

Université M'Hamed Bougara- Boumerdès

Faculté des Sciences

Département de Chimie.

Energies renouvelables

Dr S. DEMIM

MASTER I
CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

Energies Renouvelables

Dr Soraya DEMIM

Avant-propos

Ce polycopier en Energies Renouvelables est un outil pédagogique, destiné aux étudiants LMD en science de la matière. Plus particulièrement, les étudiants de Master I Chimie de l'Environnement.

Le manuscrit comporte quatre chapitres :

- Biomasse et Production de Chaleur ;*
- Géothermie et Production de Chaleur ;*
- Système Solaire Actif ;*
- Energie Eolienne.*

Chaque chapitre présente, dans un ordre aussi logique que possible, des notions et des concepts élémentaires. 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.

Soraya DEMIM

Sommaire

Avant – propos

Chapitre 1

Biomasse et production de chaleur 1

1.1. Biomasse	1
1.2. Source	2
1.2.1. Filière bois	2
1.2.2. Produits et sous-produits agricoles	2
1.2.3. Cultures énergétiques dédiées	2
1.3. Bois	3
1.3.1. Origine	3
1.3.2. Composition et propriétés du bois	4
1.3.2.1. Composition chimique	4
1.3.2.2. Caractéristiques physiques	5
1.4. Combustion	7
1.4.1. Notions de base	7
1.4.2. Paramètre de combustion	9
1.4.3. Appareils de combustion	10

Chapitre 2

Géothermie et production de chaleur 16

2.1. Géothermie	16
2.2. Origine de la chaleur	16
2.2.1. Désintégration des éléments radioactifs	16
2.2.2. Dissipation de l'énergie primitive	17
2.3. Gradient géothermal et flux de chaleur terrestre	17

2.4.	Principaux types de ressources géothermiques	18
2.5.	Elément d'un gisement géothermal	20
2.6.	Utilisations des ressources géothermales	21
2.7.	Production d'énergie thermique	22
2.7.1.	Techniques de captage de la chaleur pour le chauffage	22
2.7.2.	Pompes à chaleur	23
2.7.3.	Captage de la chaleur du sol à de faibles profondeurs	24
2.7.4.	Captage de chaleur sur des aquifères superficiels	27
2.7.4.1.	Présentation de la filière	28
2.7.4.2.	Principe de fonctionnement d'une opération	29

Chapitre 3

Système solaire actif	31
------------------------------------	-----------

3.1.	Le Soleil	31
3.1.1.	Origine de l'énergie solaire	31
3.1.2.	Caractéristiques du rayonnement solaire	32
3.2.	Conversion de l'énergie solaire	34
3.2.1.	Le solaires thermiques	34
3.2.1.1.	Principe	34
3.2.1.2.	Capteurs solaires	35
3.2.1.3.	Exemples pratiques : Le chauffe-eau solaire	37
3.2.2.	Solaire thermodynamique	39
3.2.2.1.	Principe	39
3.2.2.2.	Aspect technique	40
3.2.3.	Énergie photovoltaïque	44
3.2.3.1.	Effet photovoltaïque	44
3.2.3.2.	Transfert d'énergie des photons aux charges électriques	45
3.2.3.3.	Type de semi-conducteur	46
3.2.3.4.	Concept technique	47

Chapitre 4

Energie éolienne	49
<hr/>	
4.1. Le vent	49
4.1.1. Description	49
4.1.2. Caractéristiques	49
4.1.3. Choix du site	50
4.2. Energie éolienne	51
4.2.1. Applications des éoliennes	51
4.2.2. Principe	52
4.2.3. Type d'éolienne	52
4.2.4. Descriptif d'une éolienne	54
4.2.5. Conditions d'utilisation des pales	57
4.2.6. Énergie éolienne offshore	58
Références bibliographiques	59

Chapitre 1

Biomasse et production de chaleur

1.1. 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 l'énergie de la biomasse en énergie utilisable. Chacune n'est cependant pas adaptée à toutes les catégories de biomasse. Il s'agit de :

- 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 produit.
- 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 urbains et des bords de routes, bois de rebut, 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, ...).

1.2. 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.

1.2.1. Filière bois

Trois principales filières sont à considérer :

- les ressources issues de l'exploitation forestière et des espaces boisés qui génèrent des plaquettes forestières. Celles-ci proviennent de résidus d'élagage ou de défrichage qui peuvent ainsi contenir des écorces, des branches, des brindilles, des feuilles. Les opérations entrant en jeu dans leur production sont l'ébranchage et la découpe, le débardage, le déchiquetage et le séchage ;
- l'industrie du bois de première transformation et seconde transformation 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 non souillé : emballages industriels, palettes et emballages légers.

1.2.2. 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, 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 (colza, tournesol), 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,).

1.2.3. Cultures énergétiques dédiées

Les cultures dédiées sont des cultures annuelles ou pérennes dont l'objectif principal de leurs implantations est la valorisation énergétique. On distingue:

- les espèces herbacées pérennes : Ces cultures ont une durée de vie pouvant varier entre 10 et 20 ans et sont récoltées annuellement.

- la culture de bois à croissance rapide : Ce sont des cultures pérennes d'une durée de vie de 20 ans environ, plantées à haute densité et dont on récolte les rejets de souche tous les 2 ou 3 ans. Il s'agit de TCR ou TTCR (taillis à courte ou très courte rotation) qui permettent d'augmenter le rendement matière en biomasse avec des combustibles de type bois qui sont tout à fait viables dans les systèmes de combustion existants. Il s'agit le plus souvent de peupliers et de saules.

1.3. Bois.

1.3.1. Origine

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

- l'exploitation de la forêt ;
- la première transformation du bois ;
- la seconde transformation du bois ;
- l'industrie des emballages ;
- les entreprises de démolition et de rénovation ;
- les décharges et déchetteries.

a. La forêt

La disponibilité réelle de la ressource en bois mobilisable en forêt est liée à différents facteurs qui sont l'âge des peuplements et leurs caractéristiques (essences...), leur accessibilité (pentes, accès...), la diversité des propriétaires forestiers et la dispersion des parcelles, ainsi que le marché de l'offre et de la demande.

La forêt peut proposer du bois de feu, des houppiers inutilisés lorsque les grumes ont été exploitées et des branches d'élitage.

b. Sous-produits des entreprises de la filière bois

Les résidus de l'industrie du bois peuvent être séparés en résidus massifs et en résidus fractionnés. L'utilisation des résidus massifs en chaufferies automatiques nécessite une préparation préalable par broyage, afin d'obtenir des plaquettes facilement exploitables. Les résidus fractionnés peuvent, pour la plupart, être

valorisés directement, mais leurs caractéristiques spéciales (granulométrie, masse volumique...) demandent des installations adaptées.

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

On peut recenser trois grandes familles de produits susceptibles d'être valorisés à des fins énergétiques : les emballages industriels (caisses,...), les palettes et caisses palettes et les emballages légers (cageots, ...).

Leur emploi comme combustible en chaufferies n'est possible que s'ils sont broyés et déferrailés.

1.3.2. Composition et propriétés du bois

1.3.2.1. Composition chimique

Le bois, matière organique, composé de trois polymères principaux que sont la cellulose, la lignine et les hémicelluloses.

- La cellulose polymère à haute masse molaire dont l'élément de base est un motif cellobiose, se présente sous forme de fibrilles et constitue la structure de la paroi cellulaire du bois. Elle représente de 40 à 50 % de la masse de matière sèche.
- La lignine, polymère phénolique, constitue la matrice de cette paroi cellulaire et 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 ou C6 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 contenus dans le bois lui-même (quantités variables) ou provenir des impuretés accrochées aux écorces

La composition du bois varie selon l'essence, mais également selon de multiples paramètres tels que la nature du sol, les conditions de croissance, l'âge de l'arbre ou la période d'abattage.

L'analyse élémentaire du bois fait apparaître trois éléments principaux que sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. On retient couramment la répartition massique suivante : Carbone : 50 % ; Hydrogène : 6 % ; Oxygène : 44 %.

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

1.3.2.2. Caractéristiques physiques

Les bois de chauffage se présentent soit sous forme de bûches, soit sous forme divisée. Les principales caractéristiques physiques ne sont pas différentes pour ces deux présentations, si ce n'est pour l'aspect granulométrie.

a. Taux d'humidité

Le bois peut contenir une quantité importante d'eau. C'est un facteur déterminant dans l'utilisation du bois comme combustible. Elle influe sur la conservation du bois, sur sa masse volumique et sur son contenu énergétique.

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

- par rapport à la masse de bois anhydre, on définit l'humidité sur sec (H_s) :

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

- par rapport à la masse de bois humide, on définit l'humidité sur brut (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 forte variabilité. Il convient donc de définir :

- la masse volumique vraie du matériau ou masse volumique de la matière ligneuse qui est pratiquement indépendante de l'essence ($1530 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- la masse volumique apparente du bois massif. Celle-ci dépend directement de la porosité du bois et son humidité ;
- la masse volumique du bois divisé, dépend de la masse volumique du bois, de son humidité et surtout de sa granulométrie.

c. Granulométrie

La granulométrie représente la répartition en classe de la taille des particules composant un combustible. Cette grandeur n'est utilisée que pour les combustibles divisés et ne s'applique pas au bois sous forme de bûches. Elle offre une indication sur la taille des morceaux de bois constituant l'assortiment de combustibles.

d. 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 par la combustion demeure à l'état de vapeur. Le PCI anhydre du bois peut donc être exprimé de la manière suivante :

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

avec : PCS pouvoir calorifique supérieur, L_v enthalpie de vaporisation de l'eau, $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 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 bois est humide, plus son PCI est bas.

e. Teneur en cendre

La teneur en matières minérales de la biomasse est généralement appelée « teneur en cendres », exprimée en pourcentage, représente le poids de cendres par rapport au poids total du combustible sec.

Elle comporte des matières qui se sont accumulées dans la biomasse lors du processus de croissance des arbres auxquelles s'ajoutent de la terre, du sable et d'autres contaminants qui se mélangent au biocombustible au moment de sa récupération et de sa manutention. Les teneurs en cendres accumulées lors de la croissance sont généralement faibles dans le bois (0,5 %) et plus élevées dans l'écorce (3,5 %). En général, la teneur en cendre peut atteindre la valeur de 8 % selon les cas.

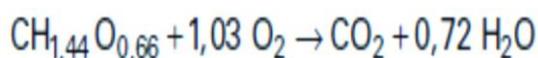
Aussi, cette teneur dépend, entre autres, de la provenance du biocombustible, de la saison et du mode de manutention, ce qui peut amener des variations fort appréciables.

Le principal problème des cendres est leurs évacuations, qui doivent être en adéquation avec la composition du bois utilisé.

1.4. Combustion

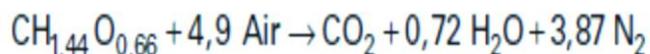
1.4.1. Notions de base

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 ne brûle pas spontanément et doit être chauffé par une source externe avant de libérer des gaz combustibles qui vont eux-mêmes s'enflammer lorsque la température sera suffisante. Environ 85 % de la masse de bois brûle ainsi sous forme de gaz : le bois est chauffé, puis à partir de 300 °C, il dégage des gaz (phase de pyrolyse) qui, au contact de l'air sont oxydés. Les 15 % restants brûlent par combustion hétérogène : de l'air est injecté dans les braises et capte le carbone constitutif pour dégager du CO₂. Globalement, l'équation de combustion complète du bois peut s'écrire :



Dans la plupart des cas, la combustion ne se fait pas avec de l'oxygène pur, mais avec de l'air. L'air ne contient pas que de l'oxygène ; il est constitué à 21 % d'O₂ et 79 % de N₂.

L'équation de combustion devient alors :



D'une manière générale la combustion des solides se déroule comme suit : séchage du combustible ; dégradation thermique (pyrolyse) et combustion des gaz ; oxydation lente du résidu charbonneux.

Comme pour toute combustion de solides, l'étape primaire de la combustion du bois est la pyrolyse qui produit, à partir de 300 °C, les gaz inflammables en parallèle avec le charbon de bois et les goudrons composés principalement de produits aromatiques plus ou moins condensés.

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. La **figure 1. 1** schématise de façon simplifiée la réaction.

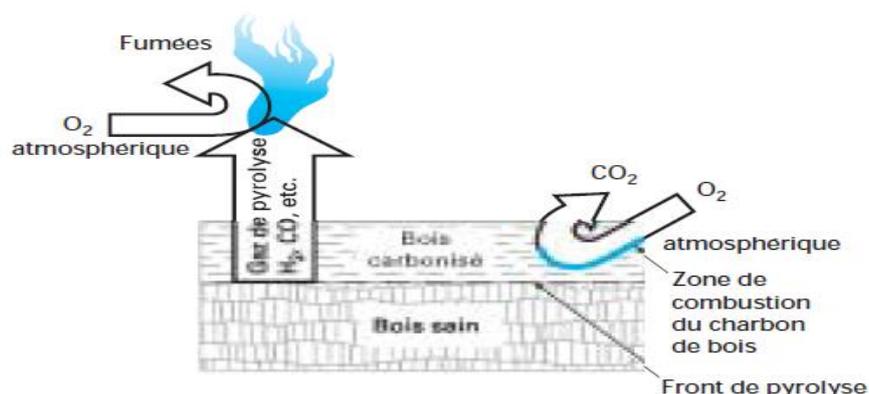
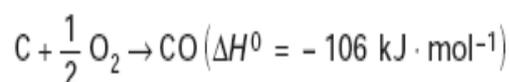
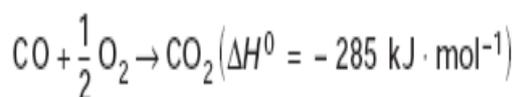


Figure 1.1 : Schéma de principe de la combustion

Le bois sain chauffé commence à se pyrolyser à partir de sa surface en donnant des gaz combustibles et un résidu solide combustible. La zone de pyrolyse avance dans le bois sain. Les produits de la pyrolyse migrent alors vers la surface au travers du charbon de bois. C'est lorsque des oxydants ou des réducteurs sont mis en présence des produits de la pyrolyse que s'amorce la combustion ou la transformation chimique du gaz et du charbon. La combustion se fait à des températures comprises entre 1 500 et 2 000 °C. Les principales réactions se faisant à haute température, le produit primaire est probablement CO selon :



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



Il est important de laisser le temps aux réactions d'oxydation de CO d'agir, sinon il peut facilement être entraîné dans les fumées et devenir ainsi un polluant rejeté à l'atmosphère.

Dans les cas de mauvais réglage de la combustion soit par défaut d'air, soit à cause de temps de séjour des gaz dans le brûleur trop faible, une partie du carbone des gaz se retrouve dans les fumées. Ainsi une combustion mal réglée se traduit par la formation d'une quantité de suies importantes.

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.

1.4.2. 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 des solutions consiste à mettre beaucoup plus d'oxygène (air) que 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 à deux niveaux (**Figure 1.2**) :

- Pour brûler le résidu carboné, l'air primaire ;
- Pour brûler les gaz combustibles, l'air secondaire.

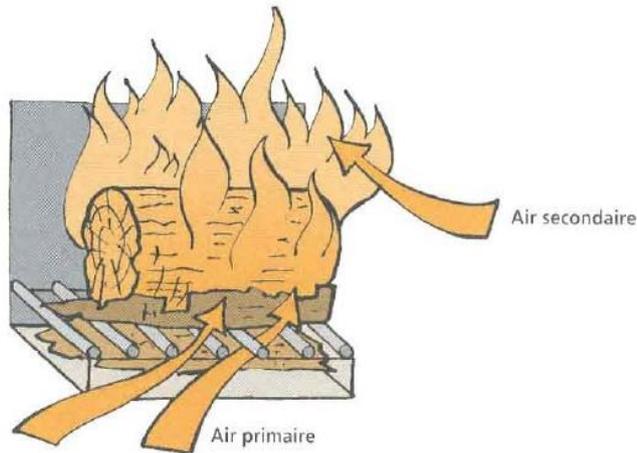


Figure 1.2 : Alimentation en air primaire et secondaire

- **Turbulence** : pour favoriser les contacts entre les gaz de pyrolyse et l'oxygène, une des solutions utilisées est l'optimisation des mélanges ; 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 bien achever la combustion, il est important d'avoir un long temps de contact entre les gaz combustibles chauds et l'air comburant (une bonne collision entre les gaz). Pour cela, les installations modernes font passer les gaz par un réseau de chicanes prolongeant le temps de contact entre les gaz et l'air.

1.4.3. Appareils de combustion

Les différents appareils de chauffage domestique 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

- Les appareils à chargement manuel sont généralement des systèmes de petite puissance (cheminée, poêles, inserts) alimentés en bûches et dont le fonctionnement dépend beaucoup de l'utilisateur.
- Les systèmes à chargement automatique utilisent le plus souvent des combustibles divisés (granulés, plaquettes...) et peuvent être de puissances plus importantes, avec une combustion mieux maîtrisée.

b. Classement par type de chauffage

- Appareils d'appoint (poêles, inserts, cheminée, cuisinières) utilisés dans de nombreuses habitations pour réduire les consommations du système de chauffage principal. La transmission de la chaleur à l'air se fait par convection et rayonnement autour de l'appareil.
- Appareils reliés au réseau de chauffage central, il s'agit alors de chaudières dont le fonctionnement peut être manuel ou automatique.

C. Classement par type de combustion

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

C1. Appareils divisés

- Cheminées
Rendement très faible, de l'ordre de 10 %. Elles demeurent utilisées pour leur agrément et pour le côté convivial qu'elles procurent. Certaines cheminées sont également équipées d'un récupérateur de chaleur qui améliore légèrement le rendement.
- Poêles
Les poêles sont des appareils d'appoint pour chauffer une pièce ou durant les mi-saisons pour maintenir des températures suffisantes. Ils permettent de chauffer principalement une pièce par convection naturelle, ou plusieurs pièces via une distribution d'air chaud par des gaines.

- Cuisinières

Les cuisinières permettent, avec le même appareil d'assurer le chauffage de l'habitation et de proposer un dispositif de cuisson complet. Ces installations ont des rendements compris entre 30 et 70 % et demandent beaucoup de manipulations : chargement de bois, décentrage, ramonage. De plus, ce sont des appareils lourds qui ne chauffent que la pièce dans laquelle ils sont installés.

- Foyers fermés. Inserts

Ces appareils sont de fonctionnement et de principe similaires : le foyer fermé est un appareil conçu en usine, puis posé dans une maison avant d'être habillé selon le style choisi, alors qu'un insert est un appareil de conception proche, qui peut être installé facilement dans une cheminée existante (**Figure 1.3**). La principale différence réside dans les dimensions des systèmes.

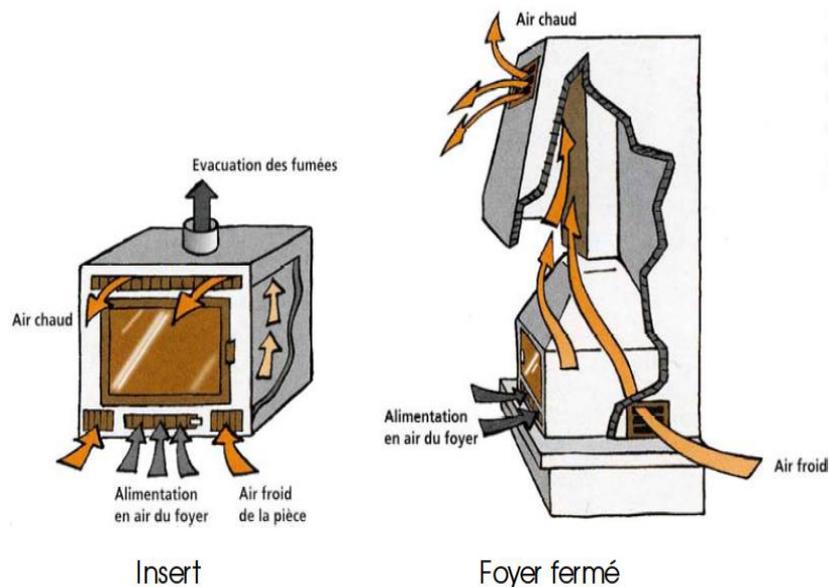


Figure 1.3 : Insert et Foyer

La combustion dans ce type d'installation est mieux contrôlée que dans une cheminée classique grâce à un apport d'air mieux maîtrisé.

De plus, les inserts et foyers fermés permettent une récupération de chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur dans lequel circule un flux d'air (voir eau) qu'il est également possible de contrôler.

- Chaudières à combustion semi-inversée

Le principe de combustion est amélioré par la recirculation des gaz de combustion dans la chambre. Le temps de combustion est plus long, permettant une meilleure oxydation des gaz ; de l'air secondaire peut alors être injecté à la sortie de la chambre primaire pour finir l'oxydation. Ce type de dispositif permet également d'améliorer l'échange thermique et le rendement de l'installation (pouvant atteindre ici 80 %).

Le système de régulation est identique au précédent, avec un volet d'entrée d'air primaire qui se règle en fonction des besoins de chauffage.

- Chaudières à combustion inversée

La combustion est dite inversée car elle se déroule du haut vers le bas, inversement au sens normal de convection. L'air primaire entre alors par le haut de la chambre et la combustion se fait au travers de la grille sur laquelle le bois est disposé. Ces chaudières demandent, de par leur conception, un tirage naturel plus important de la cheminée. L'air secondaire est injecté sous la grille dans la chambre de combustion des gaz.

Ces systèmes ont de bons rendements de combustion et de bons rendements thermiques (jusqu'à 85 %). Ils demandent cependant une vérification plus régulière de l'état de la grille, celle-ci étant soumise à de fortes températures qui conduisent à une dégradation plus rapide.

- Chaudières de type turbo

Ces installations gardent le principe de la combustion inversée, avec un tirage forcé par l'intermédiaire d'un ventilateur. Ce ventilateur permet à la fois de mieux gérer l'apport en air dans la chambre de combustion, provoquant ainsi une combustion mieux maîtrisée, et de forcer le tirage de la cheminée, quelles que soient les conditions.

Le rendement thermique de ces installations est légèrement supérieur à celui des autres systèmes (85-90 %). La régulation est basée sur le fonctionnement du ventilateur en fonction de la demande en énergie.

Ces systèmes performants sont plus fragiles que les systèmes classiques : la température de combustion étant plus élevée que dans les systèmes classiques, les grilles sont davantage fragilisées, et les échangeurs de chaleur

ne sont pas toujours suffisamment dimensionnés, demandant un entretien plus important.

C3. Chaudières automatiques

Ces installations, peu développées, sont d'une utilisation pratiquement aussi simple qu'une installation à combustibles fossiles de type gaz ou fioul. En effet, l'alimentation se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin ou d'un tapis, à partir d'un silo jusqu'au foyer de combustion. Ces systèmes peuvent différer selon le type de bois brûlé, le type de stockage, le type de transfert et le type de combustion au sein de la chaudière.

Chapitre 2

Géothermie et production de chaleur

2.1. Géothermie

Géothermie, du grec « géo », terre et « thermie », chaleur ; est l'utilisation de la chaleur naturelle de la terre, en tant que source d'énergie locale, concurrentielle, durable et acceptable du point de vue écologique et social, pour produire de l'électricité et pour les applications directes de la chaleur.

Il existe deux grandes filières essentielles l'une électrique, l'autre thermique. La production d'électricité concerne particulièrement certaines zones liées au volcanisme récent. La filière thermique, mobilisable quasiment en tous lieux, comporte de nombreuses applications qui s'étendent du chauffage de la maison individuelle jusqu'à la distribution de chaleur via des réseaux de chaleur à des milliers de logements.

2.2. Origine de la chaleur

Deux phénomènes principaux 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 dite « primitive ».

2.2.1. Désintégration des éléments radioactifs

La désintégration des éléments radioactifs contenus dans la croûte représenterait à elle seule plus de 90 % de l'énergie dissipée. Cette théorie s'appuie sur le pourcentage présumé d'éléments radioactifs contenus dans les structures terrestres. L'uranium, le thorium et le potassium sont, parmi les éléments radioactifs encore présents aujourd'hui, ceux présentant une production de chaleur significative. En revanche, certains éléments à courte période ont pu exister au moment de la formation de notre planète et ainsi contribuer à l'importante émission de chaleur primitive, mais ils ont disparu depuis longtemps.

Étant donné leur désintégration, le nombre d'éléments radioactifs est en constante décroissance depuis le début de la formation du globe produisant ainsi un dégagement de chaleur en régulière diminution.

On estime que le flux total de chaleur a été divisé par deux depuis l'origine. Ce phénomène naturel très lent signifie que notre planète se refroidit progressivement.

2.2.2. Dissipation de l'énergie primitive

La formation de la terre résulte d'une phase, dite d'accrétion, correspondant à l'agrégation de gaz, de poussières et de divers corps célestes. C'est durant cette phase qu'une énergie considérable s'est accumulée dans la masse constituant la planète.

La chaleur créée à l'intérieur du globe se dissipe vers la surface par conduction à travers les masses solides et par convection au travers des milieux chauds et visqueux. La zone supérieure de la lithosphère joue le rôle de barrière isolante d'où s'échappent cependant par certains points de fuite de la lave, et très localement un flux élevé de chaleur.

2.3. Gradient géothermal et flux de chaleur terrestre

Le gradient géothermal G ($K \cdot m^{-1}$) mesure 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'échelonnant de 10 à 40°C par km ;
- Zones semi-thermiques, ayant des gradients de température s'élevant jusqu'à 70 °C par km ;
- Zones hyperthermiques qui représentent des gradients de températures plusieurs fois supérieurs à ceux rencontrés dans les zones non thermiques.

La chaleur produite et accumulée dans les profondeurs de la terre et se transmet vers la surface mais sous une forme et avec des intensités très différentes qui dépendent notamment de la localisation du point considéré.

Dans les régions géologiquement calmes, c'est-à-dire en dehors des frontières de plaques, l'énergie est essentiellement transmise par conduction, avec un gradient géothermal de valeur moyenne (3 K/100 m) et assez régulièrement réparti.

Dans les régions géologiquement actives, telles que les frontières de plaques, les roches en fusion se rapprochent ou atteignent la surface. Le transfert d'énergie s'effectue par convection et les quantités de chaleur mises en jeu sont très importantes, ce qui se traduit localement par des valeurs de gradient géothermal et de densité de flux de chaleur terrestre bien plus élevées que celles rencontrées dans des zones géologiquement stables. Ainsi, dans les zones volcaniques, le gradient maximal observé est de l'ordre de 50 K par 100 m.

2.4. Principaux types de ressources géothermiques

La chaleur géothermique peut être exploitée grâce à la présence dans le sous-sol de véritables gisements où se trouve stockée l'énergie calorifique.

a. Gisements en zones géologiquement stables

Dans les grands bassins sédimentaires, la succession des terrains montre la présence fréquente de couches poreuses et perméables (calcaires, sables...) contenant des aquifères.

La densité de flux thermique est en général faible ($0,060 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) et la température du fluide géothermal peut être comprise entre 50 et 100 °C pour des profondeurs de l'ordre de 1 000 à 2 000 m. Ces gisements sont de grande extension. Ils offrent généralement une grande continuité horizontale, ce qui permet d'extrapoler les données connues en un site à d'autres sites voisins. Leur exploitation est essentiellement à usages thermiques (chauffage d'habitations, de serres agricoles, ...); on parle de géothermie basse énergie ou basse enthalpie.

Plus près de la surface, des nappes aquifères peu profondes (de quelques mètres à moins d'une centaine de mètres de profondeur) dont la température est comprise entre 10 et 20 °C peuvent être également exploitées au moyen de pompes à chaleur, généralement pour le chauffage et/ou la climatisation d'immeubles. C'est le domaine de la géothermie très basse énergie.

b. Gisements en zone géologiquement actives

Ce type de gisement est constitué d'une source de chaleur alimentée par une intrusion magmatique remontant près de la surface, un réservoir perméable dans lequel un fluide circule dans des fractures, une couverture imperméable qui permet

de contenir le fluide dans le gisement. Parfois à la faveur de failles, une petite partie du fluide géothermal remonte vers la surface en donnant naissance à des sources thermales.

Dans les régions à volcanisme récent ou actuel, le gradient géothermal peut être élevé (par exemple, 20 K par 100 m) en raison d'intrusions magmatiques pénétrant la croûte terrestre jusqu'à des profondeurs proches de la surface (moins de 5 km).

C'est dans ces régions que l'on peut trouver, à des profondeurs comprises entre 500 et 1 500 m, des gisements dits 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. Ils se présentent sous forme de vapeur sèche ou de vapeur humide et leur valorisation s'effectue par production d'électricité : la vapeur géothermale extraite est détendue directement dans une turbine.

Les mêmes terrains volcaniques, mais un peu moins chauds (gradients de 5 à 10 K par 100 m) peuvent donner lieu à des gisements de moyenne énergie. Les ressources géothermales se présentent sous forme d'eau chaude dont la température est comprise entre 90 °C et 180 °C. Elles peuvent être exploitées pour des usages thermiques, mais elles le sont plus généralement pour de la production d'électricité.

c. Gisement des roches peu ou pas perméables

La plupart des formations rocheuses qui constituent la croûte terrestre sont peu ou pas perméables, ne renferment pas d'eau en quantité suffisante pour permettre, par le biais de forages, l'extraction de la chaleur contenue dans le sous-sol. En l'absence de fluide naturel, deux voies restent toutefois possibles pour permettre cette extraction :

- Installer dans le sol à faible profondeur des capteurs enterrés dans lequel va circuler, en circuit fermé, un fluide caloporteur. La chaleur captée est transférée par le biais d'une pompe à chaleur 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 » ;
- Recréer les conditions d'existence de réservoirs géothermiques naturels (par fracturation hydraulique) dans lesquels serait injectée depuis la surface de l'eau qui serait ensuite récupérée chaude après son passage

dans le réservoir créé. C'est le domaine de la géothermie profonde des roches fracturées.

En théorie, ce concept est assez simple à mettre en œuvre. Il s'agit dans un premier temps d'accroître la perméabilité de formations rocheuses peu ou pas perméables, situées à une profondeur suffisante pour obtenir des températures intéressantes, en fracturant la roche par injection d'eau sous très forte pression, dans un ou plusieurs forages. Un réseau de fractures suffisamment dense et étendu étant ainsi créé, il suffit alors dans un second temps d'y faire circuler de l'eau depuis la surface pour qu'elle se réchauffe au contact des roches et de récupérer ensuite cette eau réchauffée pour l'utiliser à des fins de production d'électricité ou de chauffage.

La faisabilité technique d'un tel concept n'est pas encore acquise. Plusieurs programmes de recherche sont en cours de par le monde.

2.5. Élément d'un gisement géothermal

Pour pouvoir exploiter une ressource géothermale, 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, il est possible de prélever la chaleur du sous-sol par échange via 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 servira de fluide caloporteur pour céder sa chaleur en surface.
- Pour les sondes verticales, la chaleur est prélevée par l'intermédiaire d'une boucle fermée contenant un fluide caloporteur (l'eau glycolée ou saumure).
- Pour les roches profondes, de l'eau de surface est injectée dans un puits d'injection et récupérée après échange par des puits producteurs.

2.6. Utilisations des ressources géothermales

La température de la ressource est l'élément déterminant pour les applications envisageables à partir de la chaleur géothermale, entre 20 et 200 °C, deux grandes catégories d'applications, les applications thermiques jusqu'à environ 110 à 120 °C et la production d'électricité à partir de 120 °C. Les principales applications se déclinent comme suit :

- 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 pour utilisation directe de la chaleur pour le chauffage en milieu urbain de l'habitat et des équipements associés.
- Usages directs autres que réseau de chaleur. Les applications sont nombreuses : culture de serres, piscicultures, piscines, thermalisme, ...
- Application assistées 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.

La **figure 2.1** illustre les principales utilisations de la géothermie en fonction de la température.

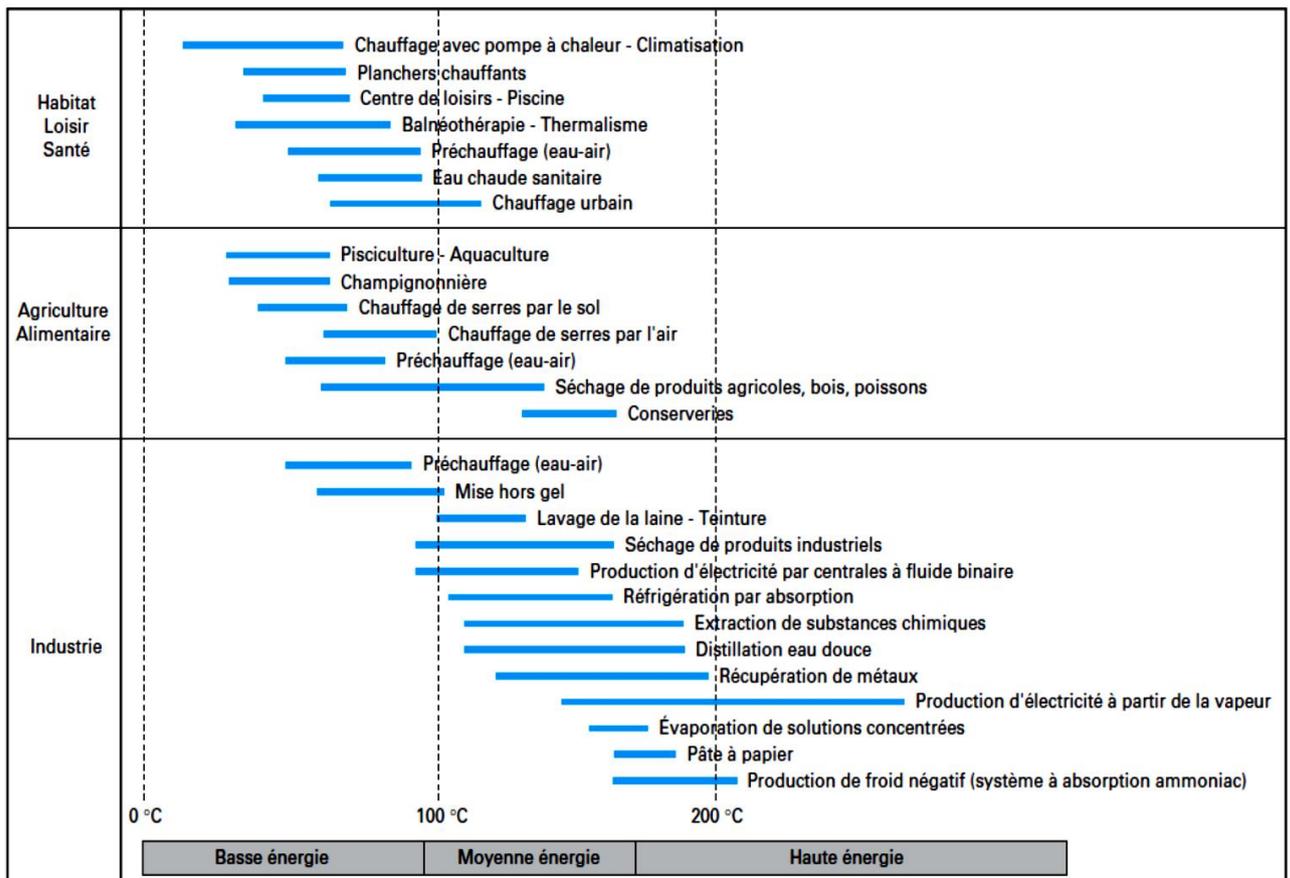


Figure 2.1 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température

2.7. Production d'énergie thermique

2.7.1. Techniques de captage de la chaleur pour le chauffage

Le système géothermique fonctionne pratiquement comme une thermopompe et peut être installé pour un bâtiment neuf ou existant. 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, on peut considérer 2 techniques spécifiques de la géothermie :

- Captage de la chaleur du sol à de faibles profondeurs. Cette technique est adaptée au pavillonnaire et au petit résidentiel.
- Captage de la chaleur issue de nappes phréatiques. Ces nappes étant généralement à de grandes profondeurs. Cette technique est adaptée au grand résidentiel (généralement plusieurs milliers de logements).

2.7.2. Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur (PAC) permettent de valoriser des sources de chaleur à « basse température », comme l'air ambiant, l'eau des nappes souterraines, le sol... pour couvrir des besoins de chauffage et/ou de climatisation.

a. Principe

Il consiste à transférer de la chaleur d'un milieu à basse température (source froide) vers un milieu à plus haute température (source chaude). Ce transfert se fait via un fluide frigorigène et nécessite un apport d'énergie sous forme de travail.

Dans le cas d'une maison d'habitation chauffée grâce à une pompe à chaleur, la source froide est le milieu extérieur, où la chaleur peut être prélevée :

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

La source chaude est le milieu à chauffer, c'est-à-dire la maison d'habitation.

b. 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, détenteur. Ces quatre éléments sont parcourus par un fluide frigorigène qui évolue en circuit fermé entre ceux-ci en changeant successivement d'état (**Figure 2.2**).

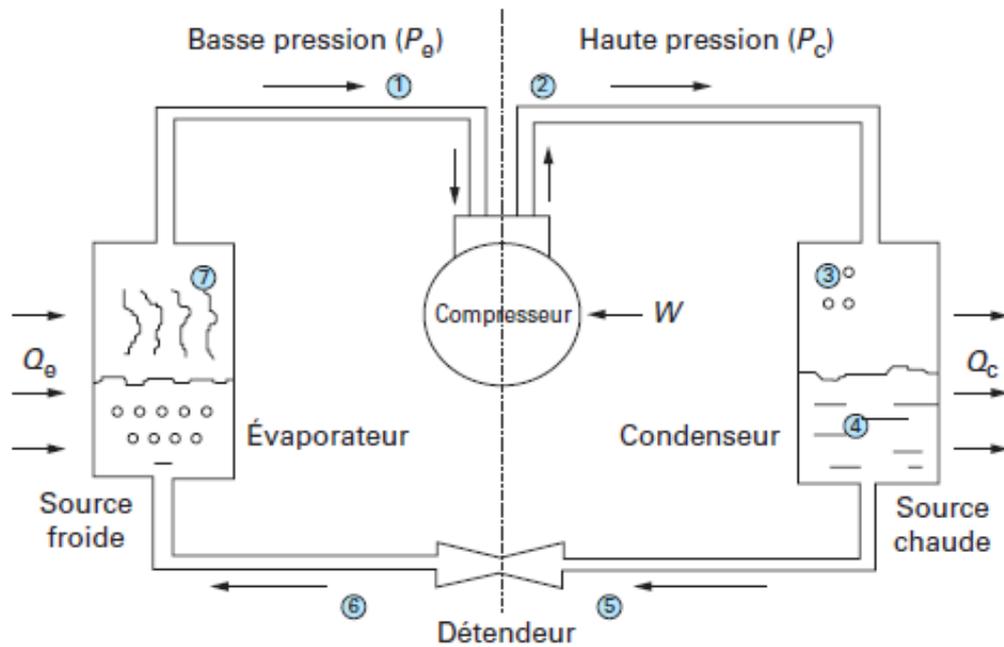


Figure 2.2 : Schéma de fonctionnement

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau) est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Le fluide toujours comprimé redevient liquide en se condensant. Le détendeur réduit la pression du fluide caloporteur. La température de ce dernier s'abaisse fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.

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

L'exploitation directe de l'énergie contenue dans les premiers mètres du sous-sol peut être envisagée en tout lieu. Il existe deux types principaux de capteurs, les capteurs horizontaux et les sondes verticales (**Figure 2.3**).

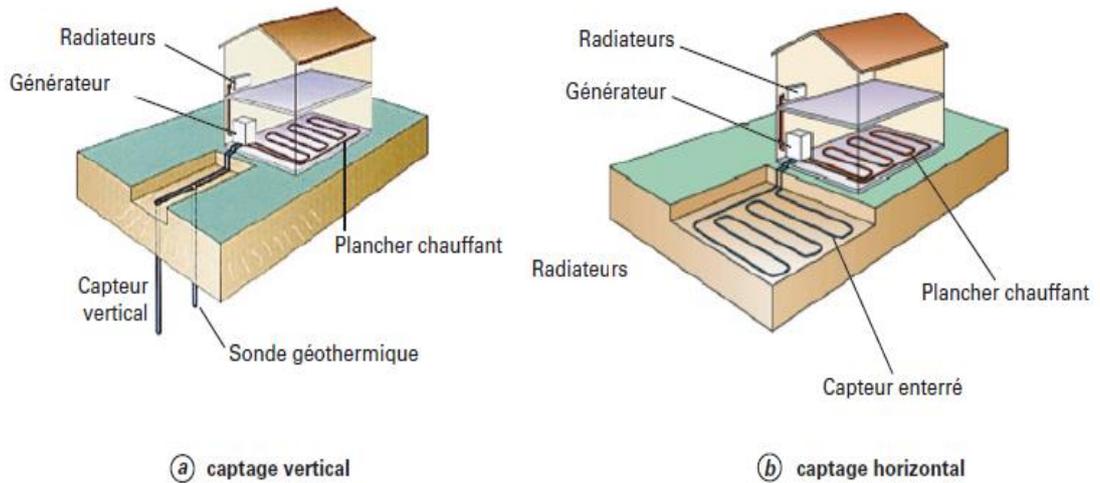


Figure 2.3 : Pompe à chaleur sur capteurs enterrés avec captage vertical et captage horizontal

a. Techniques avec capteurs horizontaux

Le capteur enterré (**Figure 2.4**) est constitué par une ou plusieurs boucles de tuyauteries en polyéthylène, d'un diamètre extérieur d'une vingtaine de mm, disposées à une profondeur d'au moins 60 cm et dans lesquelles on fait circuler en circuit fermé de l'eau glycolée mise en mouvement par un circulateur.

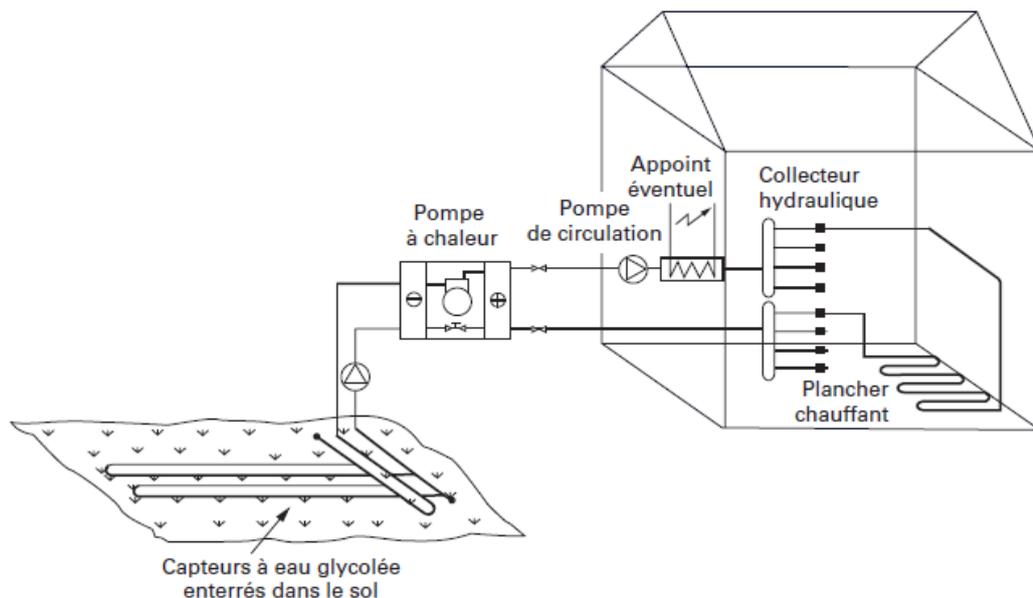


Figure 2.4 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur à capteurs horizontaux et plancher chauffant-rafraîchissant

Le système de captage est connecté à une pompe à chaleur qui transfère, dans le bâtiment à chauffer, la chaleur prélevée dans le terrain.

En règle générale, il n'est pas nécessaire d'adjoindre un appoint ; la pompe à chaleur peut assurer seule la couverture totale des besoins de chauffage.

Les travaux à réaliser pour enfouir les capteurs consistent soit à décaper le terrain, soit à réaliser des tranchées. La surface de terrain nécessaire est de l'ordre de 1,5 à 2 fois la surface à chauffer. La nature du terrain et son niveau d'humidité influent sur la capacité de prélèvement de chaleur dans le sous-sol. Ce système de captage est parfois appelé « géosolaire ».

b. Techniques avec capteurs verticaux

Le capteur, sonde géothermique, est vertical, ce qui permet de limiter la surface de terrain immobilisée pour implanter le capteur (**Figure 2.5**).

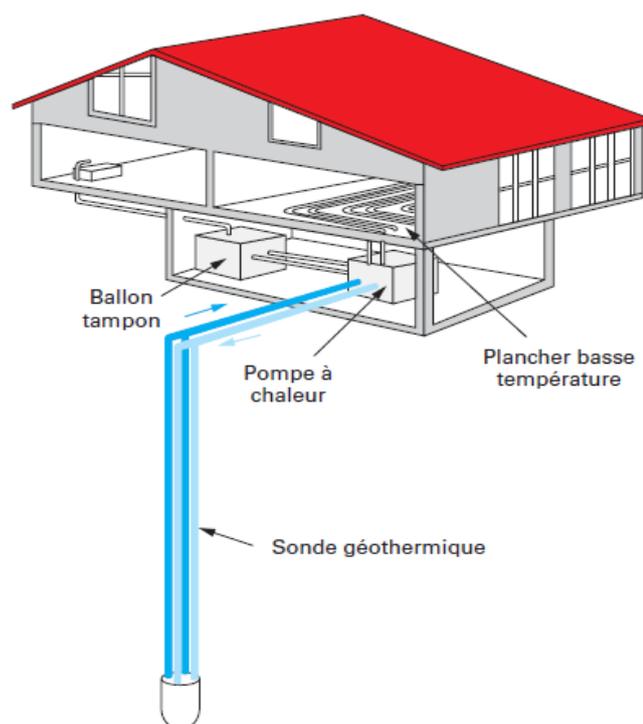


Figure 2.5 : Schéma d'une sonde géothermique

Il existe deux variantes, soit à détente directe, soit à fluide intermédiaire (c'est-à-dire avec eau glycolée dans le capteur et plancher hydraulique dans le bâtiment).

Le capteur est inséré dans un forage de 132 à 165 mm de diamètre suivant une configuration deux tubes (en U) ou 4 tubes (en double U), d'un diamètre compris entre 25 et 40 mm. Le forage est ensuite rempli avec un mélange de ciment et de bentonite qui stabilise le trou dans sa géométrie originelle.

La profondeur du forage peut atteindre jusqu'à 200 m et, en fonction de l'importance des besoins à couvrir, il est possible d'installer plusieurs capteurs (et donc forages) sur le même site.

Le domaine d'application des capteurs verticaux est beaucoup plus vaste que celui des capteurs horizontaux car la surface concernée pour le captage est nettement plus réduite. La technique des capteurs verticaux trouve sa place aussi bien pour la maison individuelle que pour des logements collectifs, ou des bâtiments de petit ou moyen tertiaire ; plusieurs sondes sont alors nécessaires, on parle dans ce cas-là de champ de sondes.

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

- Surface nécessaire à l'enfouissement insuffisante.
- Déclivité du terrain importante.
- Nature du terrain ne permettant pas l'excavation.
- Remplacement d'un chauffage existant traditionnel (fuel ou gaz) par une technologie géothermique.

2.7.4. Captage de chaleur sur des aquifères superficiels

La géothermie des aquifères superficiels (**Figure 2.6**) concerne l'exploitation thermique des aquifères situés jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. Jusqu'à ces profondeurs, la température moyenne de l'eau reste de l'ordre d'une dizaine de degrés Celsius et constante quelle que soit la saison ; la chaleur prélevée nécessite donc, pour être valorisée, que son niveau de température soit relevé, d'où l'emploi de pompes à chaleur.

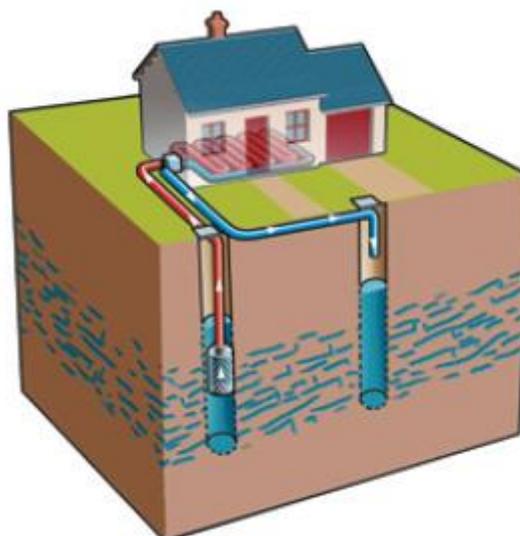


Figure 2.6 : Récupération de la chaleur sur nappes phréatique

Les nappes d'eau souterraines peu profondes contiennent de l'énergie thermique dont l'origine est solaire et terrestre. Au-delà de 20 m de profondeur, les variations thermiques d'origine solaire deviennent imperceptibles et la température croit graduellement sous l'effet du gradient géothermique.

2.7.4.1. Présentation de la filière

Les principaux éléments constitutifs d'une opération de PAC sur eau de nappe :

- un aquifère dans lequel de l'eau est puisée au moyen d'un forage ; dont les principales caractéristiques sont la température, les caractéristiques physiques et hydrodynamiques du réservoir, 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 par exemple ;
- un deuxième forage par lequel l'eau de nappe refroidie est rejetée dans l'aquifère à une distance suffisante du premier forage.

2.7.4.2. Principe de fonctionnement d'une opération

Une installation standard est constituée de trois ensembles (**Figure 2.7**) :

- Ouvrages sous-sol constitué d'un ou de plusieurs forage qui, lorsqu'ils sont producteurs sont 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 des canalisations assurant les liaisons hydrauliques et le cas échéant d'un échangeur. Les grands immeubles tertiaires utilisent classiquement des échangeurs à plaques pour séparer l'eau souterraine du circuit d'eau chaude de la pompe à chaleur de l'immeuble. 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 pour assurer la totalité ou partiellement les besoins thermiques de l'utilisateur.

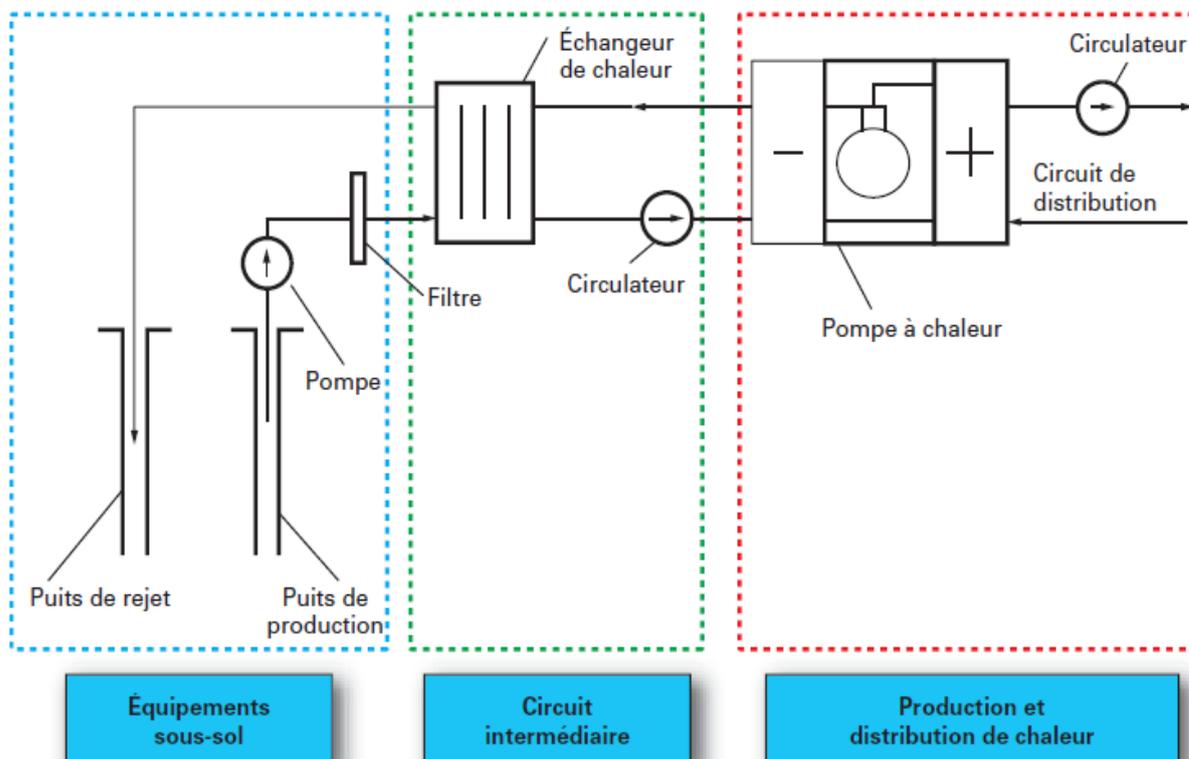


Figure 2.7 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur fonctionnant sur nappe phréatique. Principaux circuits

L'eau de puisage de la nappe phréatique, dont la température se situe en moyenne aux alentours de 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).

Une fois les calories prélevées, se pose le problème du rejet de l'eau dans des conditions environnementales satisfaisantes et de trouver un exutoire capable de recevoir les débits et les volumes utilisés. Deux voies sont envisageables : le rejet souterrain ou le rejet en surface (rivière, réseau pluvial...). Le rejet dans l'aquifère d'origine est généralement recommandé.

Chapitre 3

Systeme solaire actif

3.1. 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 5 770 K.

3.1.1. 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 ; la densité du noyau très élevé (10^5 Kg/m³), température 15 millions de degrés et pression 2.10^{11} bars : conditions nécessaires à l'entretien des réactions nucléaires. La densité diminuant avec l'éloignement au centre, les réactions nucléaires cessent de se produire à une distance estimée à un quart du rayon solaire, soit 175 000 Km environ. C'est le rayon de la bombe thermonucléaire qui donne la vie. L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace (**Figure 3.1**).

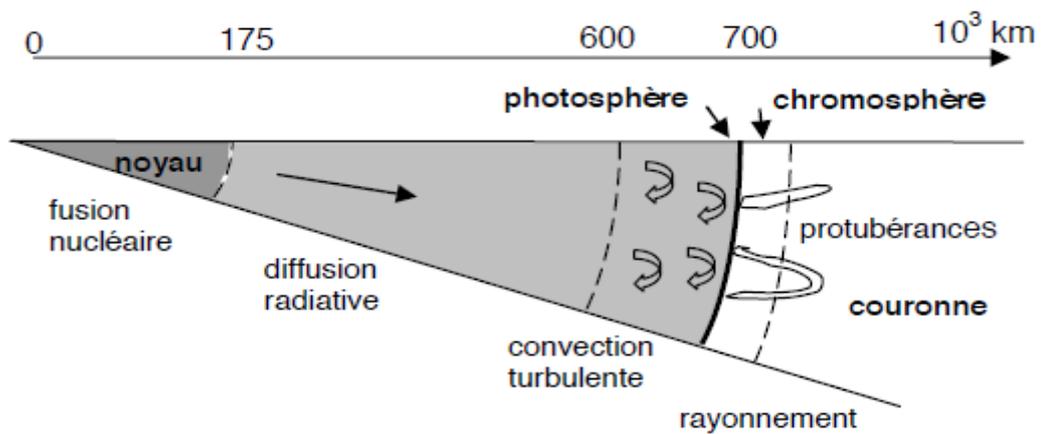


Figure 3.1 : Coupe schématique du soleil

3.1.2. Caractéristiques du rayonnement solaire

a. 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 μm (ultraviolet) et 4 μm (infrarouge).

b. Rayonnement perçu au sol

Au sol, on distingue plusieurs composantes (**Figure 3.2**).

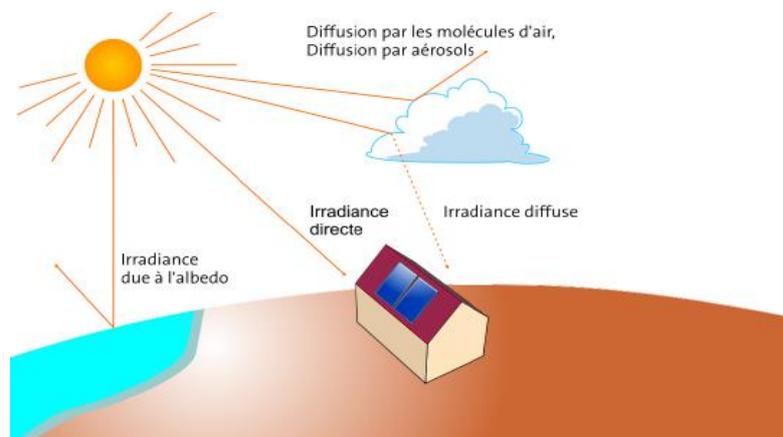


Figure 3.2 : Composante du rayonnement solaire au sol.

- Le rayonnement direct est reçu du soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux ; le rayonnement direct forme des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil.
- L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site.
- Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions.

c. Variation du rayonnement globale

Le bilan énergétique globale annuel de notre planète est équilibré (environ $3 \text{ KJ/cm}^2 \cdot \text{jour}$), la répartition spatiale et temporelle du bilan radiatif est loin d'être homogène.

En tout point de la planète coexistent un apport solaire et une perte par rayonnement infrarouge. Certaines régions sont excédentaires tandis que d'autres sont déficitaires en énergie. Les causes de ce déséquilibre sont multiples :

- La sphéricité de la terre, jointe 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 une énergie qui est partiellement perdue dans l'espace.
- L'albédo de la planète dépend fortement de la couverture nuageuse.

- 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.

3.2. Conversion de l'énergie solaire

Trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire sont envisagées : la thermique, la thermodynamique et le photovoltaïque (**Figure 3.3**).

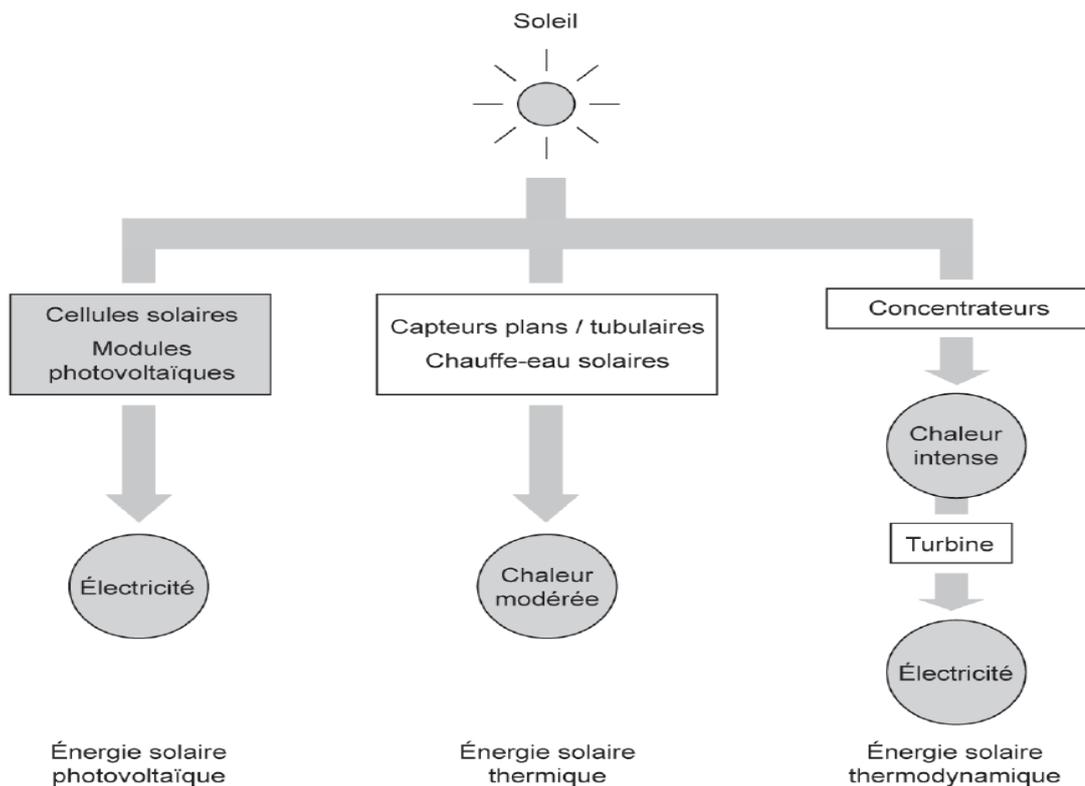


Figure 3.3 : Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire

3.2.1. Le solaires thermiques

3.2.1.1. Principe

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 (eau, air, ...). Le fluide circule ensuite dans un réseau, acheminant la chaleur pour pouvoir l'utiliser ou la stocker.

3.2.1.2. Capteurs solaires

Plusieurs types de capteurs existent, leurs utilisations dépendront de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer et la région dans laquelle on se trouve.

a. Capteur non vitré

C'est le modèle le plus simple et le plus économique (**Figure 3.4**). Il est composé de l'absorbeur, métallique ou synthétique (polyéthylène et EPDM) et revêtu d'une peinture sombre et sélective, et d'un faisceau de tubes cylindriques ou ovalisés, parcourus par le liquide caloporteur, résistants au rayonnement ultraviolet (UV) et aux variations de température. Ce capteur est utilisé pour le chauffage des piscines de plein air dont le niveau de température de l'eau est inférieur à 30 °C.

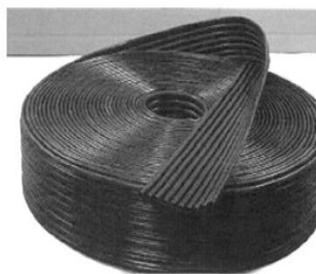


Figure 3.4 : Photo de capteur solaire en matière plastique conditionné en bobine.

b. Capteur plan vitré

Le capteur plan vitré (**Figure 3.5**) est composé d'un coffre isolant sur lequel est fixé un vitrage ou certains plastiques transparents. À l'intérieur du coffre est disposée une surface absorbante exposée au rayonnement solaire. Celle-ci s'échauffe et échange avec le fluide caloporteur, contenu dans les tubes, la chaleur produite par absorption du rayonnement incident.

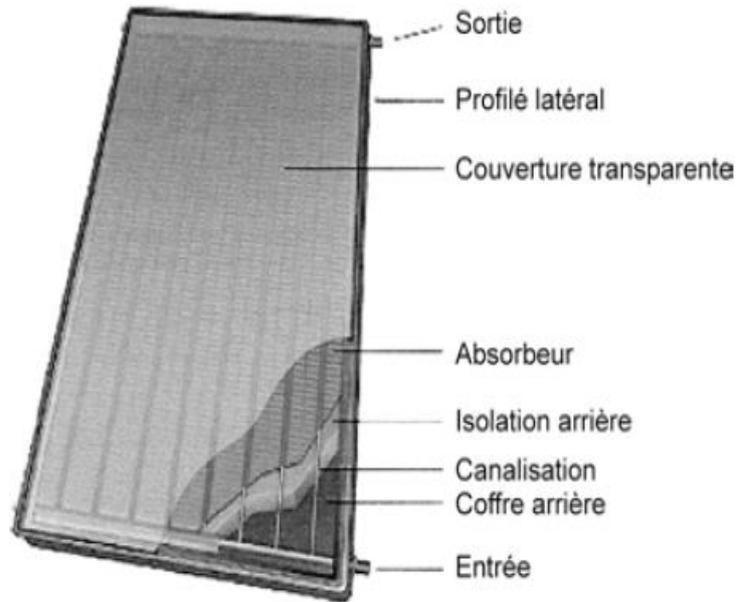


Figure 3.5 : Vue écorchée d'un capteur plan vitré.

c. Capteur à tubes sous vide

Le fluide caloporteur passe directement dans l'absorbeur, lui-même confiné dans un tube de verre sous vide pour limiter le transfert thermique par convection. L'absorbeur est coiffé d'ailettes pour maximiser la récupération du rayonnement solaire (**Figure 3.6**). Ces capteurs ont un rendement supérieur à celui des capteurs plans. Ils permettent l'obtention de températures plus élevées (50 à 95 °C) et peuvent être utilisés dans les régions très froides.



Figure 3.6 : Raccordement hydraulique de capteurs sous vide.

d. Capteurs à tubes sous vide à caloduc

Dans ces capteurs (**Figure 3.7**), l'absorbeur appelé caloduc est parcouru par une petite quantité de solution à base de glycol sous vide partiel. Cette solution est facilement vaporisable par apport de chaleur. 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. Une fois condensée, la solution redescend dans le caloduc pour recommencer un nouveau cycle.

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



Figure 3.7 : Vue de capteurs à tube sous vide à caloduc.

3.2.1.3. Exemples pratiques : Le chauffe-eau solaire

Le système de production d'eau chaude sanitaire à partir d'un capteur plan est composé (**Figure 3.8**) : d'un capteur, d'un échangeur de chaleur, d'un ballon de stockage, de tuyauteries et de pompes.

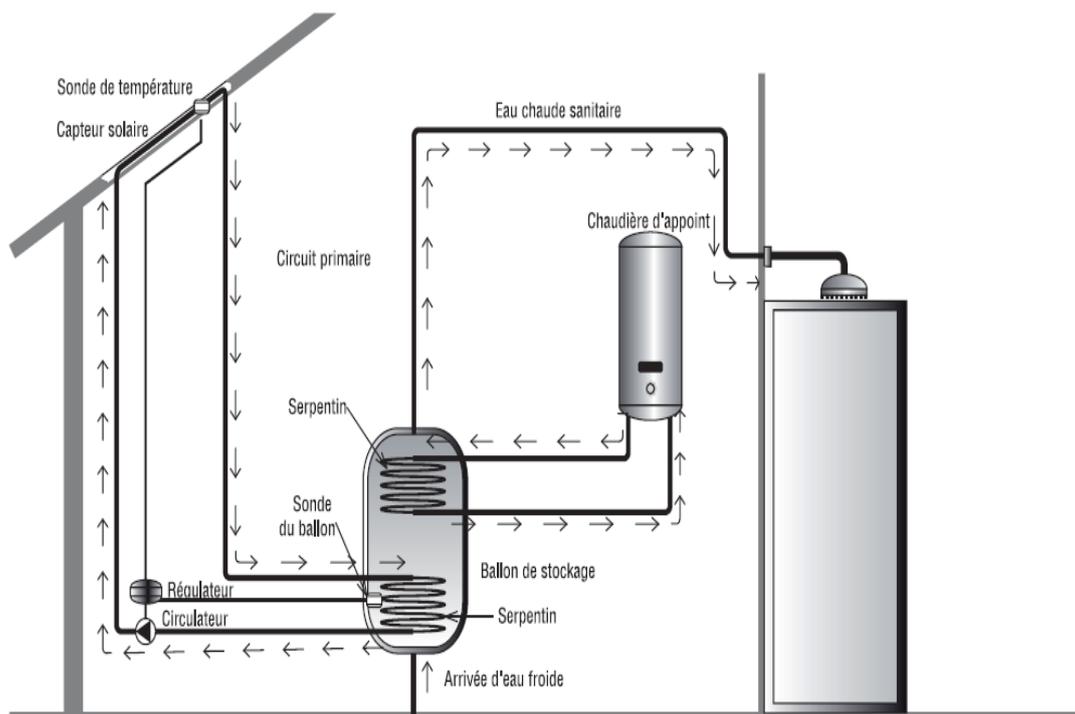


Figure 3.8 : Chauffe - eau solaire.

- **Le capteur solaire plan**

Elément fondamental de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température (**Figure 3.5**), constitué d'une surface absorbante, d'un fluide caloporteur, d'une couverture transparente et d'un isolant. L'absorbeur est en général une plaque métallique 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 frappe cette plaque métallique, sont absorbés et augmente l'agitation des molécules. 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).

- **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 soit par circulation naturelle (thermosiphon) ou par circulation forcée.

- **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.

- **Stockage de l'eau chaude**

Le ballon isolé constitue une réserve d'eau sanitaire.

- **L'appoint**

La plupart des unités de stockage sont équipées d'un dispositif d'appoint qui prend le relais en cas de besoin.

3.2.2. Solaire thermodynamique

3.2.2.1. Principe

Une centrale solaire thermique transforme l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité. Les rayons solaires sont concentrés par des réflecteurs sur un liquide dans un circuit primaire qui chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité (**Figure 3.9**). Cette technique est similaire à celle utilisée dans les centrales thermiques conventionnelles.

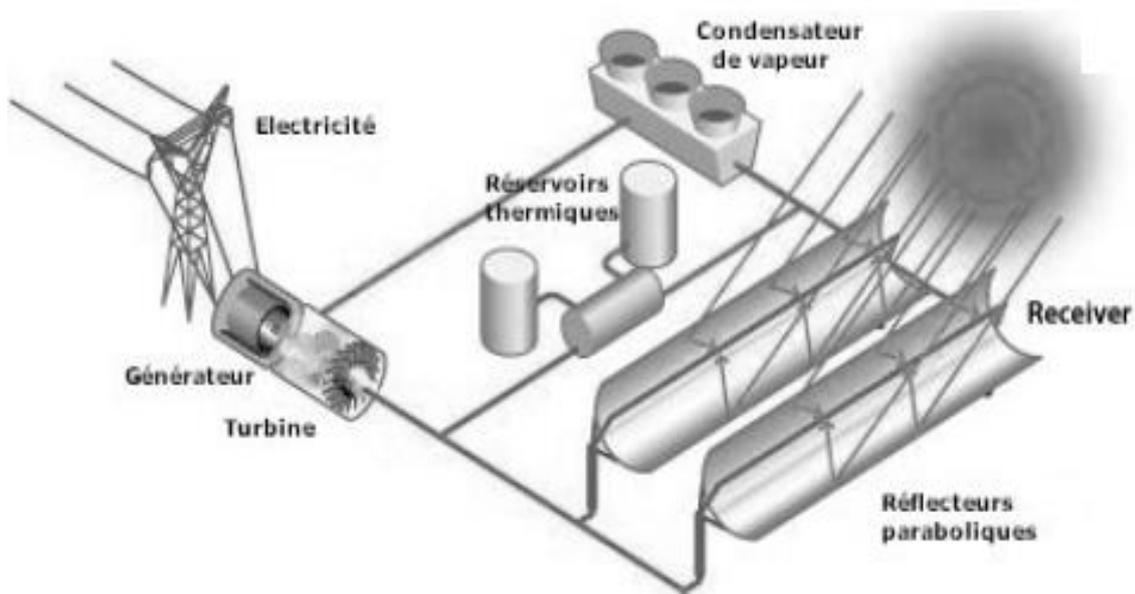


Figure 3.9 : Schéma d'une centrale solaire.

3.2.2.2. Aspect technique

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.

a. 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. La nature géométrique des surfaces mises en œuvre et la complexité des structures supportant les miroirs définissent les systèmes concentrateurs. On distingue plusieurs familles de ces centrales solaires, qui se différencient par leurs dimensions élémentaires et donc : puissance, performances optiques et thermiques et enfin coût.

○ **Réflecteurs cylindro-paraboliques**

Les réflecteurs cylindro-paraboliques (**Figure 3.10**) équipent 74% des centrales solaires thermodynamiques. Les principales caractéristiques sont :

- Température de fonctionnement : $270^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$;
- Réflecteurs : Parabolique (suivi 1 axe) ;
- Récepteur : Linéaire mobile ;
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, huile, air.

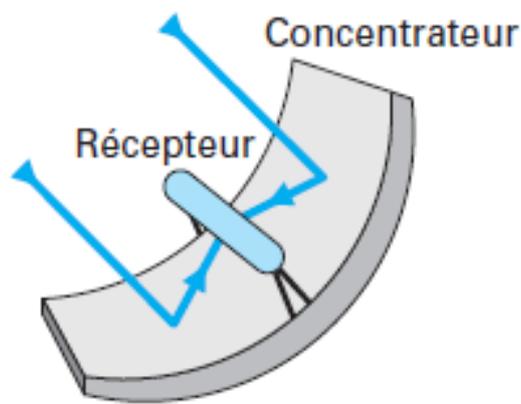


Figure 3.10 : Réflecteurs cylindro-paraboliques

○ **Héliostats et tours à concentrations**

Ce dispositif (**Figure 3.11**) équipe 15% des centrales solaires thermodynamiques. Les principales caractéristiques sont :

- Température de fonctionnement : $450^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$;
- Réflecteurs Héliostats : (suivi 2 axes) ;
- Récepteur : Central ;
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, air.

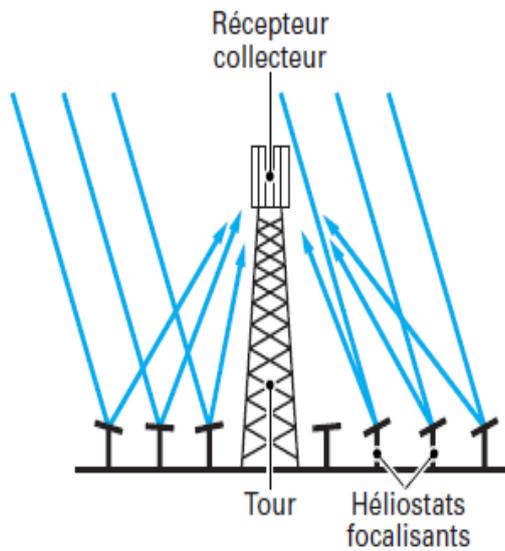


Figure 3.11 : Héliostats et tours à concentrations

○ **Miroirs paraboliques**

Seulement 2% des centrales thermodynamiques sont doté de ces dispositifs

(**Figure 3.12**). Les principales propriétés sont :

- Température de fonctionnement : $600^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$;
- Réflecteurs : Parabole (suivi 2 axes) ;
- Récepteur : Central et mobile ;
- Fluides caloporteurs : Air.

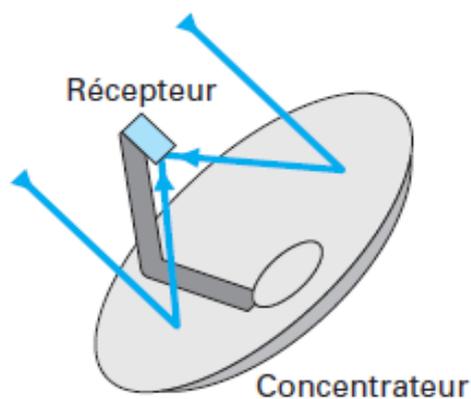


Figure 3.12 : Miroirs paraboliques

○ **Réflecteurs linéaires de Fresnel**

9% des centrales thermodynamiques sont pourvues de ces installations (Figure 3.13). Les principales propriétés sont :

- Température de fonctionnement : $270^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$;
- Réflecteurs Linéaire (suivi 1 axe) ;
- Récepteur : Linéaire fixe ;
- Fluides caloporteurs : Eau, sels fondus, huile.

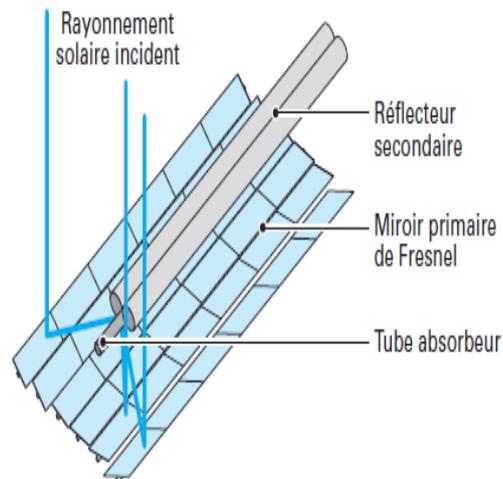


Figure 3.13 : Réflecteurs linéaires de Fresnel

b. 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.

Pour transporter la chaleur issue du champ solaire jusqu'à la turbine, un fluide caloporteur et/ou un fluide de travail sont utilisés. Le choix du fluide dépend de la

température atteinte lors de la concentration du flux solaire, du type de méthode de fonctionnement (génération direct/indirect) et du type de stockage utilisé.

c. Génération d'électricité

Différentes technologies existent pour convertir l'énergie thermique en électricité. Le choix d'un système de conversion thermodynamique dépend de la température du fluide de travail. Les principales technologies sont : les cycles vapeur conventionnel, les ORC (Organic Rankine Cycle), les cycles de Rankine, les cycles à gaz hautes températures type Stirling et Brayton.

d. 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.

3.2.3. Énergie photovoltaïque

L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour ce faire des modules ou panneaux photovoltaïques. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur. Les systèmes photovoltaïques se répartissent en deux grandes catégories :

- 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.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent à la fois de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils se trouvent.

3.2.3.1. Effet photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en énergie électrique au sein de matériaux semi-conducteurs composant les panneaux photovoltaïques. Ces matériaux photosensibles libèrent des électrons sous l'influence de l'énergie rayonnante : c'est l'effet photovoltaïque (**Figure 3.14**). L'énergie transportée par les photons (composants de la lumière), est absorbée par les électrons qui sont alors libérés. Ces électrons sont à l'origine d'un courant électrique continu, qui est ensuite transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

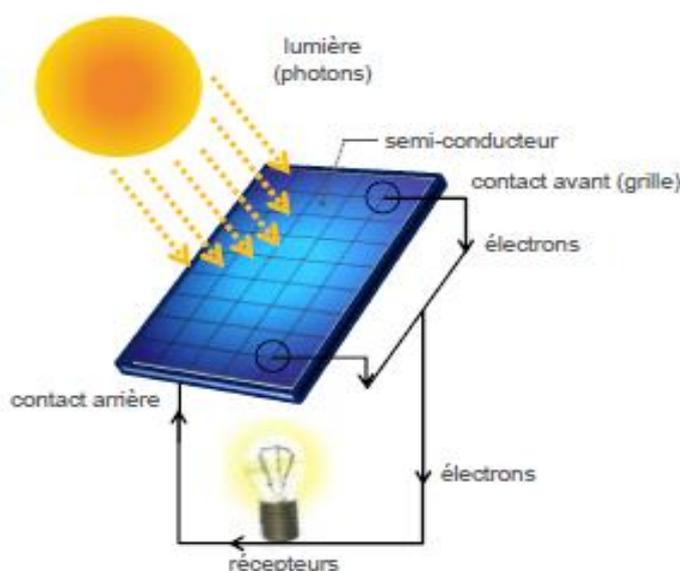


Figure 3.14 : Schéma l'effet photovoltaïque

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

3.2.3.2. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Tout solide est constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de proton et neutron) et un ensemble d'électron gravitant autour. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes, leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur (collecte de charge).

En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

Ce phénomène physique, photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car ils comportent des électrons libérables, contrairement à un isolant, où tous les électrons sont fortement liés, et à un conducteur électrique, dans lequel il existe une forte densité d'électrons totalement libres.

Il existe un seuil minimum d'énergie des photons nécessaire à la libération des électrons. Ce seuil dépend du matériau : chaque atome est caractérisé par la structure électronique (nombre d'orbitales et quantité d'atomes) et donc les énergies mises en jeu également. Ce seuil est appelé le gap optique (E_g) du matériau ou la largeur de bande interdite. Si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire d'électron-trou et ne sera pas absorbé. Les propriétés optiques et électroniques sont liées. Tous les photons d'énergie supérieure à ces seuils, et donc de longueurs d'onde inférieures, sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque.

3.2.3.3. Type de semi-conducteur

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. Se trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), constituant principal de sable. Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium :

- 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 le plus souvent du 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, qui fournit des cellules en couches minces ayant un très bon rendement mais dont le prix 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 donne des photopiles très stables dans le temps.
- TiO₂ : dioxyde de titane. Cette technologie est au stade expérimental.

3.2.3.4. Concept technique

La conception d'une installation solaire photovoltaïque nécessite :

- L'estimation de la quantité journalière d'énergie solaire disponible sur le site ;
- La détermination de la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter les lampes et appareils prévus en multipliant la consommation de chacun par sa durée d'utilisation journalière et en additionnant le tout ;
- L'estimation des déperditions d'énergie dues à des défauts d'efficacité de l'installation ;
- La détermination de la taille de l'ensemble de modules, du régulateur et des batteries nécessaires ;
- L'établissement d'un plan d'approvisionnement de tous les composants et appareillages.

Une installation photovoltaïque est constituée de :

a. Panneau photovoltaïque

Un panneau ou module photovoltaïque est un bloc composé de plusieurs cellules généralement montées sous une plaque de verre, d'une dimension de 0,1 à 3 m² typiquement. Ces panneaux ont pour fonction de réunir assez de cellules pour créer un convertisseur d'énergie, ces cellules devant être protégées des chocs et des intempéries. Leur puissance varie selon le nombre et la taille des cellules qui les composent, de 1 à 300 W. Pour disposer de plus de puissance sur une installation,

on associe plusieurs modules en créant un champ photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ne seront pas les mêmes selon les applications, les technologies étant adaptées.

b. Batteries : stockage de l'énergie solaire

Les batteries stockent l'énergie captée pendant les périodes d'ensoleillement pour la restituer la nuit et en période nuageuse. Il existe divers types et tailles de batteries. Le choix doit tenir compte à la fois des besoins et du budget de l'utilisateur. La longévité des batteries dépend de la qualité de l'entretien et des contrôles effectués.

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

La quantité d'énergie fournie par les modules photovoltaïques est limitée. Il faut donc que la demande énergétique des charges ne soit pas supérieure à la quantité d'énergie fournie par le panneau. Le régulateur de charge empêche la surcharge ou la décharge profonde des batteries, prévenant ainsi tout risque de dommage aux batteries et à l'ensemble de l'installation. Il peut également signaler les dysfonctionnements du générateur ou de la batterie.

Les onduleurs convertissent le courant continu fourni par les batteries en courant alternatif nécessaire à l'alimentation de nombreux appareils ou équipements.

Le régulateur de charge et l'onduleur doivent être parfaitement adaptés au système.

d. Câblage

Le câblage des installations solaires photovoltaïques est similaire à celui des systèmes raccordés au réseau, à ceci près que la très basse tension de l'électricité photovoltaïque impose l'utilisation de fils de plus grande section et que certains appareillages diffèrent de ceux utilisés en 230 V.

e. Lampes et appareils électriques : utilisation optimale de l'énergie solaire

Contrairement aux groupes électrogènes traditionnels ou au « secteur », les modules photovoltaïques fournissent un courant continu à très basse tension. Il faut donc utiliser des appareils spéciaux à courant continu et des lampes fluorescentes ou à diodes électroluminescentes (DEL/LED).

Chapitre 4

Energie éolienne

4.1. Le vent

4.1.1. Description

Le vent est un courant de compensation de la masse d'air qui se produit à la suite de 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. L'air chaud monte et circule dans l'atmosphère puis retombe à la surface dans les zones les plus froides.

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre sont à l'origine d'écarts de pression atmosphérique qui s'établissent à proximité de la surface ou en basse altitude. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des régions de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air emportent avec elles une énergie cinétique qui peut être considérable, proportionnelle à la masse volumique de l'air, aux volumes échangés et au carré de la vitesse du vent. La vitesse du vent, sa direction, ses fluctuations, son aléa, etc. au cours d'une période sont des informations essentielles qui caractérisent le gisement éolien.

4.1.2. Caractéristiques

L'écoulement 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 et rugosité. La ressource éolienne présente des fluctuations. Il s'agit de variations de la vitesse et de la direction du vent observées sur une échelle de temps. Ces variations : fluctuations, turbulences, etc. sont plus ou moins importantes en fonction de la saison, du secteur géographique concerné. Caractérisant une distribution aléatoire communément appelée « aléa éolien ».

a. Influence de la topographie locale

Dans les basses couches de l'atmosphère, la friction de l'air contre la surface du terrain influence la vitesse du vent. L'écoulement de celui-ci dépend alors des obstacles rencontrés et des contours du paysage, lesquels peuvent créer des turbulences et dégrader la productivité ou, au contraire, donner lieu à des effets accélérateurs : effet de tunnel ou de colline. La vitesse du vent qui est nulle au sol, augmente avec l'altitude.

b. Variations temporelles du vent : l'aléa éolien

Localement, le vent manifeste le plus souvent une instabilité en vitesse et en direction. Ces variations doivent s'analyser selon différentes échelles de temps :

- Variations inter-annuelles :

Ces variations peuvent traduire un supplément ou un déficit de ressource éolienne sur la période ;

L'évaluation du gisement éolien d'un site devra chaque fois que cela est possible se référer à des chroniques de mesures représentatives, station météorologique, mât de mesures à proximité ou in situ, sur une longue période.

- Variations intra-annuelles ou saisonnières :

Traduisent l'évolution normale ou parfois inhabituelle de la ressource éolienne en fonction de la saison pour la région ou le site en question.

- Variations intra-journalière :

Caractérisent les écarts de la ressource éolienne, en particulier, entre les périodes diurne et nocturne.

- Variations à l'échelle de la minute ou d'une dizaine de secondes :

Il s'agit des régimes transitoires, des rafales de vent plus ou moins fortes qui peuvent apparaître sur le site.

4.1.3. Choix du site

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation. Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagés.

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger de la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle.

Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, comme les alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s. Outre ceux ayant une quantité d'énergie annuelle insuffisante, il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent. Le relief local joue un rôle important, dont il faut tenir compte.

4.2. Energie éolienne

La production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à des compétences poussées dans des domaines multiples et variés : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique et électronique, BTP, réglementation, auxquels s'ajoutent bien évidemment les aspects environnementaux.

4.2.1. Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau ;
- soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- 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.

Les applications électriques de l'énergie éolienne peuvent être complémentaires avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques, nucléaires, ...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante mais peuvent offrir des possibilités de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel.

4.2.2. Principe

Une éolienne est un générateur d'électricité fonctionnant grâce à la vitesse du vent. Elle permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique. Cette rotation est ensuite convertie en électricité par une génératrice. L'efficacité maximum de l'éolienne est obtenue lorsque l'hélice est face au vent.

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyenne fréquemment rencontrés. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au-delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes.

4.2.3. Type d'éolienne

a. Eolienne à axe vertical

Une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant pas l'édification d'une tour. Le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente.

b. Eolienne à axe horizontal

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés (**Figure 4.1**) : les éoliennes « amont » et les éoliennes « aval ». Les pales des éoliennes « amont » sont situées du côté de la tour exposé au vent.

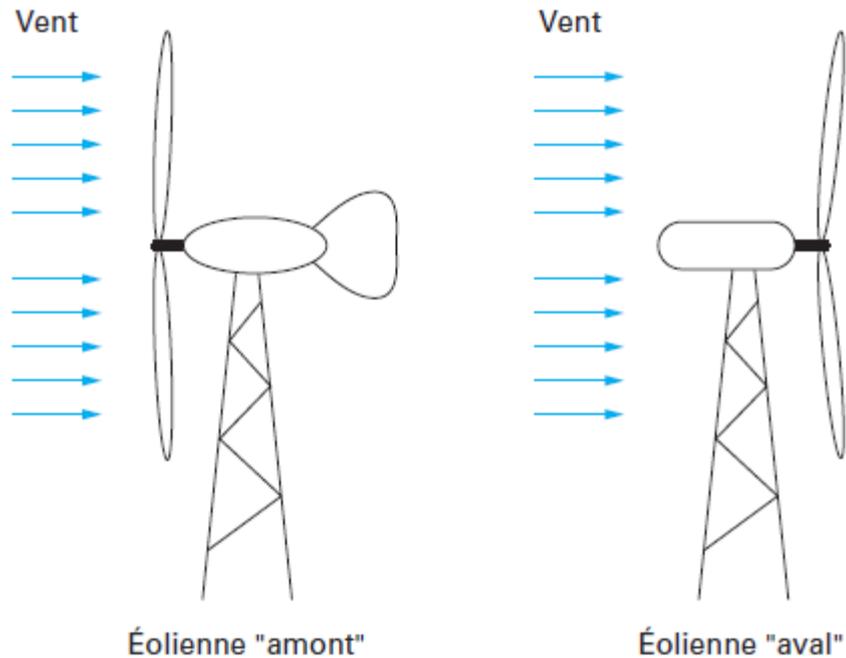


Figure 4.1 : Configurations à axe horizontal

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients ; la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles.

Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ».

Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique.

On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ».

4.2.4. Descriptif d'une éolienne

Trois composants essentiels dans une éolienne de type « amont » : le rotor, la nacelle et la tour (Figure 4.2).

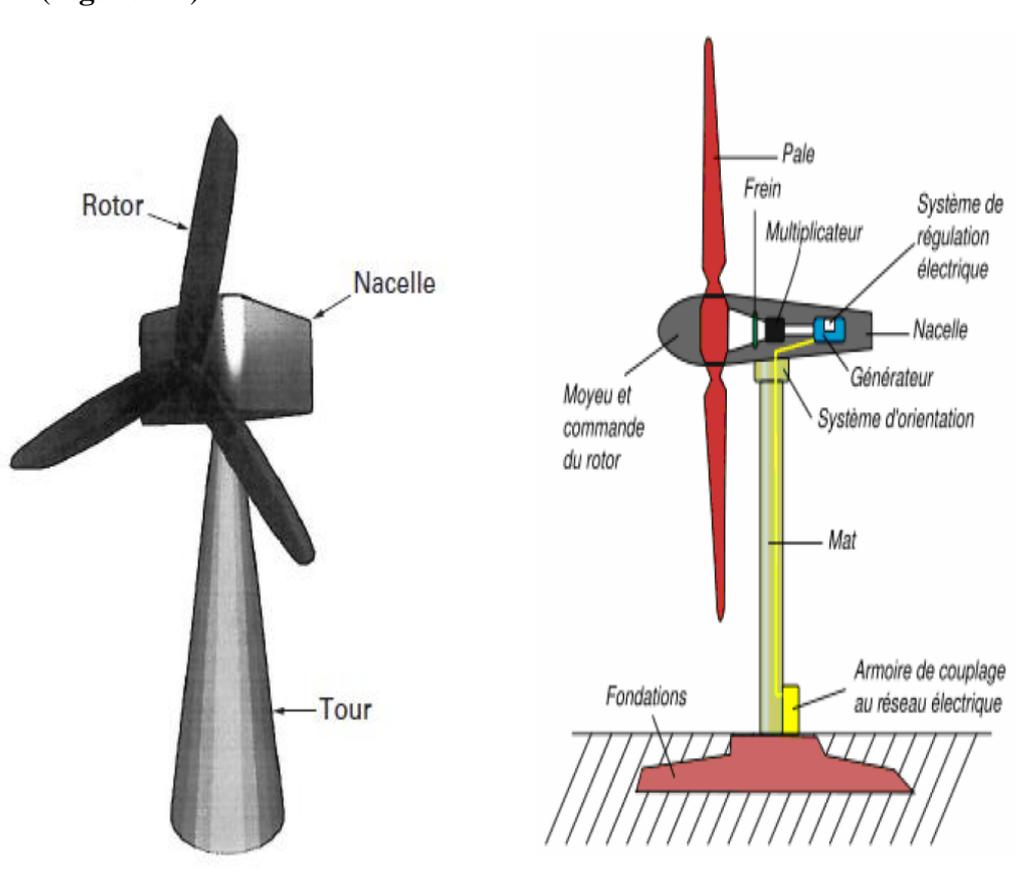


Figure 4.2 : Composants dans une éolienne « amont »

○ Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire. La liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites, polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone, à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes. Leurs longueurs sont comprises entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales.

- **Tour**

Généralement en métal, est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes et exceptionnellement jusqu'à 100 m.

- **Nacelle**

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. Les différents composants d'une nacelle sont (**Figure 4.3**) :

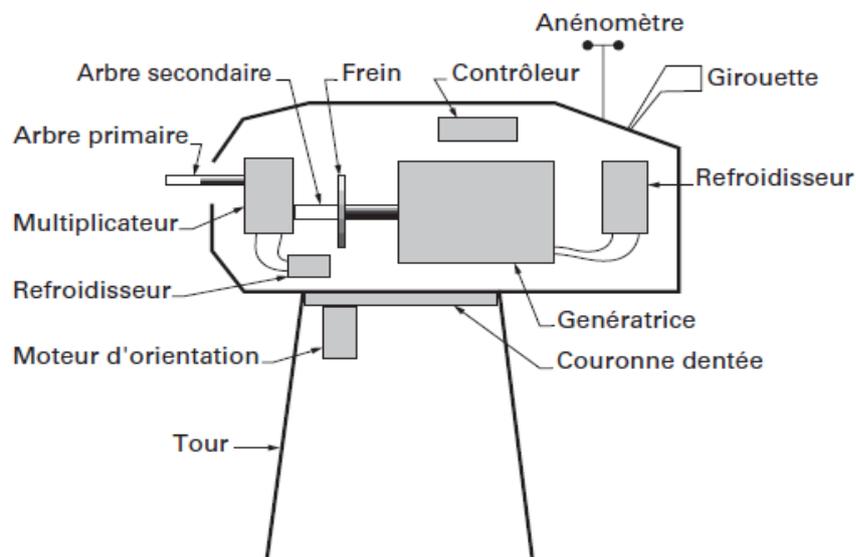


Figure 4.3 : Éléments d'une nacelle

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques ;
- 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 : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor et nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instantanés sur l'installation.

Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre et une girouette, habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir ;

- Divers dispositifs de refroidissement : ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile ;
- Un groupe hydraulique et ses servitudes si nécessaire ;
- 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 évitent de solliciter constamment les moteurs et permettent aussi de bloquer l'éolienne durant la maintenance.

4.2.5. Conditions d'utilisation des pales

a. Durée de vie

Les pales d'une éolienne sont dimensionnées de manière à résister aux sollicitations aérodynamiques et mécaniques, qu'elles soient statiques ou dynamiques. D'autres facteurs doivent être pris en considération lors de l'élaboration d'une pale, comme la résistance à l'abrasion (poussières, pluie, ...), la corrosion chimique (embruns maritimes, ...). Ces spécifications sont d'autant plus contraignantes que la durée de vie prévue pour une pale est de l'ordre de vingt ans. Des contrôles sont effectués régulièrement pour s'assurer de l'intégrité des pales d'une machine, mais ces opérations peuvent se révéler délicates dans le cas d'installations off-shore par exemple. Des capteurs noyés dans les pales sont actuellement développés pour assurer le contrôle et la maintenance.

b. Givrage

L'implantation des éoliennes dans une région au climat froid (Canada, ...), nécessite l'adoption de systèmes particuliers. Le phénomène de givrage des pales doit être soigneusement considéré. Non seulement l'accumulation de givre sur les pales dégrade significativement le rendement aérodynamique de celles-ci, mais la masse de glace ajoutée en conditions givrantes sévères peut amener à la rupture statique d'une pale. La solution à cette situation consiste à munir la machine d'un dispositif de dégivrage à base de résistances chauffantes électriques noyées dans les pales.

c. Foudroiement

Une éolienne étant par définition une construction d'une hauteur importante érigée sur une surface dégagée, la possibilité d'un foudroiement n'est pas à exclure au cours de son utilisation. Une telle éventualité est particulièrement sensible lorsque

des pales en fibres de carbone sont utilisées. Cela impose de munir les pales lors de leur construction de dispositifs spécifique permettant autant que possible de protéger la machine et plus particulièrement l'installation de génération et de contrôle.

4.2.6. Énergie éolienne offshore

Les éoliennes offshore sont des éoliennes installées en mer, où les vitesses de vent sont généralement plus élevées que sur terre, à l'exception de certaines zones.

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 en éloignant les installations.

Cependant, il est nécessaire de tenir compte de certains aspects :

- 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 ;
- difficulté du transport de l'énergie produite due à l'éloignement (câbles sous-marins, ...)
- réduction des possibilités d'intervention sur site d'où une amélioration nécessaire de la fiabilité des machines et de la maintenance prédictive ;

Une augmentation des coûts associés à une implantation offshore est généralement compensée par le potentiel d'énergie que l'on y rencontre et par l'utilisation d'éoliennes de grande taille.

Des projets de machines de 3 à 5 MW soit de 80 à 120 m de diamètre ont vu le jour. La réalisation de telles éoliennes pose elle-même de réels problèmes :

- augmentation du poids et de la taille des différents composants ;
- tenue mécanique, ...

Références bibliographiques

- Astier S., *Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule*, 2008. Techniques de l'ingénieur d 3935, 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., *Energie solaire - Calculs et optimisation - Génie énergétique*, 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, BE 8903, 1 - 20.
- 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*, 2ème 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., Villos M., *Énergie solaire photovoltaïque*. 2^{ème} édition, Dunod, 2005.
- Labouret A., Villos M., *Énergie solaire photovoltaïque*. 4^{ème} édition, Dunod, 2009.

- Labouret A., Villos 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 8590 v2, 1 - 24.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface - Aquifères superficiels et stockage thermique souterrain*, 2010. Techniques de l'ingénieur BE 8 593, 1 - 16.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface - Présentation et pompes à chaleur*, 2010. Techniques de l'ingénieur BE 8591, 1 - 4.
- Laplaige P., Lemale J., *Géothermie de surface : Puits canadiens, capteurs enterrés et géostructures*, 2010. Techniques de l'ingénieur, BE 8592, 1 – 16
- Leconte P., Rapin M., Szechenyi E., *Éoliennes*, 2001. Techniques de l'ingénieur BM 4640, 1 - 23.
- 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 8 578 v 2, 1 - 14.
- Slaoui A., *Électricité photovoltaïque, Matériaux et marchés*, 2013. Techniques de l'ingénieur BE 8 579 v 2, 1 - 12.