elle est auto-orientable dans le lit du vent. Un effet de masque de la tour est observé. Le rotor est flexible.

Important

- Les éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ».
- D'autres configurations (profils oscillants, aubes mobiles, profils en translation) ont été développée, mais sans débouchées sur une industrialisation.

2.4. Descriptif d'une éolienne

Dans une éolienne type « amont », on retrouve trois composants élémentaires : le rotor, la nacelle et la tour.

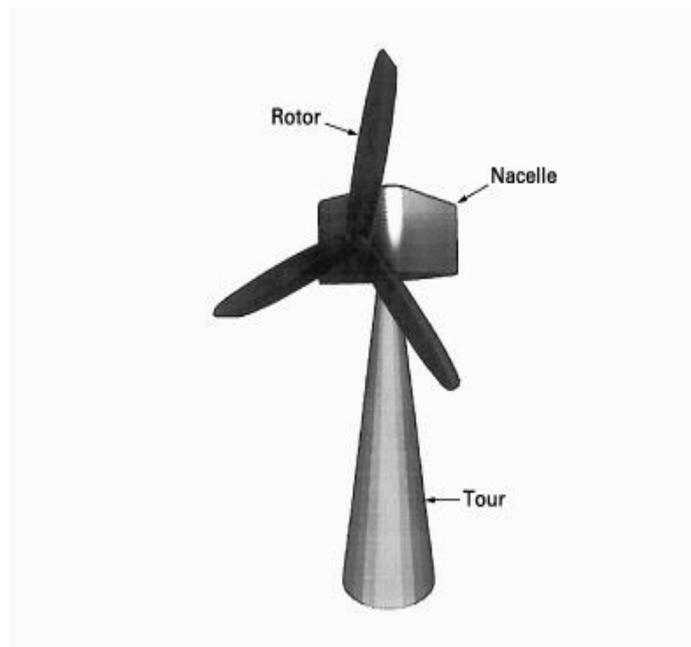


Figure 2 : Composantes d'une éolienne
(Leconte et al., 2001)

- **Rotor**

La transformation de l'énergie du vent en énergie mécanique se produit par le capteur d'énergie. Le rotor est constitué de pales et de l'arbre primaire. Le moyeu assure la liaison entre ces éléments.

Les pales sont en matériaux composites : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Donc légères mais à la fois rigides et hautement résistantes.

La force d'une éolienne est fonction de la surface balayée par ses pales.

- **Tour**

En métal, fixé sur une semelle en béton implantée dans le sol. La tour assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne ; elle doit être solide pour supporter la nacelle, le rotor, mais aussi les charges induites par le vent.

La tour place le rotor à une hauteur conséquente pour un maximum de rendement. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle, 80 m de haut et exceptionnellement 100 m, de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

Il existe trois modèles de tour :

- Mât haubané : simple de construction et s'adresse principalement aux machines de faible puissance. Il est nécessaire de coucher le mât pour toute intervention au niveau de la nacelle.
- Le mât haubané présente l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne dans des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). Cependant, l'emprise au sol du haubanage peut être un inconvénient à son utilisation
- Tour en treillis : simple de construction mais d'aspect inesthétique pour les machines de grande taille.
- Tour tubulaire : de construction plus complexe, abrite certains dispositifs de régulation, de commande et une échelle ou un ascenseur intérieur. Cette échelle ou cet ascenseur est utilisé par le personnel de la maintenance.

- **Nacelle**

Abrite l'installation de génération de l'énergie électrique et ses périphériques. Selon le modèle, plusieurs configurations peuvent être rencontrées.

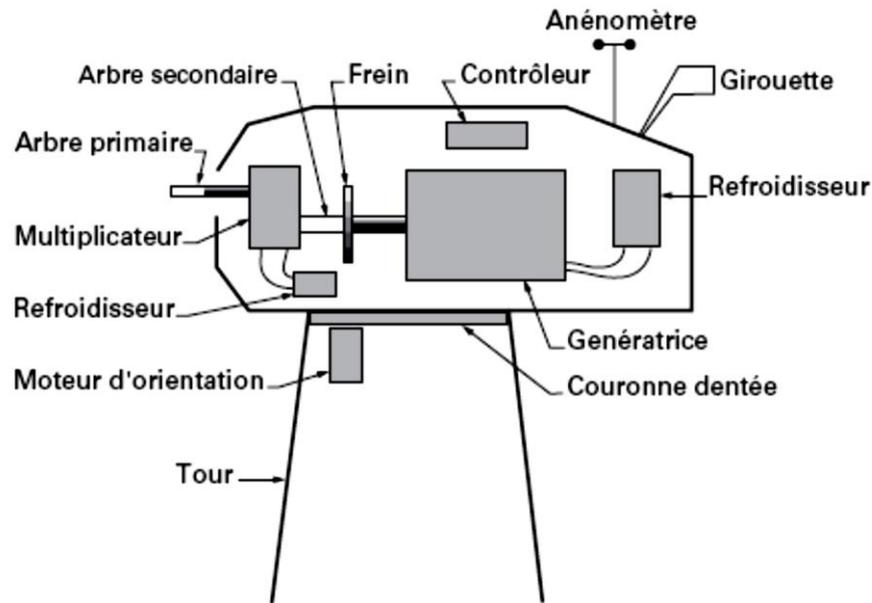


Figure 3 : Éléments d'une nacelle
(Leconte, Rapin, Szechenyi, 2001)

Les différents composants d'une nacelle sont :

- Le multiplicateur de vitesse : sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine ;
- La génératrice : convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne et de gérer les éventuelles pannes. Il s'agit d'un ordinateur qui assure plusieurs fonctions : régit le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gère le pas des pales, le freinage de la machine et assure l'orientation de l'ensemble rotor et la nacelle face au vent. Le contrôleur utilise les données de vitesse fournies par un anémomètre et les données de direction indiquées par une girouette. L'anémomètre et la girouette sont situés à l'arrière de la nacelle.
- Des dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) : ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile ;

- Un groupe hydraulique et ses servitudes ;
- Un dispositif d'orientation de la nacelle, orientant la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, grâce une couronne dentée. Ce dispositif comprend aussi un compteur de tours, qui évite de tordre le câble qui achemine l'énergie électrique de la génératrice jusqu'au pied de la tour. Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. En cas de défaillance du compteur, un interrupteur prend le relais et empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle.
- Les éoliennes sont également équipées d'un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une direction. Ces systèmes évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant la maintenance.

Important

Des câbles électriques descendant à l'intérieur du mat assure le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol.

2.5. Conditions d'utilisation des pales

A. Durée de vie

La durée de vie moyenne des pales est approximativement de vingt ans. Elles sont conçues pour résister à l'abrasion : poussières, pluie, grêle, et à la corrosion chimique : embruns maritimes, rayonnement UV. Et sont dimensionnées pour résister aux sollicitations aérodynamiques et mécaniques.

Des vérifications régulières sont nécessaires pour s'assurer de l'intégrité des pales. Dans certains cas, où les contrôles sont difficiles à réaliser (installations off-shore), des capteurs sont noyés dans les pales (jauges de déformations classiques, interférométrie optique) comme alternative au contrôle humain.

B. Givrage

L'implantation des éoliennes dans une région au climat froid (Europe du Nord, Canada, Alaska...), nécessite l'adoption de systèmes particuliers de dégivrage tels l'installation de résistances chauffantes électriques dans les pales. Le phénomène d'accumulation de givre sur les pales dégrade le rendement aérodynamique mais peut mener aussi à la rupture statique des pales.

C. Foudroiement

Le risque d'un foudroiement n'est pas à exclure lors de l'utilisation des éoliennes. Selon la nature de la composition des pales le risque est plus ou moins important. Les pales en fibres de carbone sont les plus sensibles, car ce matériau présente une très forte conductivité électrique.

Pour protéger la machine, particulièrement l'installation de génération et de contrôle, des dispositifs spécifiques équipent les pales lors de leur construction (treillis métallique noyé dans la structure par exemple).

3. Énergie éolienne offshore (en mer)

Les vitesses de vent sont généralement plus élevées en mer que sur terre, à l'exception de certaines zones. Des campagnes de mesure des régimes de vent offshore sont nécessaires et fondamentales. L'implantation offshore permet :

- De profiter de vents plus réguliers et de vitesses moyennes plus élevées ;
- D'utiliser un espace de développement très vaste ;
- De réduire l'effet de l'impact visuel ;

Cependant, certains aspects doivent être pris en considération :

- Spécificités de l'offshore (modélisation du vent marin et des phénomènes de houle) ;
- Fonctionnement en atmosphère saline ;
- Interactions vent/vagues ;
- Intégration des fermes éoliennes avec les autres acteurs de la mer (pêcheurs, transports...) ;
- Difficulté du transport de l'énergie produite (câbles sous-marins, déperdition en ligne...) ;

- Réduction des possibilités d'intervention.

Une implantation offshore à un coût financier considérable mais compensé par son haut potentiel énergétique particulièrement pour de grandes éoliennes. Des projets de machines de 3 à 5 MW (80 à 120 m de diamètre) ont été réalisés. Plusieurs problèmes se posent à ce type de réalisation :

- Augmentation du poids et de la taille des différents composants (transport...) ;
- Tenue mécanique, à l'usure...

4. Impacts divers

L'implantation d'une éolienne et/ou d'une ferme éolienne doit prendre en compte des critères très différents : environnementaux, économiques, politiques, sociologiques...

- **Interférence électromagnétique** : la réflexion des signaux sur les pales du rotor peut provoquer d'éventuelles interférences sur les systèmes de télécommunication (TV, radars...). Une concertation avec les organismes militaires et civils concernés est nécessaire.
- **Impact visuel** : La présence des éoliennes peut induire des éblouissements ou des ombres sur des habitations. Des images de synthèse doivent être élaborées pour montrer l'impact visuel.
- **Faune** : Des études, menées dans les pays exploitant l'énergie éolienne, ont indiqué l'impact sur la faune lors de la phase de construction des sites. En phase d'exploitation, la faune s'adapte. Les oiseaux réagissent très bien et les risques de collision sont très faibles.
- **Bruit** : Les nouvelles machines ont fortement évolué, de nouveaux profils d'extrémités de pale et des mécanismes de transmission ont été développés pour réduire au maximum le bruit. Ce dernier n'est plus discerné à une distance d'environ huit fois le diamètre des hélices. Aussi, pour des vents de 8m/s le bruit rayonné par l'éolienne est masqué.

QROC

Vrai ou faux ? Si la phrase est fautive, proposez une réponse correcte.

1. Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.
2. Une Eolienne à axe vertical nécessitant l'édification d'une tour.
3. Une éolienne « aval » est auto-orientable dans le lit du vent.
4. Le rotor est le composant qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
5. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales.
6. Le givre et la foudre n'ont aucun effet sur les éoliennes.
7. L'éolienne « amont » requiert des pales flexibles pour éviter tout risque de collision avec la tour.
8. La tour abrite les installations de génération de l'énergie électrique.
9. la durée de vie prévue pour une pale est de l'ordre de cinq ans.
10. Les éoliennes ne présentent aucune interférence électromagnétique avec les systèmes de télécommunication.

SOLUTION

1. Vraie.
2. Faux. Une Eolienne à axe vertical ne nécessite pas l'édification d'une tour. Le dispositif de génération électrique repose sur le sol.
3. Vrais.
4. Vrais.
5. Vrais.
6. Faux. Le givre et la foudre ont un effet sur les éoliennes, et sont des éléments à prendre en compte lors de la construction des éoliennes.
7. Faux. L'éolienne « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour.
8. Faux. La tour supporte la nacelle et le rotor.
9. Faux. La durée de vie prévue pour une pale est de l'ordre de vingt ans lors de son élaboration plusieurs facteurs sont à prendre en considération (solllicitations aérodynamiques et mécaniques, résistance à l'abrasion, corrosion chimique).
10. Faux. Les éoliennes peuvent présenter des interférences électromagnétiques avec les systèmes de télécommunication.

Références bibliographiques

- Astier S., *Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule*, 2008. Techniques de l'ingénieur d3935, 1- 20.
- Autret E., Rogaume Y., *Production de chaleur à partir de bois - Émissions atmosphériques. Bilan, impact et évolution*, 2011. Techniques de l'ingénieur, Be 8751, 1- 19.
- Bernard J., *Génie énergétique - Energie solaire. Calculs et optimisation*. 2^{ème} édition, Ellipses, 2011.
- Bobin J.-L., Huffer E., Nifenecker H., *L'énergie de demain techniques - environnement – économie*, EDP Sciences, 2005.
- Damien A., *La biomasse énergie*, 2e édition, Dunod, 2013.
- Deglise X., Donnot A., *Bois énergie*, 2004. Techniques de l'ingénieur, Be 8535, 1 - 21.
- Desmons J., *Aide-mémoire génie climatique*. 2^{ème} édition, Dunod, 2009
- Ferrière A., *Centrales solaires thermodynamiques*, 2008. Techniques de l'ingénieur, BE8903, 1 - 20.
- Foster R., Ghassemi M., Cota A., *Solar energy renewable energy and the environment*, Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- Fox B., Bryans L., Flynn D., Jenkins N., Milborrow D., O'Malley M., Watson R., Anaya-Lara O., *Energie électrique éolienne, production, prévision et intégration au réseau*, 2^{ème} édition, Dunod, 2015.
- Hankins M., *Installations solaires photovoltaïques autonomes. Conception et installation d'unités non raccordées au réseau*, Dunod, 2012.
- Joffre A., *Energie solaire thermique dans le bâtiment. Chauffage. Climatisation*, 2005. Techniques de l'ingénieur Be 9165, 1 - 7.
- Labouret A., Cumunel P., Braun J.-P., Faraggi B., *Cellules solaires - Les bases de l'énergie photovoltaïque*, 5^{ème} édition, Techniques et Scientifiques Françaises, 2010.
- Labouret A., Viloz M., *Énergie solaire photovoltaïque*. 2^{ème} édition, Dunod, 2005.
- Labouret A., Viloz M., *Énergie solaire photovoltaïque*. 4^{ème} édition, Dunod, 2009.
- Labouret A., Viloz M., *Installations photovoltaïques Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau*, 5^{ème} édition, Dunod, 2012.

- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie*, 2008. Techniques de l'ingénieur BE 8590v2, 1 - 24.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface - Aquifères superficiels et stockage thermique souterrain*, 2010 (a). Techniques de l'ingénieur BE 8 593, 1 – 16.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface - Présentation et pompes à chaleur*, 2010 (b). Techniques de l'ingénieur BE 8591, 1-4.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface : Puits canadiens, capteurs enterrés et géostructures*, 2010 (c). Techniques de l'ingénieur, BE 8592, 1– 16.
- Leconte P., Rapin M., Szechenyi E., *Éoliennes*, 2001. Techniques de l'ingénieur BM 4640, 1 - 23.
- Le Moal A., Nicolas E., *Physique chimie : Terminales STI 2 D et STL*, Ellipses, 2013.
- Martin J., *Énergies éoliennes*, 1997. Techniques de l'ingénieur B 8585, 1 - 21.
- Multon B., Gergaud O., Robin G., Ben ahmed H., 2003. *Consommation d'énergie et ressources énergétiques*. Techniques de l'ingénieur, D3900, 1 - 12.
- Multon B., *Production d'énergie électrique par sources renouvelables*, 2003. Techniques de l'ingénieur D 4005, 1- 11.
- Pauchet W., *Le chauffe-eau solaire*, 2007. Techniques de l'ingénieur TBA 2655, 1- 5.
- Peycru P., Dupin J.-M., Fogelgesang J.-F., Grandperrin D., Van Der Rest C., Cariou F., Perrier C., Augère B., *Géologie tout-en-un*, Dunod, 2008.
- Rapin M., Noël J.-M., *Energie éolienne - Principes - Etudes de cas*, Dunod, 2010
- Rogaume Y., *Production de chaleur à partir du bois : Combustible et appareillage*, 2005. Techniques de l'ingénieur be8747, 1 -13.
- Slaoui A., *Électricité photovoltaïque - Principes*, 2013. Techniques de l'ingénieur BE 8 578v2, 1 - 14.
- Slaoui A., *Électricité photovoltaïque, Matériaux et marchés*, 2013. Techniques de l'ingénieur BE 8 579v2 ,1 -12.