

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة حمزة لخضر الوادي
Université Hamma Lakhder d'El Oued

Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

POLYCOPIE

Exploitation des énergies renouvelables

- Cours -

(Niveau Master)



Dr. AOUN yacine

Maitre de conférences classe A

Année Universitaire 2019/2020

Chapitre 1. Introduction aux énergies renouvelables

Le mot « **ENERGIE** », d'usage très répandu, vient du mot Grec « **ENERGIA** » qui signifie « **FORCE EN ACTION** »

Malgré une perception intuitive de la notion d'énergie, sa définition reste délicate. Deux concepts s'y rattachent :

- système réservoir d'énergie (la pile)
- système convertisseur d'énergie (le moteur)

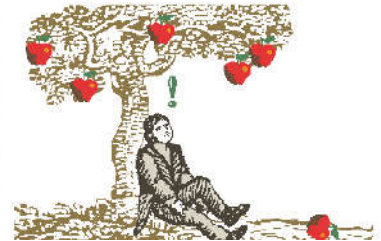
D'une manière générale, un système "possède" de l'énergie s'il est capable de produire une transformation de son énergie (l'énergie chimique de nos cellules est transformée dans nos muscles en énergie mécanique qui produit un mouvement) ou d'échanger de l'énergie (chaleur transmise par un radiateur). La mesure de l'énergie se fait ainsi à travers ses effets et ses variations.

L'unité utilisée par les physiciens pour mesurer l'énergie est le joule (J). Les économistes utilisent plutôt la tonne d'équivalent pétrole (tep), les médecins nutritionnistes la calorie (cal). En électricité, on utilise le wattheure (Wh) ou le kilowattheure (kWh)



L'énergie cinétique : Associée au mouvement d'un objet, elle est proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse de celui-ci. Elle se transforme en électricité (centrales hydrauliques, éoliennes), en chaleur (frottements) et peut également provenir d'une autre forme d'énergie (chimique : poudre à canon, thermique : locomotive à vapeur, électrique : moteur électrique).

L'énergie de gravitation : Cette force, dite de gravitation, caractérise l'attraction mutuelle de deux corps massifs. La loi de la gravitation a été formulé par le physicien anglais Isaac Newton. Ce principe est utilisé pour augmenter l'énergie de l'eau dans une centrale hydraulique.



L'énergie élastique : Elle est associée aux déformations des objets élastiques (ressort, compression d'un gaz)

L'énergie calorifique : En considérant l'échelle atomique, elle se traduit par le mouvement désordonné des molécules. A notre échelle, elle représente l'énergie mise en jeu lors d'une variation de température ou d'un changement d'état d'un matériau (fusion de la glace, évaporation de l'eau).



L'énergie électrique : Elle provient du mouvement des électrons dans un milieu conducteur. Dans une pile électrique, l'énergie chimique est convertie en mouvement des électrons, donc en énergie électrique.

L'énergie radiative : elle est issue du rayonnement. Dans le filament d'une ampoule électrique, l'énergie électrique se transforme en chaleur évacuée en énergie radiative, lumineuse et infrarouge. Le Soleil nous transmet une puissance de l'ordre de 1kW par mètre carré, sous forme de lumière visible et de rayonnement infrarouge. L'énergie du soleil est à la base de la majeure partie des formes d'énergies disponibles en milieu naturel : chimique, thermique, hydraulique, électrique.



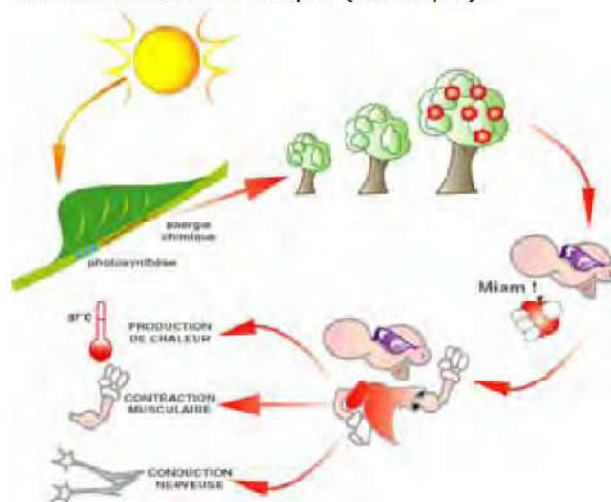
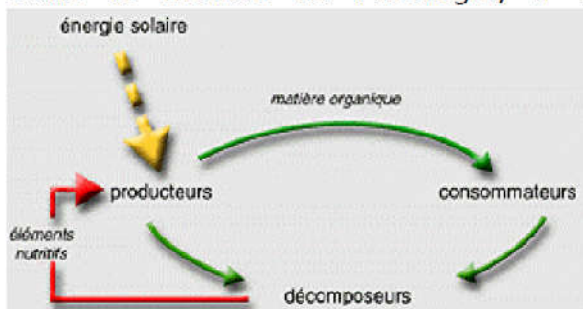
L'énergie chimique : Associée à la liaison entre atomes dans une molécule, elle est transformée en une autre forme d'énergie lors d'une réaction chimique qui brise les liaisons (thermique : combustion d'un gaz, électrique : pile et accumulateur, mécanique : transformation du sucre dans l'organisme)

L'énergie nucléaire : Localisée dans les noyaux des atomes, elle est associée à la liaison entre les protons et neutrons. Elle se transforme lors des réactions nucléaires de fission ou de fusion de noyaux atomiques. Ce mécanisme se produit au cœur du Soleil, par fusion des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium, dans les centrales nucléaires, par fission des noyaux d'uranium.



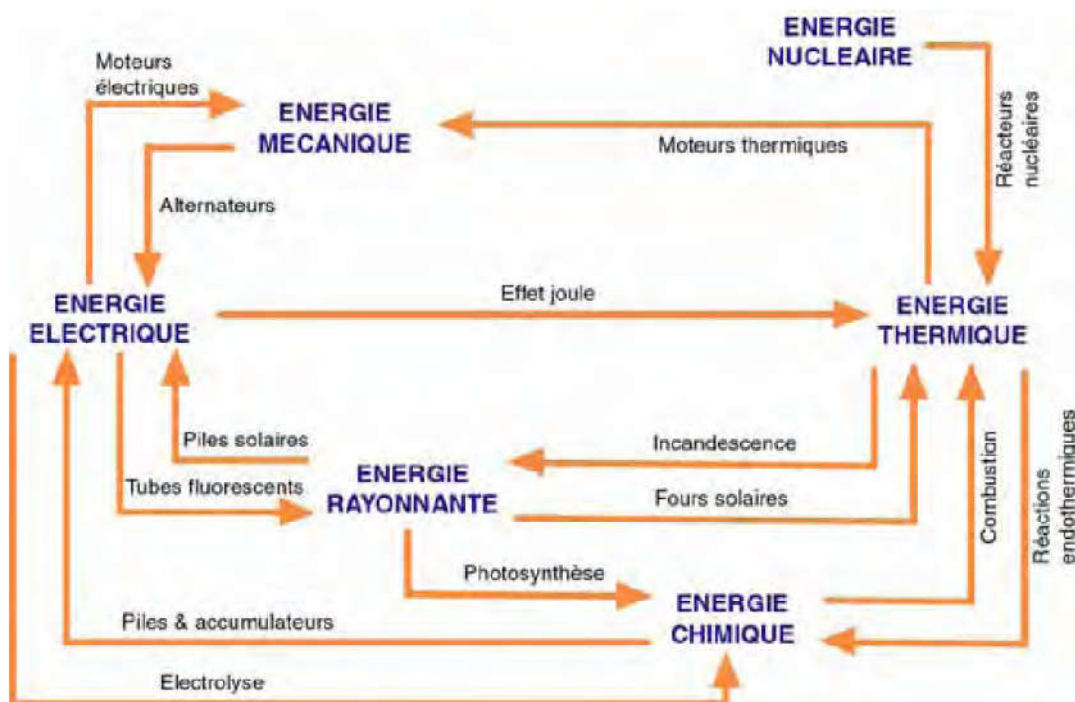
Principe des chaînes énergétiques

Dans le monde de l'écologie, il existe une unité fonctionnelle appelée écosystème qui regroupe une communauté animale et végétale (biocénose), et le milieu que cette communauté occupe (biotope).



La représentation simplifiée d'un écosystème montre comment les différents acteurs forment un système qui dépend de l'énergie solaire.

Les différentes transformations de l'énergie font que cette représentation peut être exploitée pour définir les liens fonctionnels de la chaîne énergétique (de la source à l'utilisation) et les nombreuses interactions entre les chaînes.



Les sources d'Énergie

Les énergies non renouvelables sont les énergies qui disparaissent quand on les utilise. Elles sont constituées de substances qui mettent **des millions d'années à se reconstituer**.

« Il existe deux familles d'énergies non renouvelables : les énergies fossiles et les énergies fissiles »



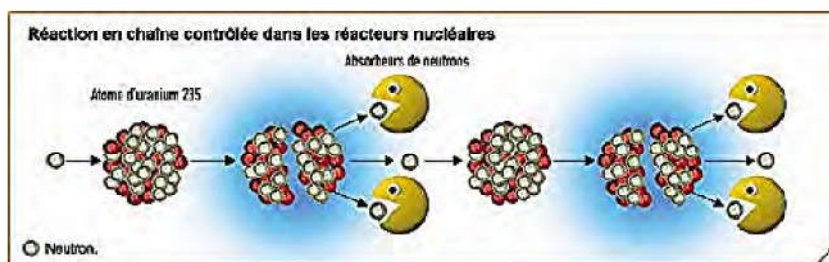
Energies fossiles

Ce sont des matières premières que l'on trouve sous terre issues de la décomposition de matières organiques (végétaux et organismes vivants), il y a des millions d'années. Ce sont des combustibles tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole. **Ces ressources diminuent** quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former.

Le pétrole produit une énergie thermique : la chaleur. Lorsque le pétrole est totalement consommé, il n'y a plus d'énergie. C'est une source d'énergie non renouvelable. On utilise le pétrole pour fabriquer de l'essence, du fioul de chauffage, du caoutchouc... Mais dans une trentaine d'années les ressources seront épuisées.

Energies fissiles

Ce sont de très petits éléments dont on peut casser les atomes pour libérer de l'énergie et de la chaleur.



L'énergie nucléaire est produite à partir d'un minéral appelé uranium. La fission des atomes d'uranium libère une très grande quantité d'énergie dont on se sert pour chauffer de l'eau permettant de produire de l'électricité.

Les énergies renouvelables sont celles qui **sont presque inépuisables**. Elles dépendent d'éléments que la nature renouvelle en permanence : le vent, le soleil, le bois, l'eau, la chaleur de la Terre. Mais certaines peuvent disparaître aussi si on ne les protège pas. Elles ont largement contribué au développement de l'humanité : moulins à eau, moulins à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile.

- En utilisant les énergies renouvelables, on lutte contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère.
- En développement dans le monde entier, les énergies renouvelables permettent de gérer de façon intelligente les ressources locales et de créer des emplois.



Les grandes familles d'énergies renouvelables



Le soleil nous éclaire, nous réchauffe et est indispensable au développement de tous les êtres vivants. Grâce à lui les plantes libèrent l'oxygène qui nous permet de respirer. On sait utiliser la chaleur du soleil pour créer de l'électricité (énergie solaire photovoltaïque) et de la chaleur (énergie solaire thermique).



Le soleil,

apparu il y a 4,6 milliards d'années, est né d'une nébuleuse. Les poussières de ce nuage se seraient progressivement agglomérées, pour donner naissance à notre système solaire avec ses neuf planètes.

Les énergies renouvelables nous parviennent directement ou indirectement du Soleil, qui nous envoie en permanence son rayonnement. Il s'agit des énergies solaire, hydrauliques, éolienne, mais aussi de l'énergie chimique qui s'accumule dans les végétaux utilisables comme combustibles (bois, déchets, alcool).

En 1843 James Joule a été le premier à découvrir que la chaleur est une forme d'énergie : il a prouvé que quand on met un objet en mouvement (énergie mécanique) on produit de la chaleur (énergie thermique). Aujourd'hui on sait utiliser la chaleur du soleil pour créer de l'électricité.



Quand **le vent** se met à souffler on sent bien sa force ! Les oiseaux et les bateaux à voile se servent de l'énergie qu'il libère pour se déplacer. Il permet aussi de faire tourner les ailes des moulins à vent pour pomper de l'eau ou moudre du grain. On utilise *la force du vent pour faire tourner des éoliennes ou aérogénérateurs* qui produisent de l'électricité (énergie éolienne).



L'eau, comme le soleil, est indispensable à la vie. Depuis plus de 2000 ans on sait utiliser la force créée par les courants des rivières ou des chutes d'eau pour faire tourner la roue d'un moulin à eau. Aujourd'hui on utilise cette force pour *faire tourner des turbines* qui produisent de l'électricité dans les usines marémotrices et les barrages.



Les matières organiques végétales ou animales sont utilisées pour produire de la chaleur. On appelle cette énergie **la biomasse**. C'est *la 2ème source d'énergie de notre planète*. La combustion du bois est la plus ancienne des utilisations de cette énergie : dès la préhistoire les hommes ont appris à utiliser le feu pour s'éclairer, se chauffer et cuire les aliments.



Les déchets ménagers possèdent des éléments biodégradables susceptibles de polluer l'environnement. Par la méthanisation ils peuvent être transformés en *biogaz*. Ce phénomène biologique, qui permet de transformer la matière organique grâce à des bactéries vivant en absence d'oxygène, était jusqu'alors employé pour le traitement des égouts ou dans l'industrie agro-alimentaire.



La chaleur de la Terre est aussi une énergie qu'on peut utiliser. Au centre de la Terre, la chaleur est tellement importante et la pression est si forte que *les roches sont en fusion*. On appelle cette matière *le magma*. On se sert de la vapeur ou de l'eau capturée entre les roches et chauffée par la chaleur de la Terre pour produire de l'électricité et du chauffage. Cette énergie est appelée **géothermie**.

Chapitre 2. Exploitation de l'énergie solaire

Conversion Thermique

Introduction : L'énergie solaire est directement convertie en chaleur grâce à des capteurs solaires thermiques. Elle est constituée d'une surface absorbante de couleur foncée (l'absorbeur), généralement placée derrière une vitre. Un matériau résistant à la chaleur et thermiquement isolant est placé derrière l'absorbeur pour limiter les pertes calorifiques. La chaleur absorbée par la surface noire est transmise à un fluide caloporteur (eau, air,..). Sa température peut atteindre 60 à 80°C, voire 100°C.

Les collectionneurs capteurs solaires thermiques sont classés comme faible, moyenne et haute température en fonction de la façon dont vous travaillez.

- Capteurs basse température, fournissent de la chaleur utile à des températures en dessous de 65°C.
- Capteurs moyenne température, sont des dispositifs qui concentrent le rayonnement solaire pour fournir de la chaleur utile à une température plus élevée, généralement entre 100 et 300 °C.
- Capteurs haute température, ils travaillent à des températures supérieures à 500 °C. Ils sont utilisés pour la production d'énergie.

Capteur solaire basse température

Le capteur reçoit le rayonnement solaire, dans une bande de longueurs d'ondes $0,15 \mu\text{m} < \lambda < 0,30 \mu\text{m}$, le spectre visible allant de 0,40 à 0,75 μm . Le capteur comporte un absorbeur, qui est une surface noircie pour accroître sa capacité d'absorption de l'énergie solaire. Si c'est une surface sélective, son absorptivité $\alpha > 0,9$ et son émissivité $\varepsilon < 0,1$. L'absorbeur chauffé émet de l'infrarouge. Une isolation est utilisée pour limiter les pertes thermiques du capteur. On utilise des matériaux dont la conductivité thermique est très faible. Un vitrage est utilisé pour créer l'effet de serre, ce qui a pour effet d'augmenter la température de l'absorbeur. ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure 1.

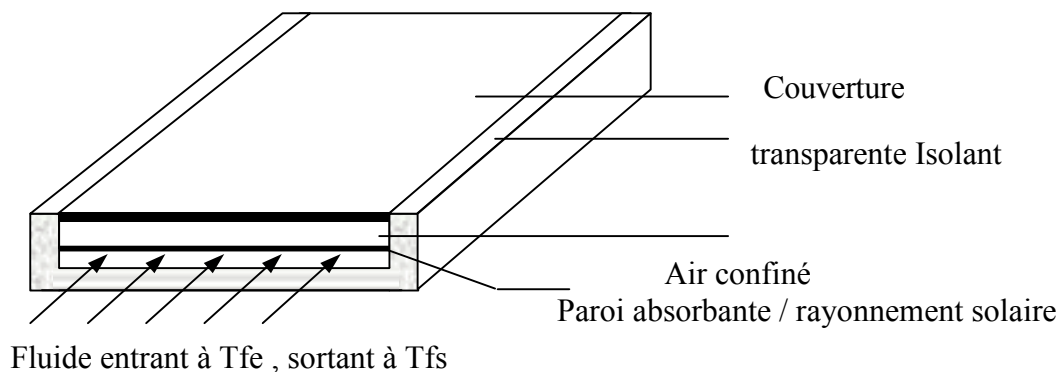


Figure: Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur.

Bilan thermique global

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_{p \rightarrow} + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (1)$$

Où : φ_{sa} Flux solaire absorbé
 $\varphi_{p \rightarrow}$ Flux perdu par la paroi absorbante
 φ_u Flux utile transmis au fluide caloporteur
 φ_{st} Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\varphi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Où : M_e Masse en eau du capteur définie par : $\sum m_i c_i = M_e c_{eau}$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteur

T Température moyenne du capteur
 t Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{s \rightarrow p} = \tau_{cs} \alpha_{ps} G^*(i, \gamma) \quad (3)$$

Où : $\varphi_{s \rightarrow p}$ Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)
 $G^*(i, \gamma)$ Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($W \cdot m^{-2}$)
 α_{ps} Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire
 τ_{cs} Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire
 S Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\varphi_u = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4)$$

Où : q_{cf} Débit calorifique du fluide caloporteur ($W \cdot ^\circ C^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique .

T_{fe} Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

T_{fs} Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$q_{p \rightarrow} = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (5)$$

- Où : h_p Coefficient global de pertes du capteur
 T_{pm} Température moyenne de la paroi absorbante
 T_a Température de l'air extérieur

Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G^*(i,\gamma)S} \quad (6)$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{s \rightarrow p}} \quad (7)$$

- Le rendement optique :

$$\eta_o = \frac{\varphi_{s \rightarrow p}}{G^*(i,\lambda)} \quad (8)$$

2.4. Les différents types de capteurs solaires thermiques

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type de fluide, le niveau de température que les panneaux solaires permettent d'atteindre. On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques.

2.4.1. Les capteurs plans non vitrés ou souples

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle circule le liquide à réchauffer

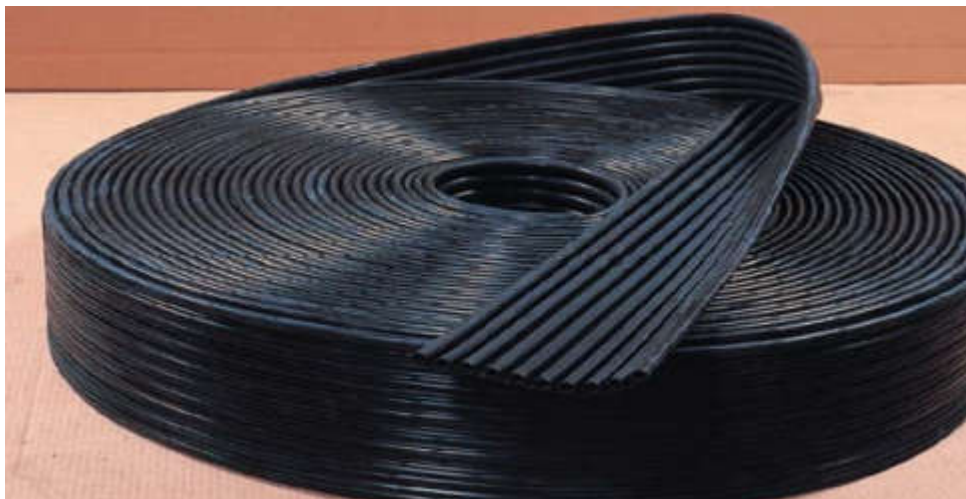


Figure : Capteur plan non vitré.

Le principal domaine d'utilisation de ce capteur est le chauffage des piscines de plein air. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en été, lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés. Le niveau de température de l'eau des bassins est quant à lui inférieur à 30 °C. Dans ces conditions, l'efficacité des capteurs est très bonne, et l'utilisation de capteurs vitrés ne permettrait pas une meilleure collecte de l'énergie solaire.

L'absence de gel pendant la période autorise la circulation directe de l'eau de la piscine dans les capteurs. Afin d'éviter des problèmes de corrosion et également pour des raisons économiques, les constructeurs de matériels utilisent souvent des matières plastiques (figure 3).



Figure : Piscine publique utilisant des capteurs souples.

Les capteurs sans vitrage peuvent également être utilisés pour des installations de production d'eau chaude sanitaire. C'est en particulier le cas dans des régions chaudes et fortement ensoleillées. La parfaite intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surfaces plus importantes, pour compenser la différence d'efficacité avec des capteurs vitrés, en particulier l'hiver .



Figure : Installation de production d'eau chaude sanitaire.

Les capteurs plans vitrés : Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteurs vitrés », sont les plus utilisés, car ils correspondent au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70 °C. Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'une couverture transparente de type « double vitrage », permettent d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C (figure 5).

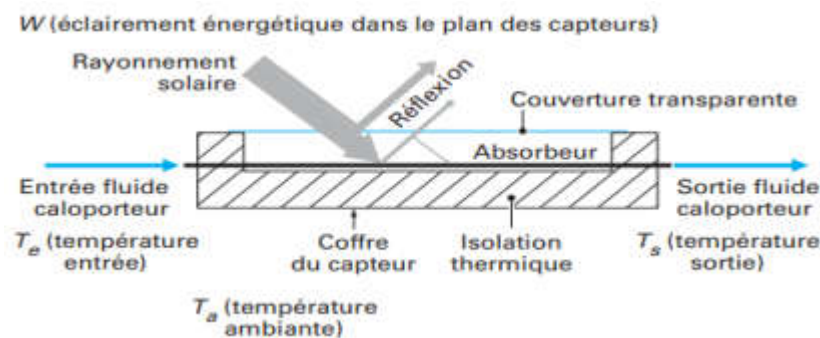


Figure : Coupe d'un capteur vitré.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- ✓ le coffre ;
- ✓ l'isolation thermique ;
- ✓ l'absorbeur ;
- ✓ la couverture transparente.

. Les capteurs sous vides : Lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée (> 100 °C) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne), il est intéressant d'utiliser un capteur solaire dit « sous vide », qui se présente sous la forme de tubes de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres) dans lesquels sont disposés les absorbeurs, de conception identique à celle d'un capteur plan. L'intérieur du tube est vidé de l'air qu'il contient et des pertes par convection entre l'absorbeur et la paroi vitrée du tube sont ainsi supprimées. Le capteur sous vide voit ainsi ses déperditions limitées au rayonnement infrarouge. Pour limiter les effets de celui-ci, la surface de l'absorbeur possède un revêtement « sélectif » (figures 6 et 7).



Figure : Détail d'un capteur solaire sous vide.

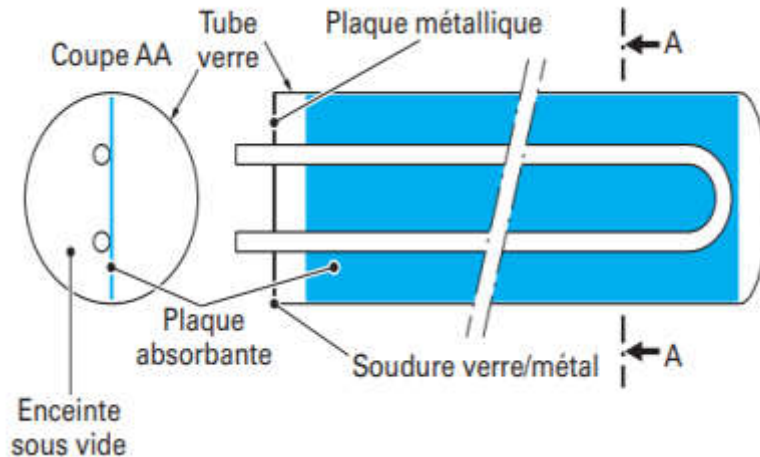


Figure : Coupe d'un capteur sous vide.

. Applications

Les applications du solaire thermique à basse température sont nombreuses. On peut citer entre autres:

- Le distillateur solaire
- Le chauffe-eau solaire
- Froid et climatisation solaire
- Le séchoir solaire

Les distillateurs solaires :

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l'humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

- **Distillation a un étage**

C'est le plus simple et le plus répandu, on en trouvera une schématisation sur la figure.. L'eau placée dans un bac noirci disposé au fond d'un capteur solaire s'échauffe par absorption du rayonnement solaire traversant la vitre. Cet échauffement provoque une évaporation superficielle, la vapeur d'eau produite venant ensuite se condenser sur la vitre plus froide. Il suffit alors de récupérer l'eau distillée ruisselant sur la face interne de la vitre à l'aide d'un système de gouttières placées de chaque côté de la vitre.

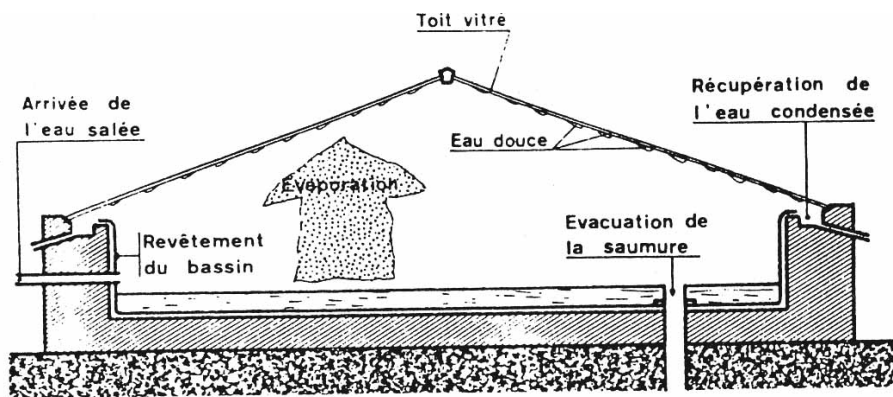


Figure: Schéma de principe d'un distillateur solaire à un étage.

- **Distillateur a plusieurs étages**

Pour augmenter le rendement des distillateurs solaires, le Pr. Le Goff a imaginé un distillateur à plusieurs étages où la chaleur libérée par la condensation est récupérée dans un 2ème étage pour servir à évaporer une masse d'eau supplémentaire suivant le schéma de la figure.

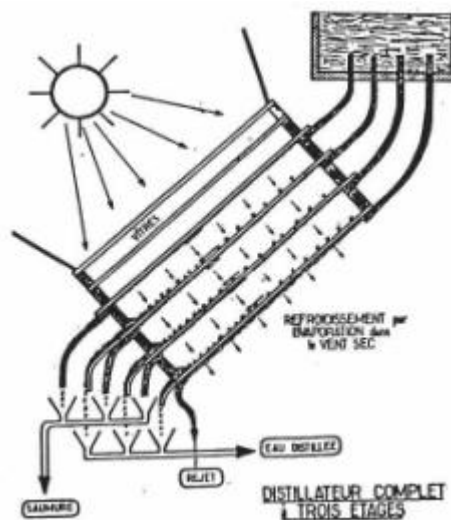


Figure: Schéma du distillateur solaire DIFICAP du Pr. Le Goff.

La production distillée peut théoriquement atteindre 10 à 15 l.m⁻² par jour. Les problèmes liés à sa réalisation n'ont pas jusqu'à présent permis sa vulgarisation.

Production d'eau chaude : La production d'eau chaude sanitaire est à l'heure actuelle l'application la plus développée de l'énergie solaire thermique. Sous un climat tropical sec, un chauffe-eau solaire performant et bien dimensionné peut permettre de satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille toute l'année. Sous un climat tropical humide, il sera nécessaire à certaines périodes d'utiliser une énergie d'appoint. Le chauffe-eau solaire permettra quand même de réaliser d'importantes économies. Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaire que nous allons détailler.

- **Chauffe-eau solaire capteur-stockeur**

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de 75 l.m^{-2} permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie.

Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.

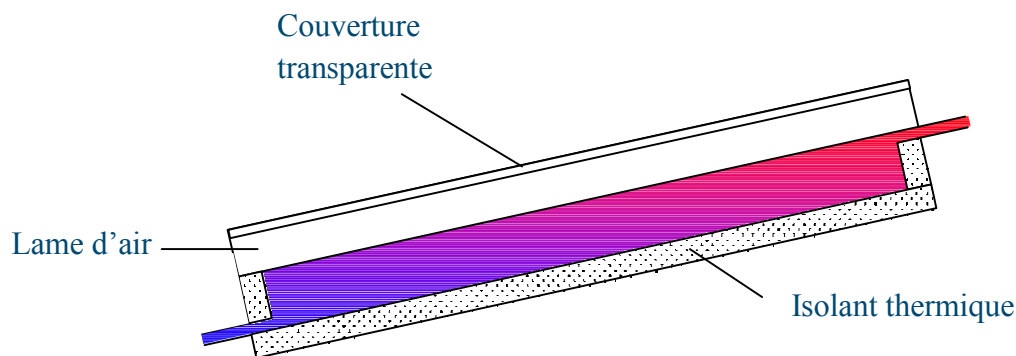


Figure : Schéma d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **Chauffe-eau solaire monobloc**

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire comme représenté sur la figure.2, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon. La figure.3 représente une vue éclatée d'un chauffe-eau solaire monobloc commercialisé.

Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale ($>10^\circ$, on choisit souvent 30°) pour un fonctionnement correct du thermosiphon

La figure.11 illustre quelques-unes de ces règles d'installation.

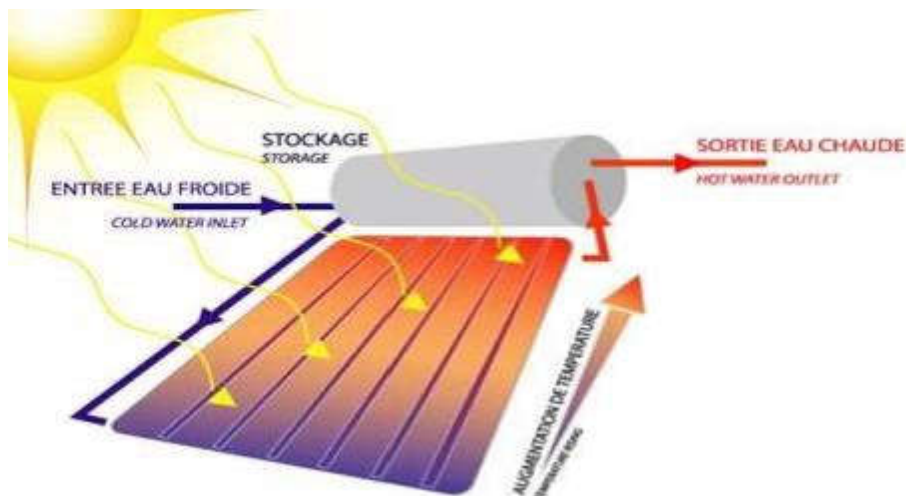


Figure : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire monobloc.

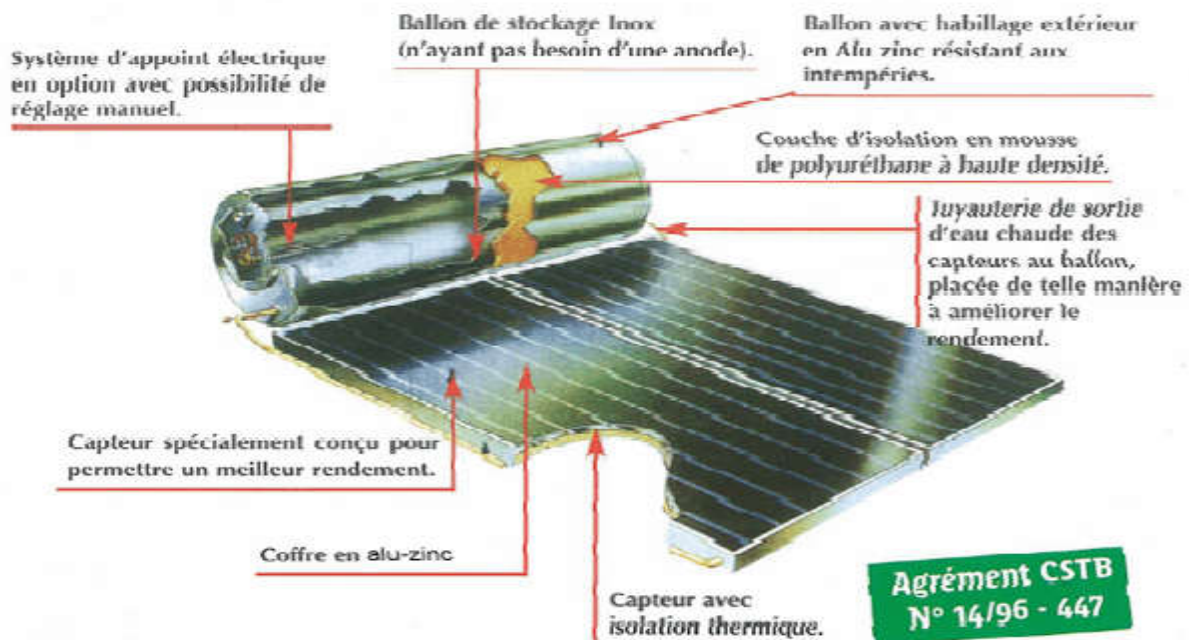


Figure : Vue éclatée chauffe-eau solaire BP Solar (<http://www.apex-bpsolar.com/solaire/chauffeEau>)

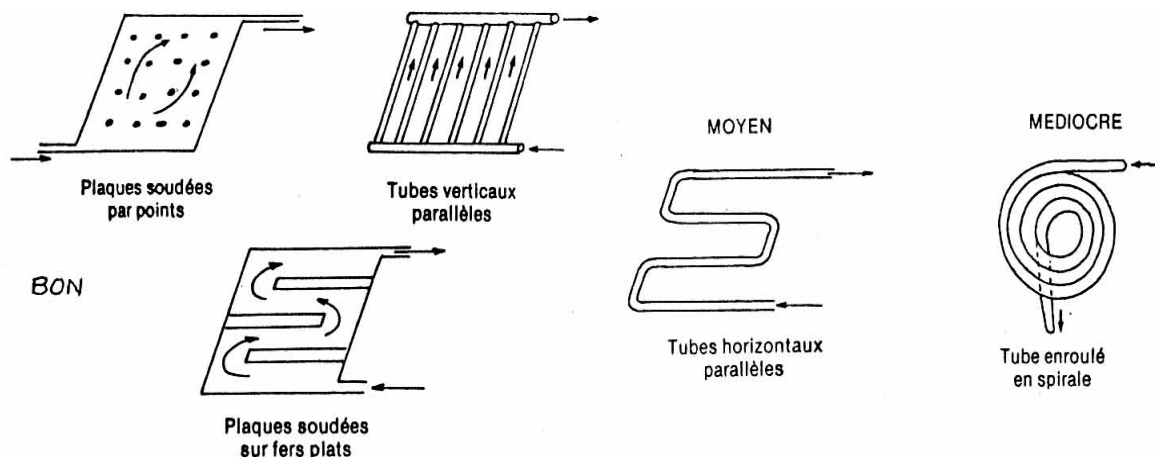


Figure : Règles d'installation des chauffe-eau solaires monoblocs

- **Chauffe-eau solaire à éléments séparés**

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation. On trouvera sur la figure 14 le schéma de principe d'une installation type et sur la figure 15 le détail des différents éléments constitutifs.

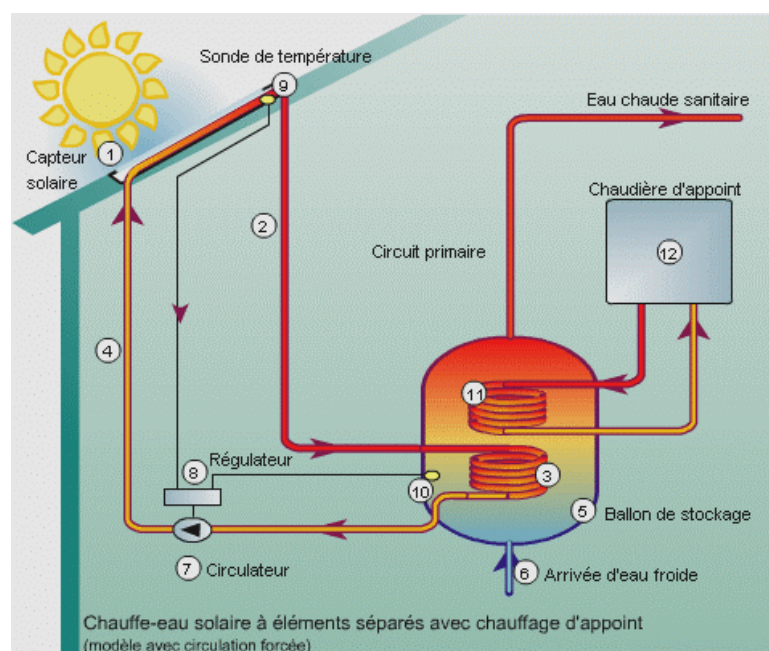
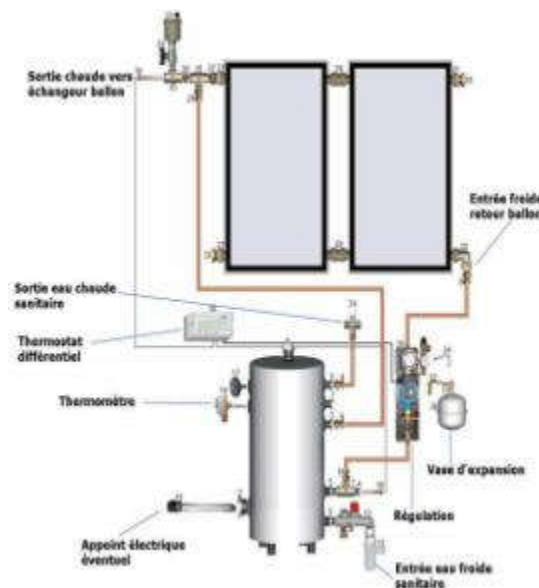


Figure : Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

La différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide conduit à l'établissement d'un gradient de température dans un ballon de stockage d'eau chaude : la température de l'eau est plus élevée en haut qu'en bas du ballon ainsi que le schématise la figure 16 Le rendement d'un capteur solaire étant d'autant plus élevé que la température d'entrée du fluide est faible, on a intérêt :

- A choisir un rapport hauteur/diamètre du ballon suffisant (>2) pour obtenir une stratification suffisante,
- A éviter le brassage de l'eau dans le ballon qui « casserait » la stratification,
- A envoyer vers le capteur de l'eau provenant de la partie basse du ballon.



j **Figure:** Eléments d'un chauffe-eau solaire à éléments séparés

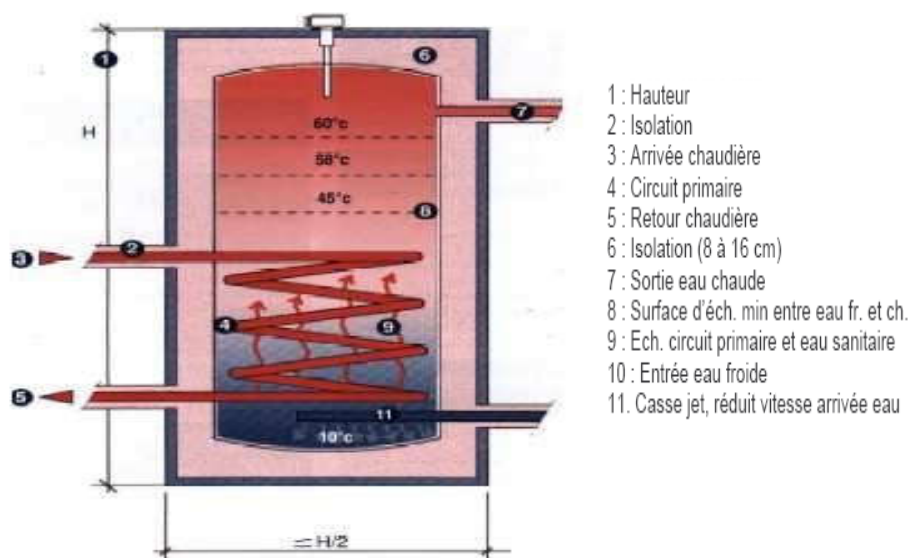


Figure : Schématisation de la stratification dans un ballon d'eau chaude (extrait de Bragard

Froid et climatisation

• Réfrigération

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire du froid par deux voies :

- Photoélectrique : on utilise l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques pour alimenter un groupe frigorifique à compression ou des éléments Peltier
- Thermique : on utilise la chaleur récupérée dans un capteur solaire pour produire du froid par sorption.

Des réfrigérateurs fonctionnant sur ce principe sont opérationnels comme celui de Flechon et Godmel dont on trouvera le schéma sur la figure 17.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un couple absorbant/fluide frigorigène. La substance absorbante reste dans le capteur solaire. Dans la journée, l'élévation de sa température dans le capteur provoque l'évaporation du fluide frigorigène qui se condense dans un condenseur placé dans l'air ambiant à l'extérieur de l'enceinte à réfrigérer. Il est ensuite stocké dans un réservoir.

Pendant la phase nocturne le composé absorbant se refroidit et devient « avide » de fluide frigorigène. Celui-ci s'évapore donc dans l'évaporateur placé à l'intérieur du caisson isolé à refroidir pour être réabsorbé par le composé absorbant.

Le cycle peut alors se répéter le jour suivant. La production de froid s'effectuant la nuit, il faut prévoir un stockage du froid produit pour limiter l'élévation de température de l'enceinte réfrigérée dans la journée. Ce stockage s'effectue généralement par un volume d'eau glycolée placée dans l'enceinte.

Le facteur limitant la diffusion de ces réfrigérateurs reste un coût élevé.

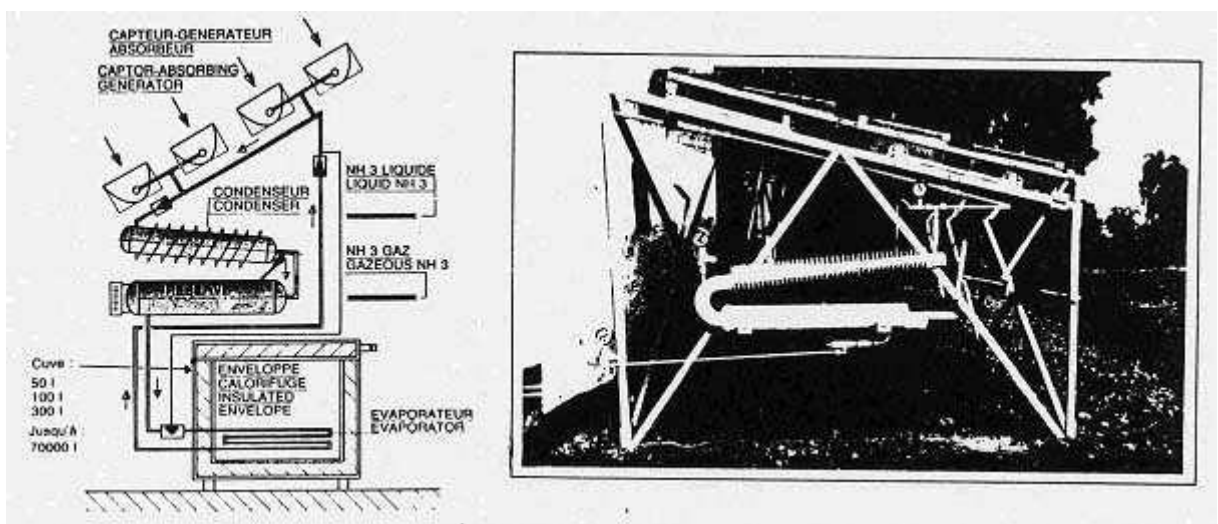


Figure : Schéma du réfrigérateur photothermique des Prs Flechon et Godmel

- **Climatisation**

Nous présenterons ici, le principe de deux systèmes reposant sur des cycles intermittents d'absorption/désorption d'eau dans un solide hygroscopique (gel de silice) :

Le système conçu par Dannies (figure 18) ne comporte aucun mécanisme et ne fait appel qu'aux mouvements de l'air par convection naturelle. Les murs Est et Ouest du bâtiment contiennent les éléments absorbants au travers desquels l'air circule selon le processus suivant :

- Le matin le soleil chauffe le mur Est : le mélange d'air et de vapeur d'eau réchauffé et plus léger monte dans le mur Est et en sort à sa partie supérieure. Il en résulte une aspiration correspondante d'air par les orifices supérieurs du mur Ouest dans lequel l'air passe sur l'absorbant régénéré la veille et s'y dessèche. Un dispositif d'évaporation d'eau placé au pied du mur permet alors de le refroidir avant son introduction dans la pièce. Durant cette phase, l'échauffement du mur Est provoque la déshydratation de l'absorbant qu'il renferme.

- L'après-midi, le soleil chauffe le mur Ouest et la circulation d'air s'inverse.

Ce système expérimenté au Libéria et en Lybie a permis de maintenir les locaux à une température de 5 à 15°C au-dessous de l'ambiance extérieure, avec une humidité relative comprise entre 65 et 75%.

Un autre système destiné à la déshumidification de l'air en zone humide a été mis au point par Lof aux Etats- Unis (figure (19)). L'air à déshumidifier passe à travers une pluie de solution de glycol concentrée et s'y dessèche. La chaleur latente de condensation et la chaleur d'absorption sont éliminées dans un échangeur à eau : à la sortie l'air déshumidifié est à la même température qu'à l'entrée.

Le glycol dilué par son échange avec l'air humide est envoyé dans un régénérateur où il tombe en gouttelettes à travers un courant ascendant d'air sec réchauffé dans un capteur solaire à air.

Ces systèmes restent toutefois au stade de faible diffusion et semblent difficilement adaptables à l'habitat individuel. Leur avenir se situe plutôt dans une intégration à une centrale de climatisation en vue de réduire la consommation énergétique.

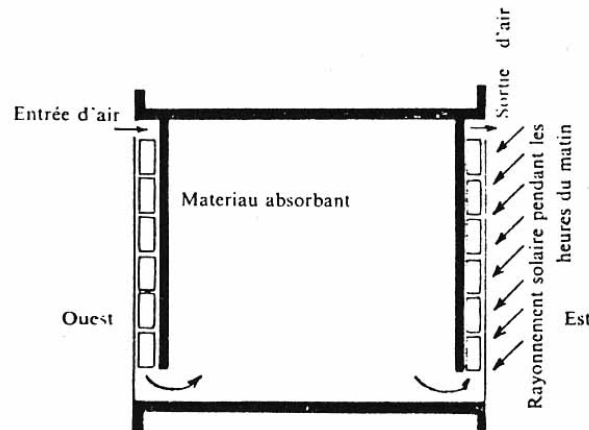


Figure: Schéma du procédé Dannies (d'après IIF)

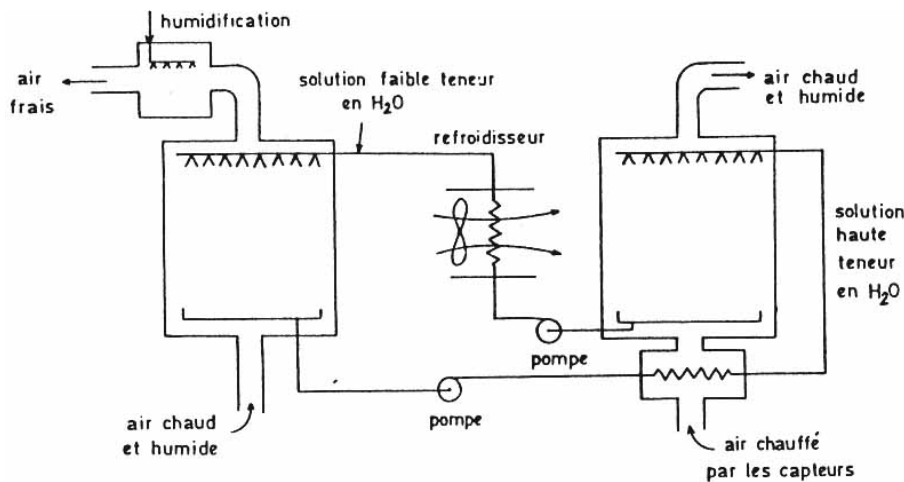


Figure: Schéma du procédé Lof

Le séchoir solaire

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes.

Le séchage solaire a pour avantage de conserver les aliments tout en gardant une majorité des éléments nutritifs, seules les vitamines B et C sont majoritairement perdues. Correctement stockés, les aliments se conservent entre 6 et 12 mois sans baisse de la qualité

Ce n'est qu'au 20^{ème} siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau (*water activity* Aw) et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques.

Le séchoir solaire apparaît alors comme une solution non polluante. Souvent artisanaux, le séchoir peut se décliner sous différentes formes

Types de séchoirs solaires

- 1) **Les séchoirs-Tunnel** : Ce sont des séchoirs industriels destinés au séchage des grandes récoltes et dans les processus de conservation de certains aliments. Ils se composent d'un champ de capteurs solaires et d'un circuit aéraulique, le tout constituant le générateur d'air chaud. Le produit à sécher est disposé dans des chariots montés sur des rails, qui traversent un tunnel de quelques mètres de façon continue (Figure20).



Figure: Les séchoirs-Tunnel

- 2) **Les séchoirs-stock** Appelés aussi séchoirs étuves, ce sont des séchoirs immobiles, où le produit à sécher est entreposé sur des claies ou étagères. Les séchoirs stocks peuvent être directs ou indirects.
 - **Les séchoirs solaires directs (séchoirs-serre)** Dans ce type de séchoirs, l'insolateur (capteur solaire) et le stock (chambre de séchage) forment un seul bloc. Le séchoir est constitué d'un caisson isolé à sa base et recouvert d'une vitre ou d'un plastique clair. Les aliments à sécher reçoivent directement les rayons du soleil à travers la couverture transparente (Figure 21). Ce type de séchoir est adapté au séchage des fruits et légumes

dont la teneur en eau initiale est importante et qui nécessitent de longues durées de séchage (Figure 22).



Figure : Séchoir solaire direct portatif



Figure: Séchoir solaire serre

- **Les séchoirs solaires indirects** : Ils sont composés d'isolateurs couplés à une chambre de séchage. L'isolateur sert à chauffer l'air et à l'envoyer dans cette dernière (Figure 23). En convection naturelle, ceci ne suffit pas à réchauffer l'air à la température désirée, ce qui explique l'ajout d'une cheminée. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore considérablement le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse du produit à sécher.



Figure: Deux types de séchoirs solaires indirects

Les applications de la solaire thermique basse température sont assez nombreuses et concourent à la satisfaction de très nombreux besoins dans le domaine de l'agriculture, de la santé et de l'amélioration de la qualité de la vie. La cuisson solaire, qui sort du cadre des basses températures, n'est pas abordée ici. Signalons cependant que c'est un domaine important, contribue à la qualité de la vie et également à la préservation de l'environnement.

Conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau.

L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

Le terme photovoltaïque vient du grec "phos, photos" qui désigne la lumière et de "voltaïque", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Energie lumineuse :

La lumière est constituée de photons vibrant à des fréquences f et sont donc porteurs d'une énergie

$$E = h \times f$$

h est la constante de Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js)

f la fréquence de l'onde lumineuse en Hertz

E l'énergie de ce photon en Joules

Remarque : Unité couramment employée l'électron volt : Unité de mesure représentant l'énergie cinétique d'un électron, accéléré dans le vide sous une différence de potentiel de

$$1 \text{ Volt: } 1 \text{ eV} = 1,60217 \cdot 10^{-21} \text{ Joule} = 44,505 \cdot 10^{-24} \text{ Wh. Alors } E_{(eV)} = \frac{1,2419}{\lambda_{(\mu m)}}$$

Le flux de photons par seconde et par centimètre carré $N(\lambda)$ dépend du potentiel solaire $M(\lambda)$

$$\text{Tel que } N(\lambda) = M_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} d\lambda \text{ avec } N_{(\lambda)} (cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot \mu m^{-1}) \text{ flux de photons}$$

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que :

- ✓ les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;
- ✓ l'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- ✓ les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.

Principe de conduction dans un matériau:

Les atomes sont constitués de noyaux et d'électrons qui gravitent autour. Pour qu'un matériau conduise l'électricité il faut que des électrons soient capables de se déplacer. Les électrons possèdent une certaine quantité d'énergie qui est quantifiée. Il existe donc des niveaux d'énergie auxquels appartiennent les électrons.

Ces niveaux d'énergies se découpent ainsi :

La bande de valence : (ayant 2 électrons) les électrons qui s'y trouvent participent aux liaisons entre les atomes.

La bande de conduction : les électrons qui s'y trouvent sont mobiles et peuvent bouger d'un atome à l'autre si on leur applique un champ approprié, ils participent donc à la conduction électrique ; c'est le déplacement de ces électrons là qui est responsable du courant électrique.

La bande interdite ou GAP : la gamme d'énergie auxquelles les électrons n'ont pas accès (il n'y a pas de niveau d'énergie dans cette gamme),.

Le niveau de Fermi : correspond à l'énergie limite qui sépare, au zéro absolu, les niveaux occupés des niveaux vides. Cette énergie est caractéristique du matériau.

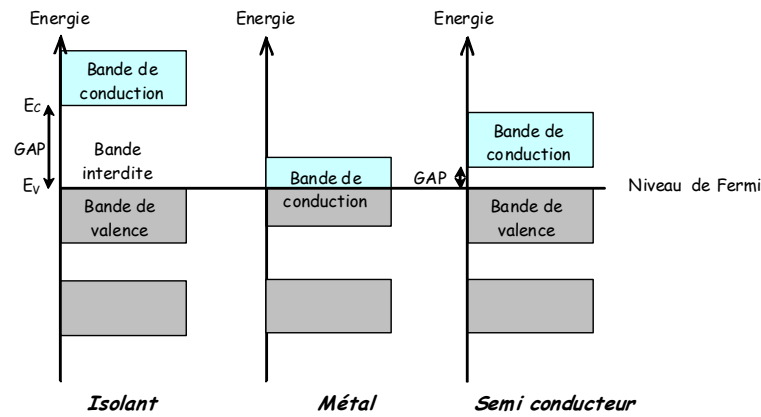


Figure : Représentation schématique des bandes d'énergie d'un solide.

Dans un métal, le gap est nul ; il y a continuité entre les bandes de valence et celles de conduction, il y a donc toujours des électrons susceptibles de conduire le courant.

Dans un isolant, la dernière bande de valence est pleine, et le gap est énorme : il n'y a donc aucune chance d'exciter un électron pour qu'il passe dans la bande de conduction (l'énergie requise est trop importante et ferait fondre le matériau avant qu'il ne commence à conduire).

Pour les semi-conducteurs, à température nulle ($=0$ Kelvin) ce sont des isolants : bandes de valence pleines, et bandes de conduction vides. Mais un apport d'énergie faible (thermique ou lumineuse) suffit à faire passer des électrons dans la bande de conduction car le gap est très faible (de l'ordre de l'eV) : le matériau devient ainsi conducteur.

Principe de la cellule photovoltaïque : les photons font conduire les électrons

En effet lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

- ✓ si l'électron revient à son état initial n'ayant réussi à franchir le GAP l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.
- ✓ par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " passent le GAP et vont dans la bande de conduction et créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque..

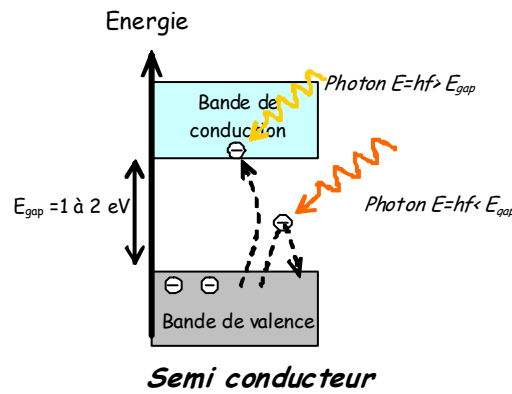


Figure2: Principe de la cellule photovoltaïque

Le dopage : réduit le Gap et crée un champ électrique pour collecter les électrons

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés c'est-à-dire leur ajouter un autre atome à une certaine concentration, dont une bande d'énergie va se trouver exactement dans la bande interdite du semi-conducteur. Deux types de dopage sont possibles:

a) Le dopage de type N (négatif)

Il consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si). Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres. Ainsi le dopant va ajouter une bande d'énergie dotée d'électrons près de la bande de conduction ainsi, l'énergie nécessaire pour que les électrons passent dans la bande de conduction est bien plus facilement atteinte.

Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires.

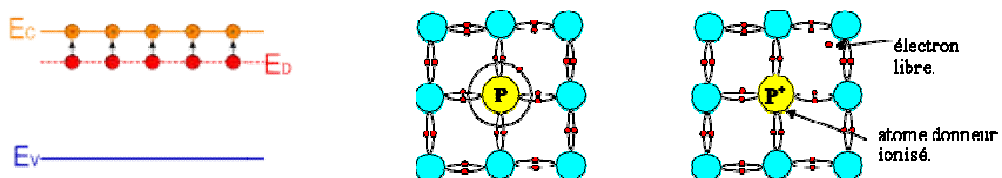


Figure: Le dopage de type N (négatif)

b) Dopage P (positif)

Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires.

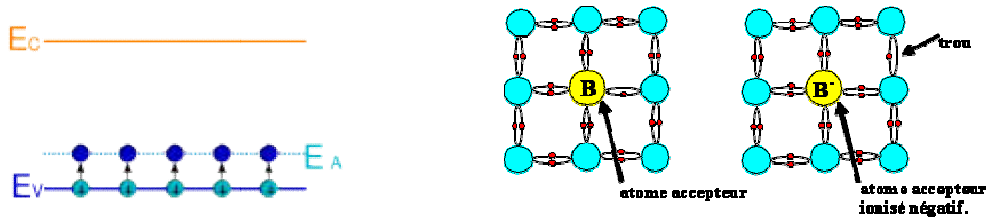


Figure: Le dopage de type P (positif)

Composition d'une cellule PV

Les technologies utilisées par les différents fabricants varient, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont les mêmes.

Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces à savoir :

- **une couche "anti-reflet"** réduit les pertes par réflexion (avant en TiO_2 :34 % de réflexion du spectre visible, mais remplacée aujourd'hui par du nitrure de silicium hydrogéné (SiN-H). 8 %
- **une grille conductrice** avant "collectrice des électrons" qui doit (être dense pour collecter les électrons mais peu dense pour laisser passer la lumière) également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion ; (Ni, Sn , Pb)
- **une couche dopée N** avec porteurs de charge libres négatifs (électrons) ; (Phosphore)
- **une couche dopée P** avec porteurs de charge positifs (trous) ; (Bore)
- **une surface de contact arrière conductrice** en métal "collectrice des électrons", ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium ; (Al , Ni, Sn , Pb)

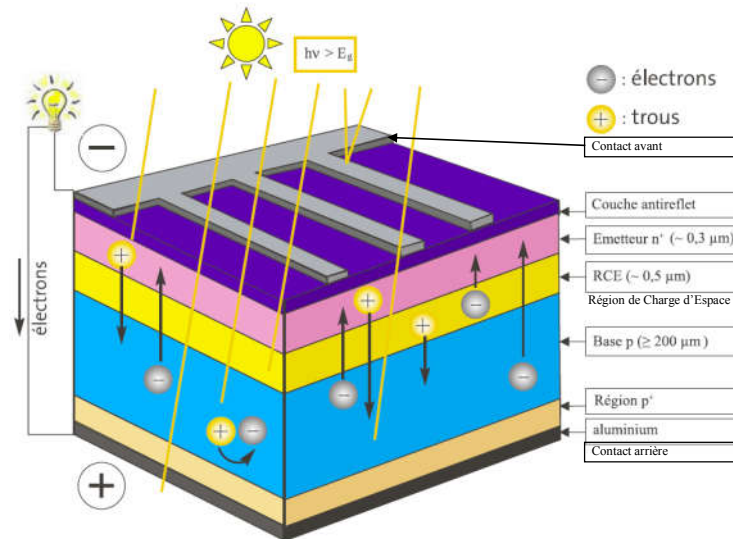


Figure : Composition d'une cellule PV

Les principales technologies de cellules solaires

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires :

- **les cellules au silicium cristallin**, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente encore 90 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 12 à 20 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.
- **les cellules à base de couches minces** qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semiconducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 7 à 13 %). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 10 % et reste relativement stable : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.
- **les cellules à base de photovoltaïque organique**, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Caractéristiques électriques d'une cellule PV

La courbe courant-tension

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

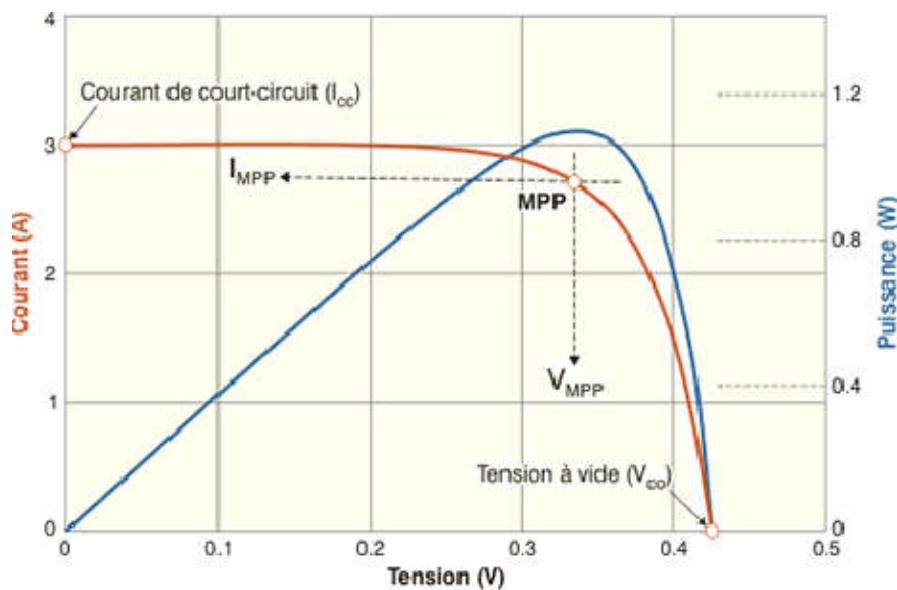


Figure : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

La puissance crête d'une cellule PV

Dans le cas d'utilisation de photopiles avec le rayonnement solaire, la puissance crête d'une photopile, aussi nommée puissance "catalogue", notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) (En moyenne, un Watt crête correspond à la puissance d'une cellule monocristalline d'une surface de 1 dm^2), représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :

- éclairage solaire de 1 kW/m^2 (correspondant à peu près à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil à midi par temps clair d'été) ;

- température de la cellule PV égale à + 25 °C.

répartition spectrale du rayonnement dit **AM.1,5 (correspondant au rayonnement solaire parvenant au sol après avoir traversé une atmosphère de masse 1 à 45 °)**.

Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au **courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement**.

Comme la forme de la courbe varie peu en fonction de l'éclairement, le rendement varie très peu en fonction de l'éclairement.

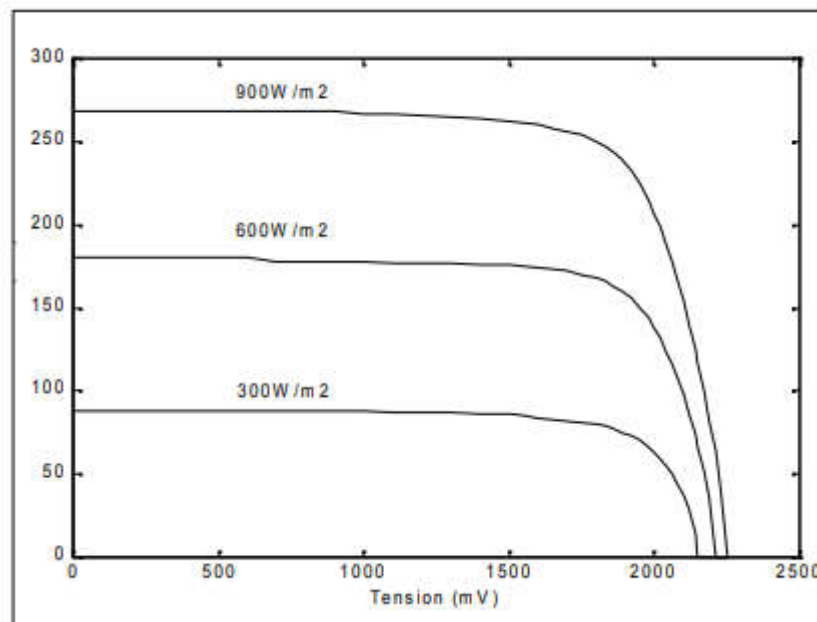


Figure : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire.

Influence de la température

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

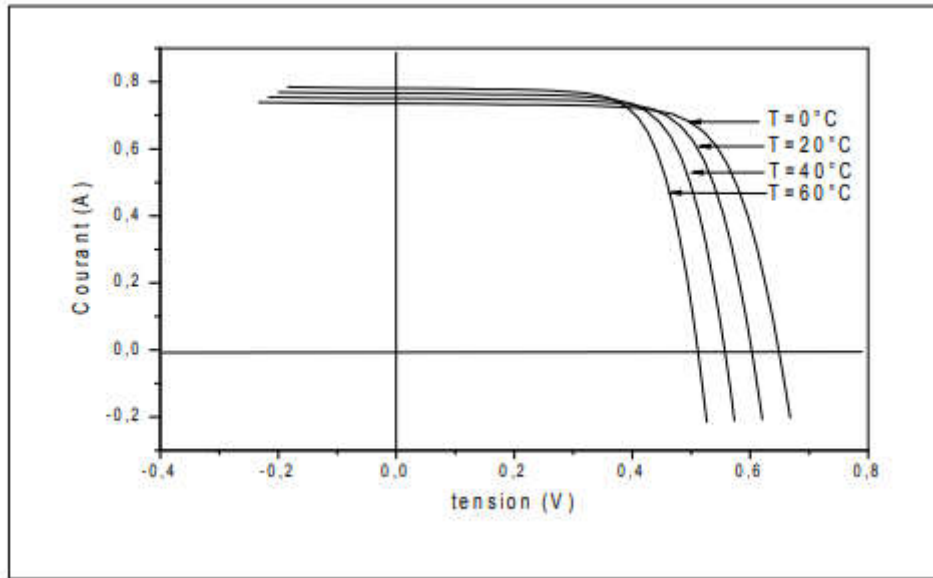


Figure : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

Les systèmes photovoltaïques

Module solaire ou photovoltaïque

a. Association des cellules en série

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

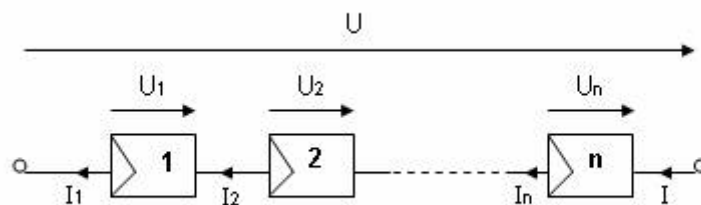


Figure : Association série

b. Association des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

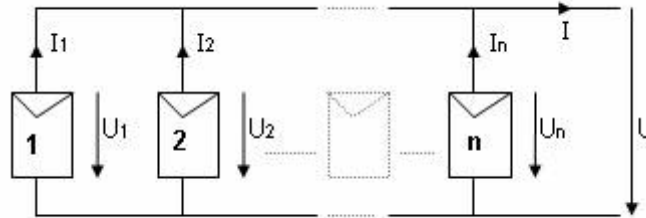


Figure : Association parallèle.

Les différentes installations photovoltaïques

a. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

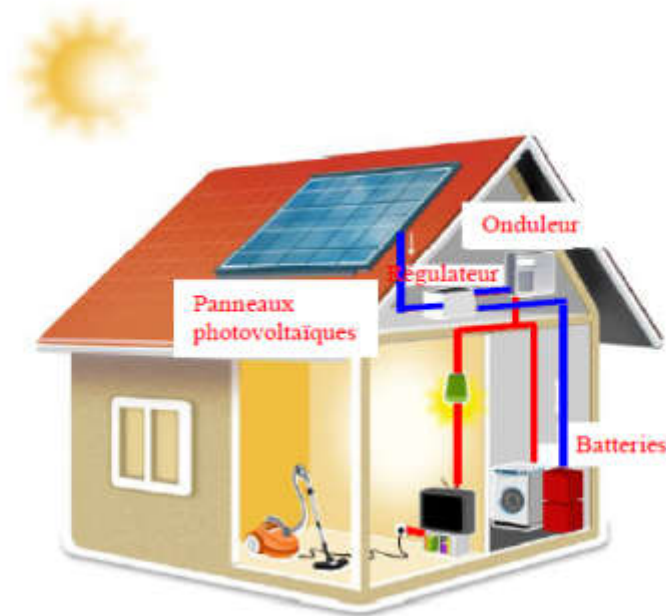


Figure : Installations photovoltaïque sur site isolé

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.

L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.

Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

b. Les installations raccordées au réseau de distribution public

✓ **Solution avec injection totale**

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :

- l'un pour la production,
- l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).

✓ **Solution avec injection de surplus**

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau.

Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire.

Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

Domaine d'application

Les applications autonomes

- les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes
- les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et micro-ordinateurs
- les applications « professionnelles », relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.)

- l'électrification rurale des sites isolés, habitat dispersé, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement, ...

Les applications raccordées au réseau public de distribution d'électricité que l'on peut subdiviser en trois grands domaines :

- les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel ou professionnel : les modules peuvent être " sur-imposés " à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) ou bien " intégrés au bâti " dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière, garde-corps,...).
- les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit,...)
- les parcs photovoltaïques au sol, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique.

avantages et inconvénients

Les principaux avantages d'un système photovoltaïque sont :

- Une autonomie énergétique à des sites non raccordés au réseau de distribution d'électricité;
- Un système fiable et exigeant très peu d'entretien;
- Une longue durée de vie utile si bien protégée (plus de 20 ans);
- La production d'une énergie propre et renouvelable;
- Un fonctionnement silencieux. En contrepartie,

Les principaux inconvénients des systèmes photovoltaïques sont :

- Le coût à l'achat est très élevé;
- Le coût de production de l'énergie est élevé;
- Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est faible (7 à 17 %);
- Le stockage de l'énergie est difficile avec les technologies actuelles;
- Les applications rentables en agriculture sont restreintes;
- Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie cause des problèmes environnementaux.

Chapitre 3. Exploitation de l'énergie éolienne

Introduction : Les éoliennes utilisent la force du vent pour produire de l'électricité. Elles sont montées aux sommets de mâts afin de bénéficier d'un maximum de puissance. A 30 mètres du sol ou plus au-dessus du sol, elles bénéficient d'une plus grande vitesse de vent, et évitent ainsi les turbulences aérodynamiques qui se trouvent proches du sol. Les éoliennes captent l'énergie du vent par leurs pales en forme d'hélices. Le plus souvent 2 ou 3 pales sont montées sur un axe pour constituer un rotor. Il existe de manière générale deux sortes d'éolienne, à axe vertical et à axe horizontal.

L'histoire de l'éolienne

Des moulins à vents depuis l'antiquité pour moulin du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier... ou relever de l'eau).

1890 : Première éolienne industrielle développée par le Danois Poul La Cour pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires en 1908.

1955 : Une éolienne expérimentale de 800 kW est exploitée pendant 8 ans dans la Beauce. Deux éoliennes de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint Rémy des landes(50).

1973 : premier choc pétrolier, le Danemark entreprend un vaste plan de développement éolien suivi par d'autres pays.

Le vent : Le vent est lié à la différence de pression atmosphérique existant sur terre, la direction du vent allant de la haute pression vers la basse pression.

De manière générale les vents sont plus forts sur les océans que sur le continent. En effet, la vitesse proche du sol dépend de la rugosité du terrain.

Principe de l'aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées.

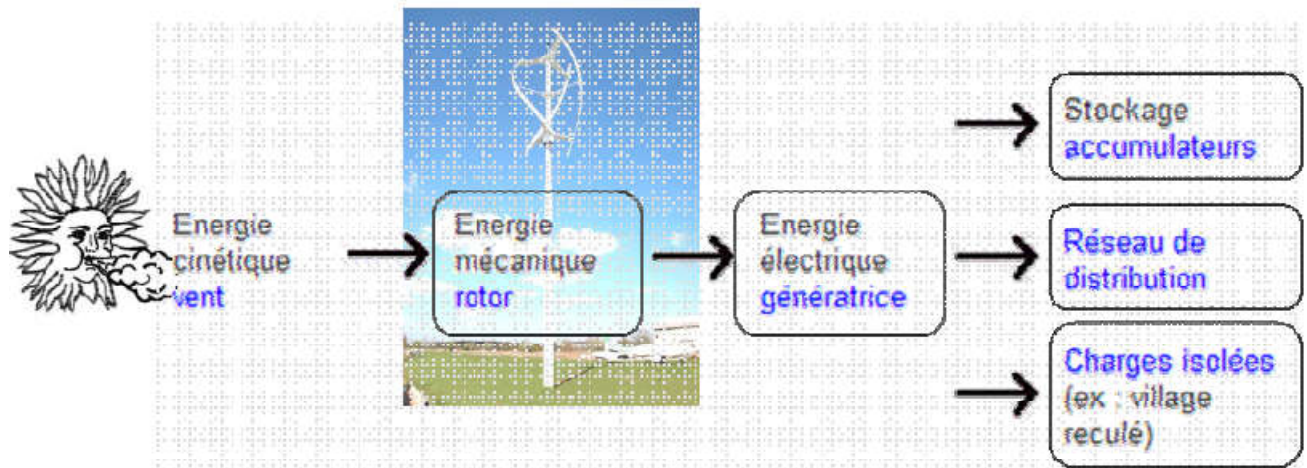


Figure : Principe de l'aérogénérateur

Les composants de l'aérogénérateur :

a. La fondation et le mât :

- ✓ **La fondation** : Elle assure l'encrege et la stabilité de l'éolienne, et leur taille est proportionnelle à la hauteur de l'aérogénérateur.
- ✓ **Le mât (la tour)** : Le mât est une composante principale de l'aérogénérateur. Il supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (Nacelle et Rotor).

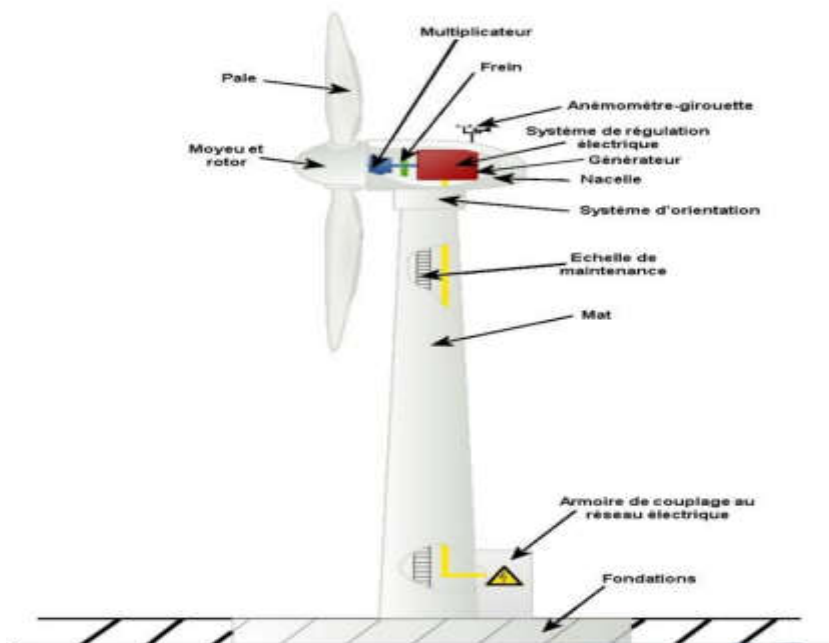


Figure 2 : Les composants de l'éolienne

b. La nacelle :

La nacelle contient les principaux composants d'une éolienne, elle est généralement réalisée en résine renforcée de fibres de verre.

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses équipements.

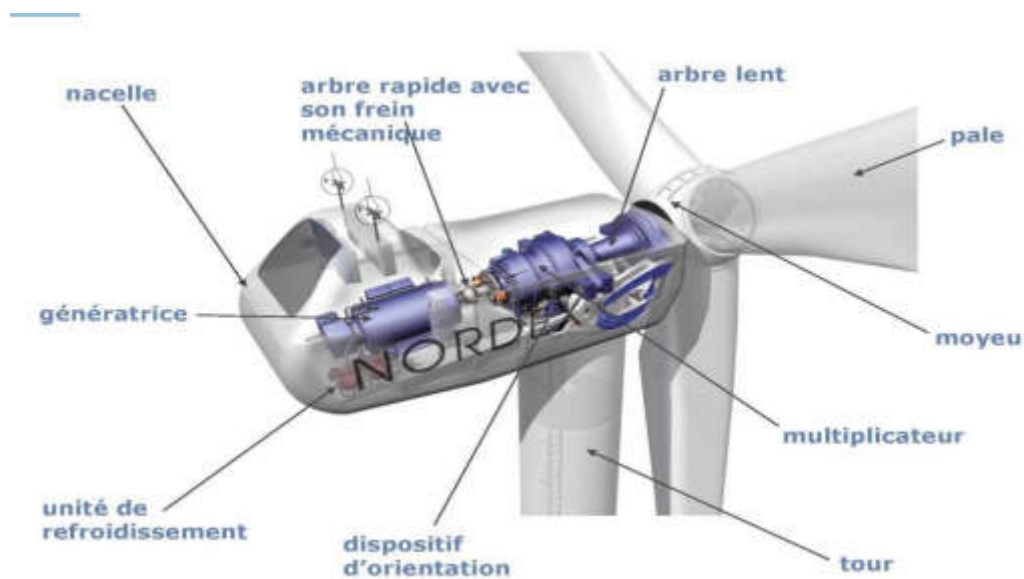


Figure 3 : les équipements électriques de la nacelle

La nacelle comporte :

- ✓ **L'arbre principal au primaire (lent):** Ou arbre primaire relie le moyeu du rotor au multiplicateur qui tourne lentement (14.6 à 30.8 tours/min). Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.
- ✓ **Le multiplicateur ou boîte de vitesse:** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ✓ **Un générateur électrique:** C'est un convertisseur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique à travers un champ électromagnétique qui entraîne la création du courant.
- ✓ **Un disque de freinage:** C'est un dispositif de sécurité, déclenché par l'anémomètre. Il permet l'arrêt total de l'éolienne en cas de vitesse élevée du vent (si vitesse du vent est supérieur à 25m /s) ou de maintenance.
- ✓ **Un système d'orientations :** C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein. Il a donc pour but de disposer les pales face au vent pour produire un maximum d'électricité.
- ✓ **Le capot:** Couverture qui protège les composantes de la nacelle, fait en résine de polyester renforcé de fibres de reine (isolement acoustique).
- ✓ **Le châssis:** Il y a le châssis arrière droit qui support le générateur; de gauche qui supporte le contrôleur du TOP. Le châssis avant est formé d'une poutre rigide y sont fixées le paliersupport et le système d'orientations.

✓ **Mesure du vent** : sur le toit arrière de la nacelle on trouve deux capteurs :

✓ **La girouette**: sert à la direction du vent.

✓ **L'anémomètre**: indique la vitesse du vent.

c. Rotor :

Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, il se compose de trois pales et il est relié à la nacelle par son moyeu (il fonctionne de la même manière qu'une hélice d'avion mais avec un sens de rotation inversé).

✓ **Cône du nez** : Le cône du nez protège le moyeu et les roulements de pale. Le cône est fabriqué en polyester et fibre de verre. Il est vissé à l'avant du moyeu et est soutenu par les roulements de pale

✓ **Pales** : Elles transfèrent la puissance du vent au moyeu du rotor. Elles peuvent être fabriquées en fibre de verre et résine époxy.

✓ **Moyeu** : Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément. Le moyeu est de forme sphérique est fabriqué en fonte nodulaire.

Les types d'éolienne

Il existe deux types d'éolienne domestique. Elles se distinguent selon l'orientation de leur axe de rotation.

L'**éolienne horizontale** est le type d'éolienne le plus utilisé. Elle offre un rendement important mais elle est responsable de nombreuses nuisances non négligeables.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

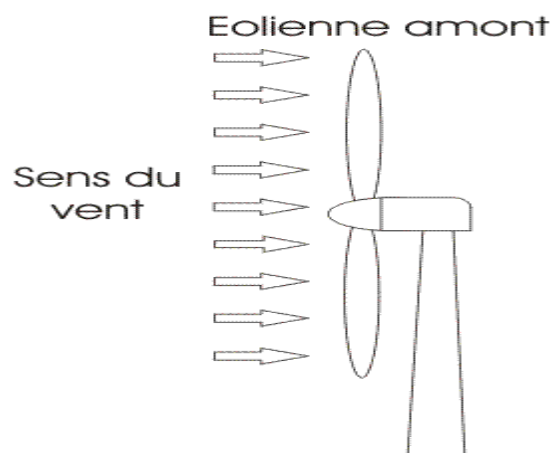


Figure : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

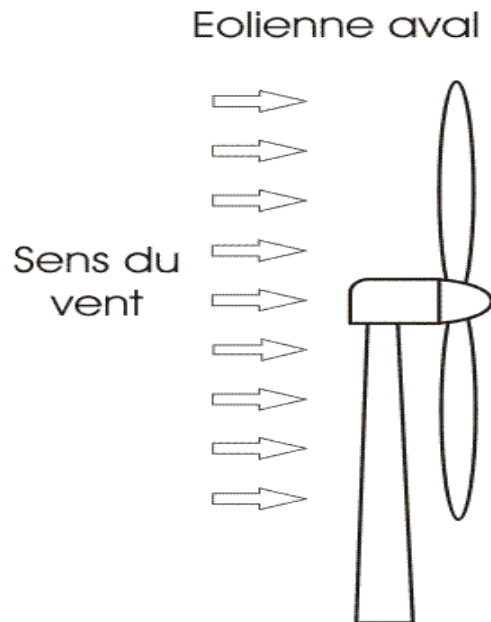


Figure : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval.

6.2. L'éolienne verticale est pour l'heure le type d'éolienne le moins répandu. Cependant, son rendement égal voire supérieur à celui d'une éolienne classique, et ses atouts d'intégration au bâti, de fonctionnement même avec un vent faible et d'occupation d'espace moindre, font d'elle une solution très intéressante, notamment pour les éoliennes domestiques.

- **Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

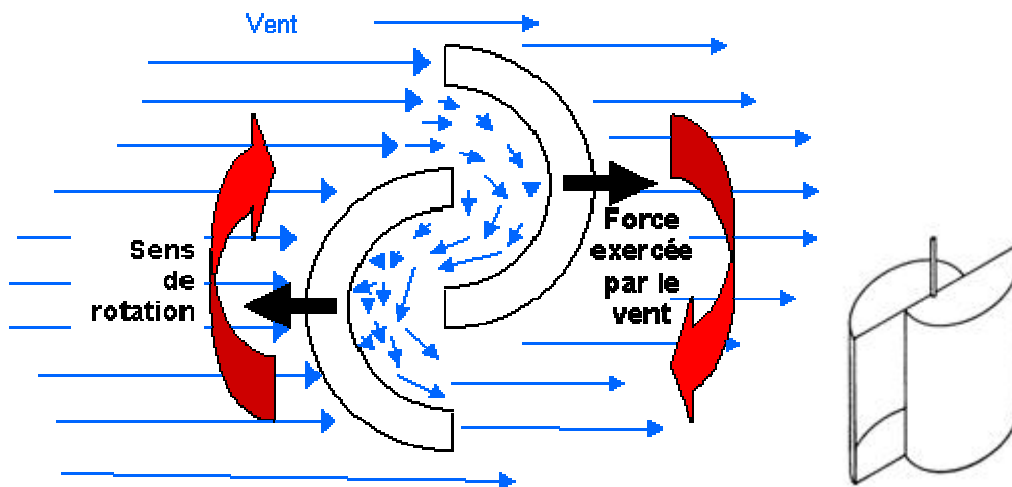


Figure : Rotor de Savonius

- **Le rotor de darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

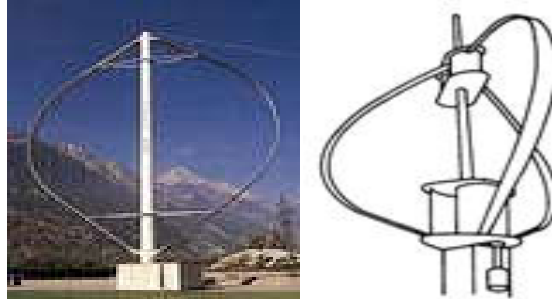


Figure : Rotor de darrieus

Notions de calculs sur les éoliennes

- Puissance récupérable par les pâles

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface S , la puissance associée est donc :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (1)$$

v : la vitesse du vent en m/s

$\rho \sim 1,25 \text{ kg/m}^3$, masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer

S : la surface d'air en m^2 balayée par les pales

- Coefficient de puissance C_p

Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme le rapport suivant :

$$C_p = \frac{\text{Puissance disponible sur l'arbre}}{\text{Puissance disponible (récupérable)}} \quad (2)$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance P :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3)$$

- Variation de vitesse du vent v en fonction de la hauteur h

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (4)$$

V : vitesse en m/s à la hauteur h 0 de référence au-dessus du sol

α : coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4

La puissance d'une éolienne est aussi en fonction de la hauteur du mât, la figure donne un aperçu sur l'évolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa hauteur et du diamètre balayé.

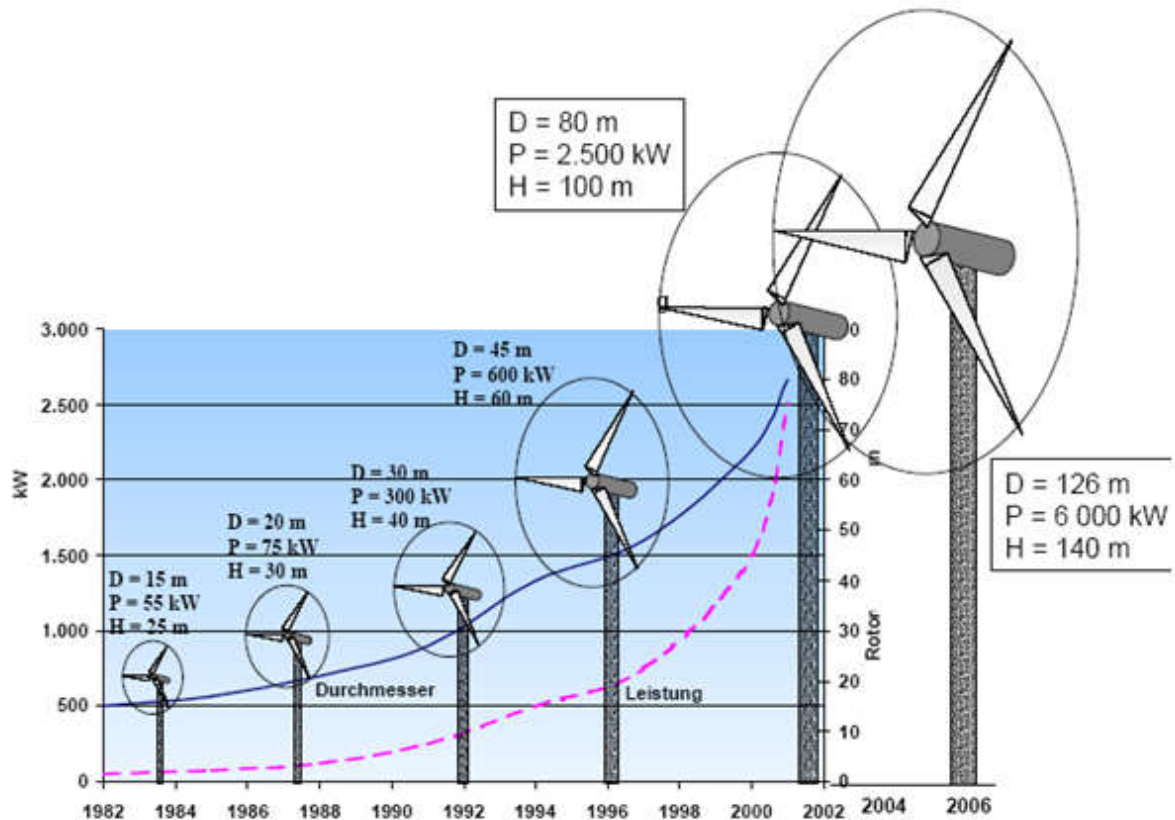


Figure : Tailles des éoliennes et puissance associée.

L'utilisation

L'énergie éolienne peut être utilisée de trois manières :

- **Conservation de l'énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **Transformation en force motrice** (pompage de liquides, compression de fluides...);

Et surtout celle qui nous intéresse plus particulièrement ici :

- **La production d'énergie électrique :** l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

A la lumière des fondements de la première section, certains avantages et inconvénients peuvent être mis en évidence.

Avantages de l'énergie éolienne

Parmi les avantages de l'énergie éolienne nous pouvons citer les suivants :

- Énergie renouvelable
- Disponible toute l'année
- Installation démontable
- Technologie bien maîtrisée
- Sans déchet et sans risque majeur

Inconvénients d'énergie éolienne:

- Impact sur le paysage
- Seulement si le vent souffle
- Installation à durée de vie limitée (20-30 ans)
- Rendement moyen (20-60%)

Chapitre 4. Exploitation d'autres sources renouvelables : hydraulique, géothermique, biomasse ...

L'énergie hydraulique

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

Du point de vue de la mécanique, l'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.

L'énergie hydraulique est issue du cycle de l'eau continuellement reproduit grâce au rayonnement solaire. Il s'agit donc bien d'une énergie renouvelable.

Histoire de l'énergie hydraulique

Les hommes de l'Antiquité se sont assez peu intéressés à l'énergie hydraulique. Le climat méditerranéen s'y prête peu : rares sont les cours d'eau ayant un débit constant et les aqueducs sont une solution très coûteuse. La principale machine utilisant la force du courant comme source d'énergie durant l'Antiquité est la noria. Il s'agit d'une grande roue à ailettes installée sur un cours d'eau et actionnée par le courant. Un chapelet de godets fixés à cette roue élève et déverse l'eau dans un aqueduc associé qui la distribue. La noria serait apparue chez les Romains au I^{er} siècle avant Jésus-Christ.



Figure : Noria à Hama en Syrie

Les premiers moulins à eau construits par les Grecs vers 300-250 avant Jésus-Christ se composaient d'une roue motrice horizontale plongée dans le courant d'eau. L'arbre de la roue se prolongeait verticalement en hauteur, traversait la meule dormante et entraînait la meule courante placée audessus. De petite dimension et à usage domestique, ce type de moulin fut utilisé à travers l'Europe jusqu'à la fin du Moyen Âge.

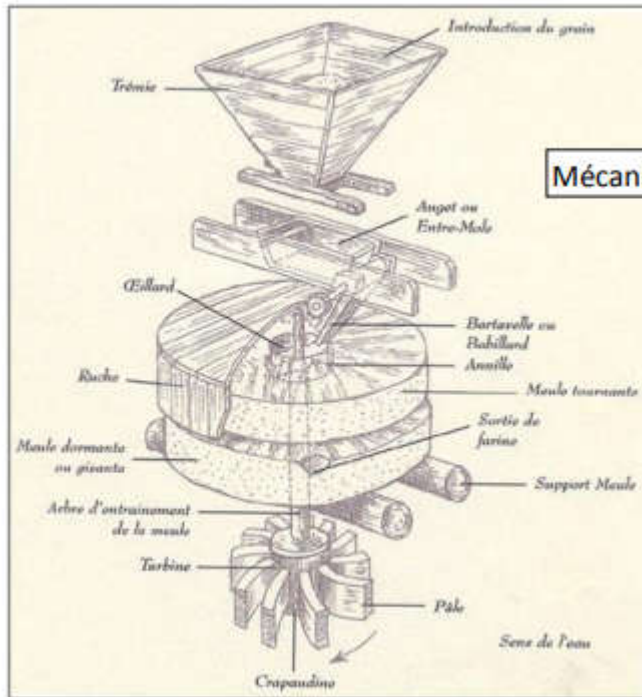


Figure : mécanisme des moulins à eau à roue verticale

Le moulin à eau à roue verticale est quant à lui, apparu en 240 avant Jésus-Christ : il nécessite l'utilisation d'un mécanisme d'engrenages, beaucoup plus complexe que celui des moulins à roue horizontale. La plus ancienne machine à eau connue utilisant un système bielle manivelle est représenté sur un bas-relief du III^e siècle de notre ère, à Hiéropolis en Turquie. Elle actionnait une paire de scies destinées à couper de la pierre. Il s'agit cependant probablement d'un cas particulier. Le système bielle manivelle ne connaîtra un réel essor qu'à la Renaissance.

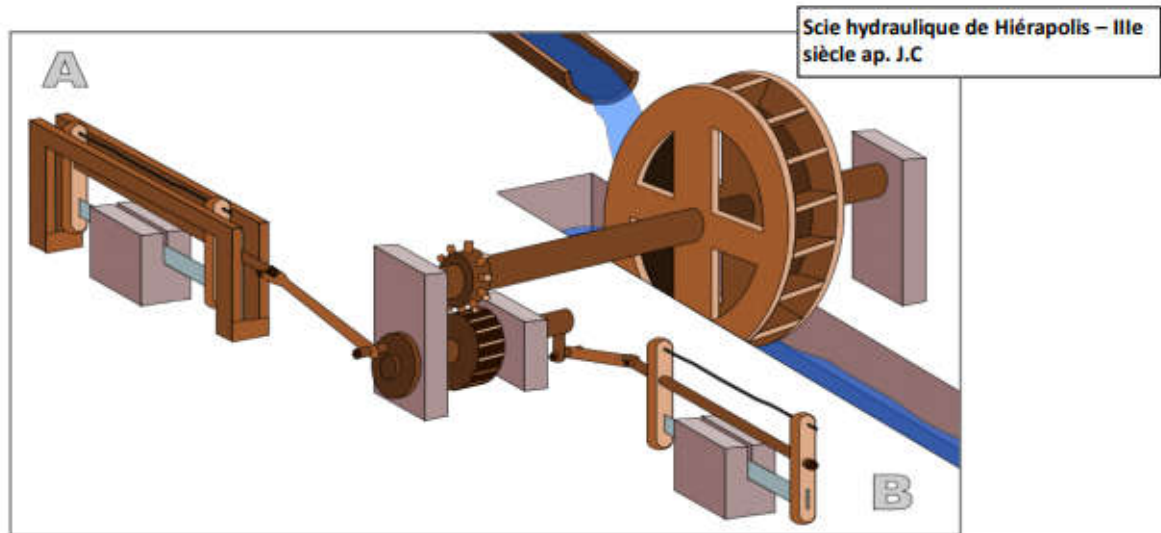


Figure : Scie hydraulique de Hiérapolis

- **Les moulins à eau**

Les moulins à eau étaient très rares et de taille modeste durant l'Antiquité. Ils vont se multiplier et se perfectionner dans le courant du Moyen Âge. En effet, ce type de machine permet une productivité bien plus grande que celle fournie par les meules antiques actionnées par des esclaves : chaque moulin à eau peut moudre 150 kg de blé à l'heure ce qui correspond à peu près au travail de 40 personnes.



Figure : Moulin à eau avec sa roue à aubes

À l'origine, ils servent essentiellement à moudre les grains, presser les olives, broyer les noix ou les raisins, voire les minéraux... Ils vont être adaptés à des activités industrielles proprement dites grâce à l'introduction d'un mécanisme intermédiaire révolutionnaire, l'arbre à cames : ce dispositif transforme en effet le mouvement circulaire continu de la roue motrice en un mouvement rectiligne et alternatif.

- **Les centrales hydro-électriques**

Ce n'est qu'au cours du XIX^e siècle que les roues à aubes sont utilisées pour produire de l'électricité. À la fin du siècle, la turbine remplacera la roue hydraulique et les premiers barrages feront leur apparition.

En effet, au XIX^e siècle Benoist de Fourneyron (1802-1867) invente la première turbine. Il utilise l'effet de la pression pour entraîner une roue à eau. Il commence en 1827 avec une première turbine aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté. La hauteur de chute de 1,4m génère une puissance de 4,5 kW avec 60 tours par minute. Quelques années plus tard, en 1837, en Allemagne, il équipe une chute de 112 mètres avec une turbine de 55 cm de diamètre et atteint une puissance de 45 kW pour une vitesse de rotation de 2300 tours par minute.

Plus tard, l'apparition des dynamos et des alternateurs mis au point par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) entre 1869 et 1877 permettront de produire industriellement de l'électricité et de la transporter sur de longues distances.

L'hydroélectricité va connaître ensuite un développement spectaculaire. Ainsi, entre 1920 et 1940, plus de cinquante barrages sont édifiés.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydroélectricité est la seule à être exploitée à grande échelle, et ceci dans le monde entier. En effet, elle représente 16 % de la production électrique mondiale contre 67 % pour les combustibles fossiles (charbon, pétrole, etc.), 17 % pour le nucléaire et 0,3 % pour les centrales géothermiques.

Actuellement, la Belgique est équipée d'un parc d'une cinquantaine de centrales hydroélectriques dont la puissance installée totale est d'environ 100 MW.

Les différents types de centrales hydroélectriques

Il existe différents types de centrales hydroélectriques en fonction de la hauteur de la chute d'eau et du volume de la réserve d'eau :

- **les centrales gravitaires** qui mettent à profit l'écoulement de l'eau au long d'une dénivellation du sol. On distingue les usines de lac (plus de 300 m de chute), les usines d'écluse (entre 25 et 300 m) et les usines au fil de l'eau (moins de 25 m).
- **les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage** qui en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.
- les usines marémotrices au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques : L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Ę hauteur de la chute,
- Ę débit de la chute.

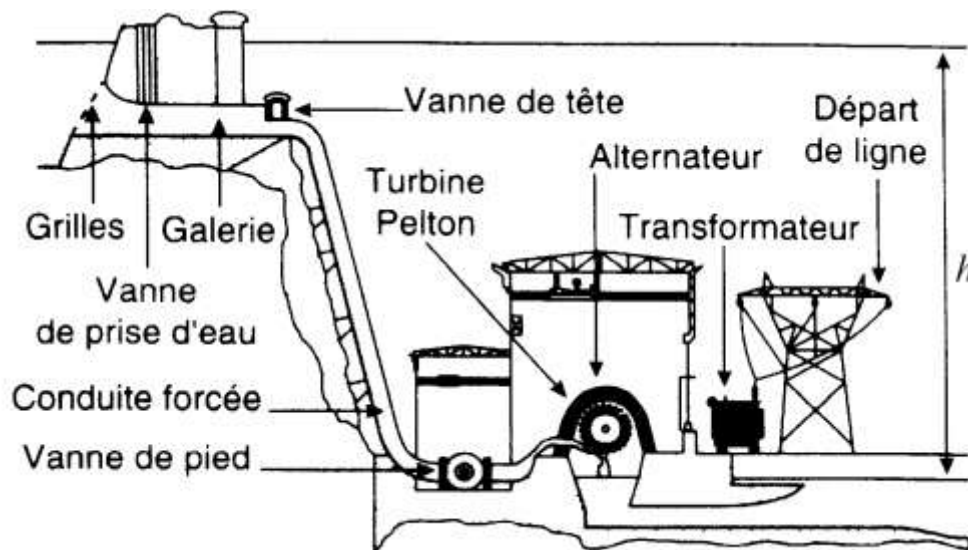


Figure 5 : Schéma fonctionnelle d'une centrale hydraulique

La définition de l'énergie potentielle est

$$W = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Avec :

W : énergie potentielle en Joules

[J] m : masse de l'eau en Kilogrammes [Kg]

g : accélération de la pesanteur en mètres/secondes² [m/s²]

h : hauteur de la chute d'eau en mètres, [m]

La définition de la puissance est :

$$P = \frac{W}{t} \quad (2)$$

Avec : P : puissance utile de la chute d'eau en Watt, [W]

t : durée en secondes [s]

On peut alors calculer la puissance d'une chute d'eau en fonction de sa hauteur et de son débit:

$$P = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t} \quad (3)$$

Avec :

ρ : Masse volumique en Kilogrammes/mètres³, [Kg/m³]

V : Volume en mètres cube, [m³]

Ce qui donnera au final :

$$P = Q \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Avec :

Q : Débit de la chute d'eau en mètres³ /secondes, (m³ /s)

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit Q.h doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies.

Les différents types de barrages

Il existe différents types de barrages:

Barrage poids Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau.



Figure : Barrage de Vassivière

Barrage à contreforts Le barrage à contreforts reporte la poussée de l'eau sur les fondations inférieures et sur les rives.



Figure : Barrage de Grandval

Barrage en voûte La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement (on la qualifie alors de voûte à double courbure).

Ces énormes structures ne constituent que la partie supérieure d'un barrage hydroélectrique. Dans les sous-sols, se trouvent les turbines et les alternateurs.



Figure : Barrage de Luzège

Les turbines

Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie du flux d'eau en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs.

Le type de turbine utilisé dépend de la hauteur de la chute d'eau :

- pour les très faibles hauteurs de chute (1 à 30 mètres), des turbines à bulbe peuvent être utilisées ;
- pour les faibles chutes (5 à 50 mètres) et les débits importants, la turbine Kaplan est privilégiée : ses pales sont orientables ce qui permet d'ajuster la puissance de la turbine à la hauteur de chute en conservant un bon rendement ;
- la turbine Francis est utilisée pour les moyennes chutes (40 à 600 mètres) et moyen débit. L'eau entre par la périphérie des pales et est évacuée en leur centre ;

- la turbine Pelton est adaptée aux hautes chutes (200 à 1 800 mètres) et faible débit. Elle reçoit l'eau sous très haute pression par l'intermédiaire d'un injecteur (impact dynamique de l'eau sur l'auget).

Pour les petites centrales hydroélectriques, des turbines à prix bas (et dont le rendement est moins bon) et de concepts simples facilitent l'installation de petites unités.

Les avantages et les inconvénients de la production d'électricité hydraulique

Les avantages :

La technologie des microcentrales hydroélectriques est très certainement la mieux maîtrisée de toutes les énergies renouvelables. L'équipement est caractérisé par sa grande robustesse, sa fiabilité et sa longue durée de vie. L'entretien de l'installation est très simple et les frais de fonctionnement sont réduits (quelques % de l'investissement). Il s'agit bien entendu d'une énergie propre dans ce sens qu'elle ne génère, directement, aucune émission nocive et ne nécessite aucun transport.

Les inconvénients:

• Les limites :

La production d'électricité d'une microcentrale est parfois caractérisée par des fluctuations importantes suite à la grande variabilité des débits de certains sites. Les coûts d'investissement peuvent être assez importants pour certaines installations. L'installation d'une microcentrale hydroélectrique nécessite des sites appropriés (cours d'eau et chute)

• Impacts négatifs sur l'environnement:

Une microcentrale mal intégrée dans son environnement, peut générer des perturbations de diverses natures. L'atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée. Le bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse, l'alternateur, du transformateur et l'écoulement de l'eau peut provoquer une gêne pour le voisinage proche. La prise d'eau peut entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières. Dans la partie court-circuitée de la rivière, une eutrophisation du milieu aquatique ainsi qu'une modification et une perturbation de la faune peuvent être observées. L'installation peut constituer un obstacle aux migrations des poissons.

Solutions d'accompagnement :

Si la microcentrale est bien conçue, la plupart des atteintes à l'environnement peuvent être minimisées. En assurant le respect du débit réservé. Par la mise en place de passes à poissons. En veillant à l'intégration de la microcentrale dans le paysage. En outre, au niveau de l'entretien des cours d'eau, le dégrilleur peut jouer un rôle non négligeable en éliminant les éléments flottants.

L'énergie géothermique

Introduction : La géothermie, comme le fait deviner son étymologie, est l'énergie contenue dans la terre. C'est une énergie utilisée depuis des siècles notamment avec les thermes gallo-romains. Ce n'est cependant pas l'énergie la plus ancienne apprivoisée par l'homme puisque la première est incontestablement l'énergie de la biomasse, avec la maîtrise du feu.

On distingue 3 types de géothermie:

- La géothermie très basse énergie exploite des eaux à moins de 30°, ou directement l'énergie contenue dans les roches. (système lié à une pompe à chaleur)
- La géothermie basse énergie utilise de l'eau entre 30 et 100°
- La géothermie haute énergie utilise de l'eau ou de la vapeur à plus de 100°, jusqu'à 250°. Elle permet de produire de l'électricité.

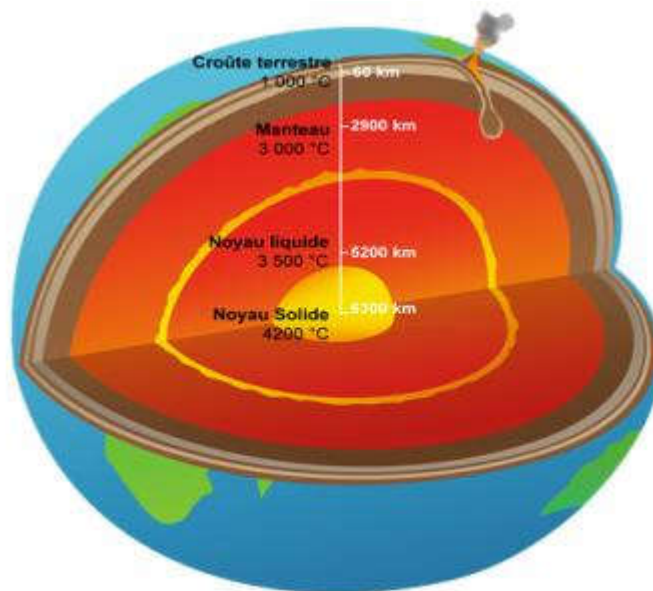


Figure : Coupe du globe terrestre

Les différents types de géothermie

La géothermie très basse température

La géothermie basse température provient de l'énergie solaire. En effet, c'est le rayonnement solaire qui chauffe les premiers mètres sous Terre. La terre a un fort pouvoir d'inertie, la température sous terre est donc plus constante qu'à sa surface, à savoir entre 10 et 20°C selon la saison (environ 14°C de moyenne) à 1m de profondeur.

Captage horizontal

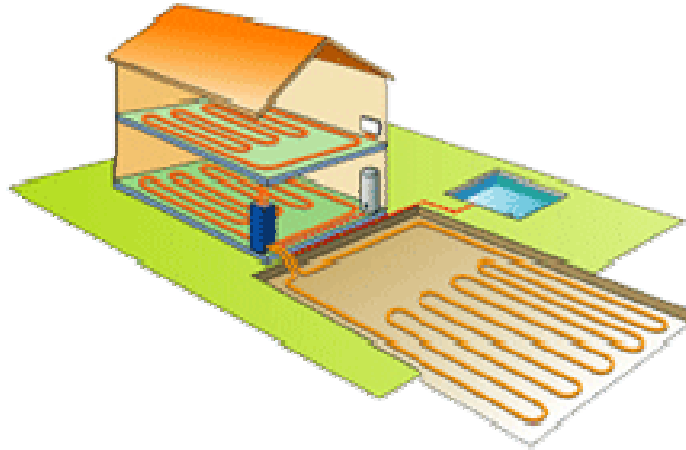


Figure : Géothermie par captage horizontal.

C'est le type de captage le plus courant puisque le moins coûteux. En effet, le captage horizontal consiste à placer des tubes entre 80cm et 1,2m de la surface. A cette profondeur, la température est assez stable et ne varie que pendant les saisons entre 10 et 20°C. Si les travaux sont effectués lors de la construction de la maison, cela peut avoir un coût très faible puisque les engins sont déjà sur place. On considère qu'il faut entre 1,5 et 2 fois la surface de la maison pour chauffer convenablement. S'il est possible de planter des choses à la surface (fleurs, pelouse), les arbres et les terrasses sont eux à proscrire au-dessus des tubes. Cette technique possède un inconvénient majeur : si les tubes ne sont pas assez enterrés et/ou que les besoins en chauffage sont trop grands pour la surface de captage, la température de la terre risque de chuter jusqu'à faire geler la surface, tuant par la même tout ce que vous auriez pu planter au-dessus, y compris la pelouse.

Captage vertical

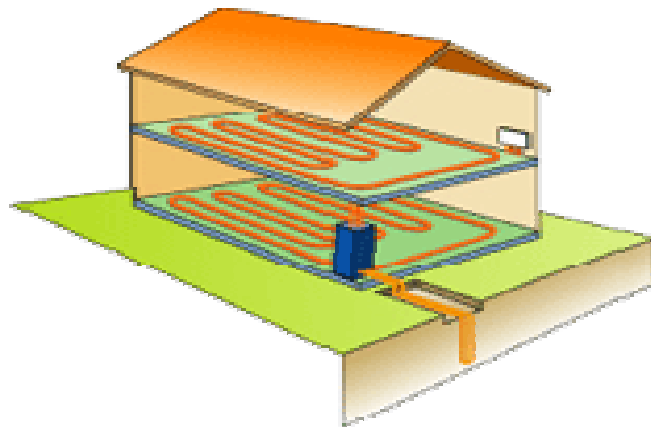


Figure: Géothermie par captage vertical.

Cette technologie requiert deux sondes de 15 à 100m de profondeur. A cette profondeur, la température est beaucoup plus stable qu'avec un captage horizontal. Cependant, les forages coûtent très chers rendant cette solution beaucoup plus coûteuse que la précédente. Les sondes doivent être situées à une dizaine de mètres d'écart minimum. Il est donc possible d'installer ce type de système sur des petites surfaces de terrains. De plus, la surface ne risque pas de geler.

. Captage sur nappe phréatique

Les capteurs géothermiques sur nappes phréatiques, aussi appelés doublets géothermiques fonctionnent à l'aide d'un ou deux forages.

Lorsqu'il n'y a qu'un forage, l'eau est extraite de la nappe avec une pompe puis on récupère ses calories grâce à l'échangeur de la PAC et on rejette l'eau dans un ruisseau ou une rivière (lorsque la réglementation l'autorise). Il n'est en effet pas possible de rejeter l'eau refroidie au même endroit sous peine de refroidir aussi l'eau qui sera pompée, ce qui diminuera sensiblement les performances de l'installation.

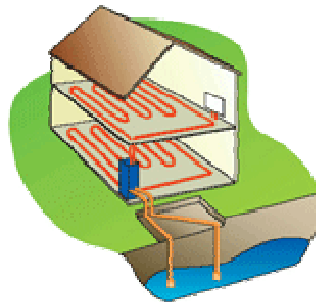


Figure: Géothermie par captage sur eau de nappe.

L'autre solution (la plus courante) consiste à mettre en place une deuxième sonde donnant sur la même nappe phréatique, mais espacée de plusieurs mètres de la première. La température de l'eau pompée sera donc préservée de même que la quantité d'eau souterraine de la nappe qui est une denrée rare.

2.1. 3.1. Principe de la pompe à chaleur géothermique

L'énergie géométrique s'obtient le plus souvent au moyen de pompes à chaleur, voir figure5, principe qui est également utilisé pour les forages profonds dans le cadre de travaux de grande envergure ne concernant pas les particuliers.

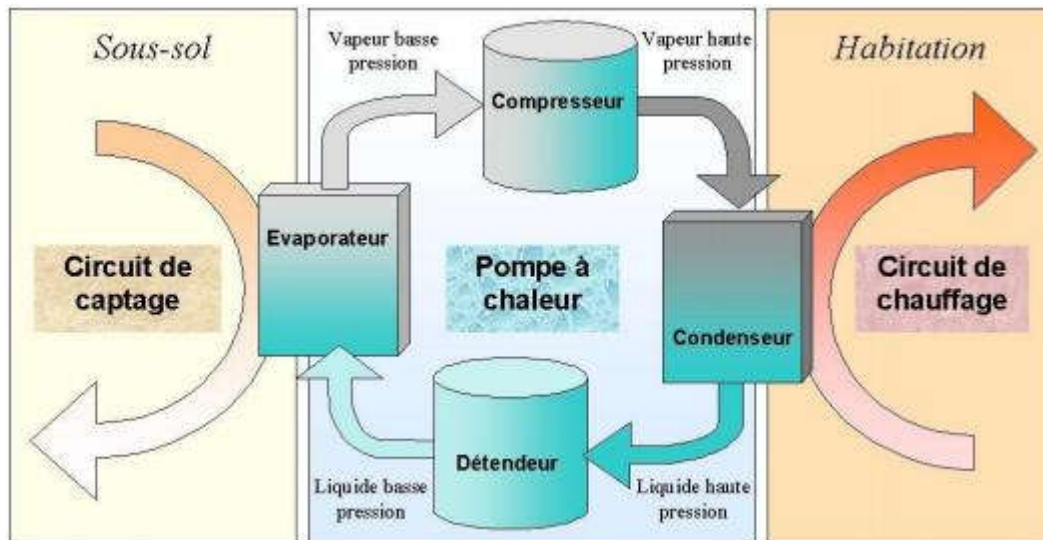


Figure : Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermie

La géothermie basse température

La géothermie basse température se situe à des profondeurs allant de quelques centaines à quelques milliers de profondeur. A cette profondeur, seuls les changements de température saisonnier influe et de façon minime. Vous le savez peut-être, le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est donc grâce à lui que la géothermie basse température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C . Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C . Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

La géothermie basse température se situe entre 30°C et 100°C . Les bassins aquifères sont idéals pour la géothermie basse température, puisque leur gradient de température est faible.

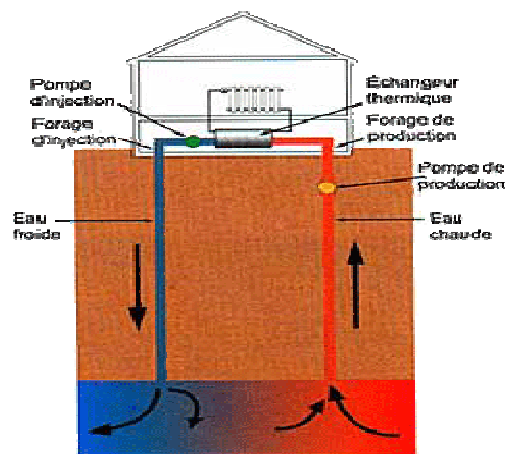


Figure : Le principe du doublet géothermique

La géothermie basse température fonctionne sur le principe du doublet géothermique (capteurs verticaux sur nappe phréatiques). La température de l'eau est assez élevée pour se passer d'une pompe à chaleur. Il est en effet possible de chauffer directement des logements avec cette température via des réseaux de chaleur.

Beaucoup l'ignorent mais le plus grand réseau de chaleur (de France) se situe à Paris et fonctionne justement avec la géothermie basse température. D'autres réseaux de chaleur fonctionnent en effet avec des chaudières à biomasse ou encore grâce à des usines d'incinération de déchets.

La géothermie haute/moyenne température

Le noyau de la Terre est un énorme amas de magma extrêmement chaud. C'est grâce à lui que la géothermie haute température existe. Une notion très importante est la notion de gradient de température. On estime ainsi que pour chaque kilomètre plus près du centre de la Terre, on gagne 3°C . Un gradient de température est la distance qu'il faut pour augmenter de 1°C . Il faut également savoir que selon le type de sous-sol, le gradient de température sera différent. C'est-à-dire qu'entre deux zones différentes, à la même profondeur, la température sera différente.

Cette technologie nécessite des sols particuliers où la température est naturellement élevée ($>150^{\circ}\text{C}$), c'est le cas notamment des zones volcaniques où la température de sous-sol peut augmenter de $1000^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

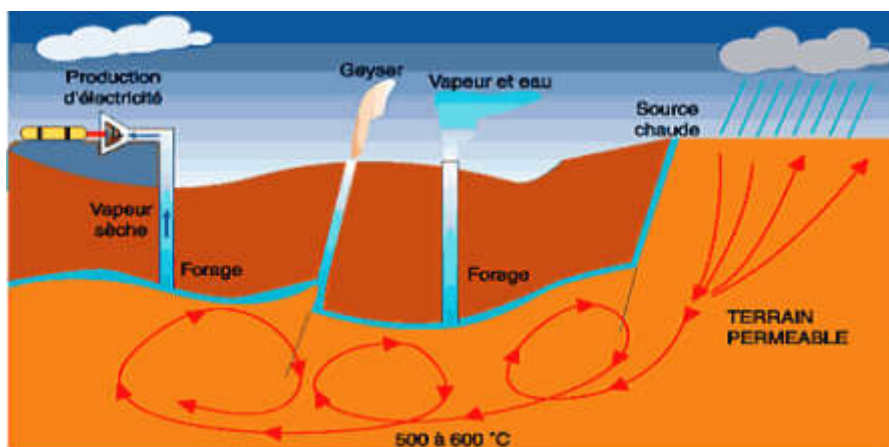


Figure : Principe l'exploitation énergie géothermique

La géothermie haute température consiste là encore à un doublet géothermique. A ces profondeurs, l'eau pompée est supérieure à 200°C .

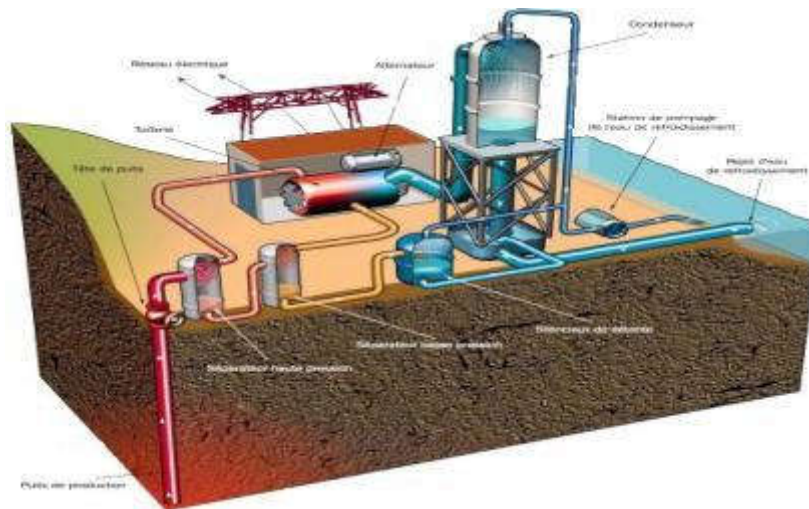


Figure.: Schéma d'une installation-type de géothermie

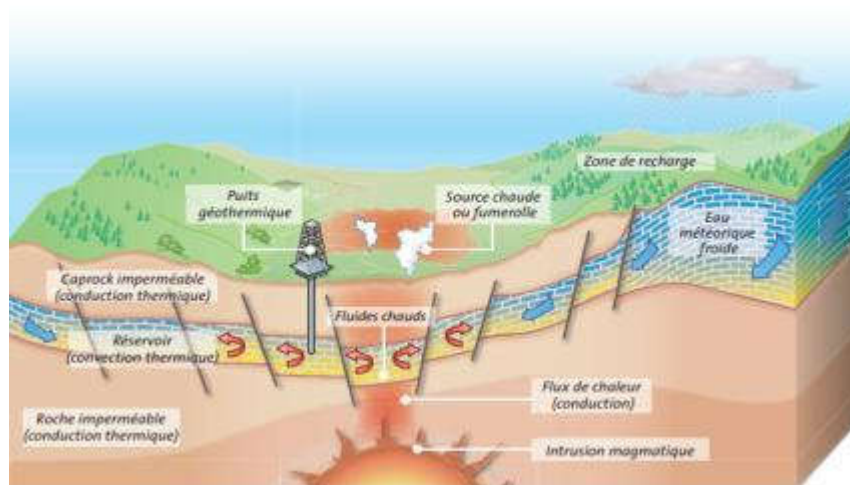


Figure. : Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante

Les différentes applications de la géothermie suivant la température

Tableau 1. Les différentes applications de la géothermie

Type de géothermie	Température en °C	Domaines d'utilisation	
Haute énergie	200 et plus		Production d'électricité par la méthode conventionnelle
	190	Réfrigération par absorption	
	180	Préparation de pâte à papier	
	170	Fabrication d'eau lourde	
	160	Séchage de poisson et de bois	
	150	Fabrication d'alumine	
Moyenne énergie	140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
	130	Evaporation	
	120	Production d'eau douce par distillation	
	110	Séchage de parpaings de ciment	
	100	Séchage de légumes	
	90	Déshydratation	
Basse énergie	80	Chauffage urbain – chauffage de serres	
	70	Réfrigération	
	60	Elevage d'animaux	
	50	Balnéothérapie	
	40	Chauffage de sols	
Très basse énergie	30	Piscine, fermentation	
	20	Pisciculture	

La production d'électricité géothermique : La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniaque) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

La disponibilité des ressources géothermiques : Cette chaleur est variable selon les zones. À la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données). Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de

certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m²/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle) ;
- Des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur ;
- La circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.

L'énergie biomasse

Définition et catégories

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

2. Fonctionnement technique ou scientifique

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- de la chaleur ;
- de l'électricité ;
- une force motrice de déplacement.

Procédés de valorisation de la biomasse : On distingue trois procédés de valorisation de la biomasse : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

1. La voie sèche

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse :

- **la combustion** produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération ;
- la gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste en une réaction entre le carbone issu de la biomasse et des gaz réactants (la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification ;
- la pyrolyse est la décomposition de la matière carbonée sous l'action de la chaleur. Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. Une variante de la pyrolyse, la thermolyse, est

développée actuellement pour le traitement des déchets organiques ménagers ou des biomasses contaminées.

2. La voie humide

La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques ;
- **le digestat** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable.

3. La production de biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction :

- entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel ;
- à partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol.

Il existe 3 générations de biocarburants :

- **1^{ère} génération** : biocarburants créés à partir des graines ;
- **2^e génération** : biocarburants créés à partir des résidus non alimentaires des cultures (paille, tiges, bois) ;
- **3^e génération** : biocarburants créés à partir d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

Les biocarburants de 2^e et 3^e génération ont entre autres pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme. Leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3^e génération, reste à établir.

Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes :

- des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel) ;
- de l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl ether).

La valorisation de la biomasse ne produit toutefois pas que des biocarburants.

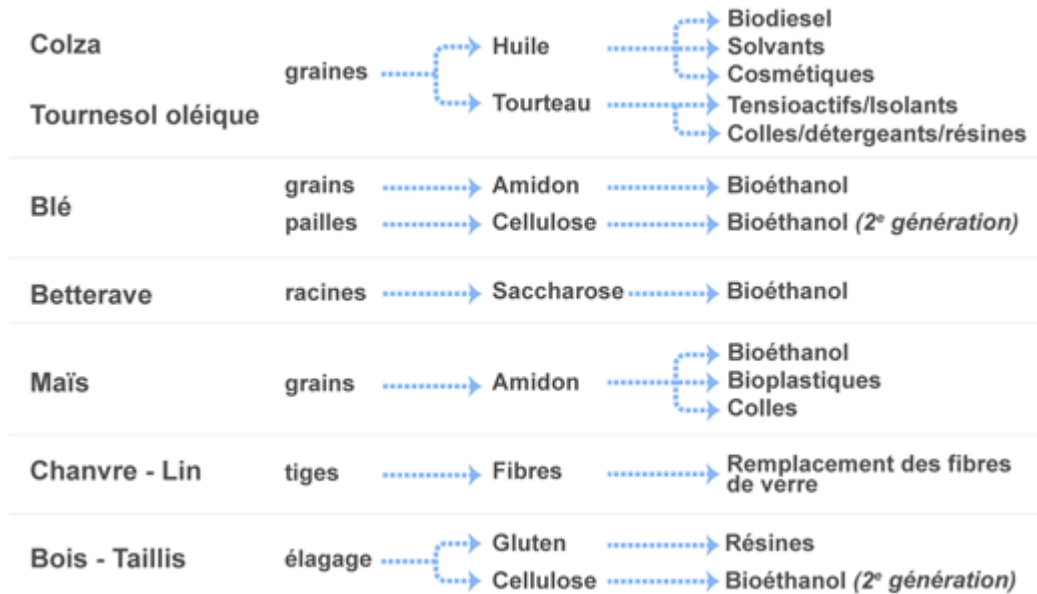


Figure 1 : Voies de valorisation de la biomasse

Enjeux par rapport à l'énergie

- **Une énergie naturelle et propre**

La valorisation énergétique de la biomasse peut permettre d'augmenter la part des énergies renouvelables dans un mix énergétique et de réduire la dépendance au pétrole ou au gaz. La diversité des matières organiques constituant la biomasse permet à de nombreux pays d'avoir accès à cette ressource. Elle peut donc favoriser leur indépendance énergétique.

De plus, la biomasse participe à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre dans la mesure où le CO₂ dégagé par la combustion des bioénergies est compensé par le CO₂ absorbé par les végétaux lors de leur croissance. La récupération du biogaz dans les décharges permet de capter le méthane issu de la biomasse (dont l'effet de serre est considéré comme 21 fois plus fort que le CO₂).

- **Une énergie renouvelable si son utilisation est maîtrisée**

L'utilisation de la biomasse peut dans certains cas engendrer des déséquilibres environnementaux. L'amalgame entre énergie propre et énergie renouvelable est fréquent. Il est important de préciser que la biomasse ne peut être considérée comme une énergie renouvelable que si elle est renouvelée.

- **Les biocarburants en débat**

La concession de parcelles à l'industrie des biocarburants a réduit la taille des terres agricoles destinées à l'alimentation. Certains experts craignent que l'essor des biocarburants déclenche une crise alimentaire mondiale, en particulier dans le contexte d'une forte croissance démographique terrestre (plus de 100 millions d'individus en plus par an). Après en avoir fait l'éloge, certains médias et ONG ont opté pour des campagnes de dénigrement et de désinformation globale à l'égard des biocarburants en omettant de souligner les différences propres à chaque génération.

Zone de présence ou d'application

Hors consommation domestique, les principaux pays dans le monde ayant recours à la biomasse sont le Brésil, les États-Unis et l'Inde.

La biomasse et les déchets constituent 67,6 % de la production primaire d'énergie renouvelable dans l'Union européenne en 2010.

Chapitre 5. Stockage, pile à combustibles et hydrogène

Introduction : Stockage de l'énergie solaire lorsque vous avez beaucoup pour l'utiliser, quand vous en avez besoin d'une nécessité. Le stockage permet de différer une utilisation de l'énergie par rapport à sa production, en évitant ainsi qu'à chaque instant la demande et l'offre soient égales. On peut stocker de l'électricité ou de la chaleur. Il existe de nombreuses technologies de stockage. Dans ce cours, nous allons en décrire quelques unes.

Historique

L'effet pile à combustible est découvert par l'Allemand Christian Schönbein en 1839. Le premier modèle de laboratoire de pile à combustible est réalisé par William R. Grove sur les trois années suivantes. En 1889, Ludwig Mond et Carl Langer donnent à la pile à combustible son nom et sa forme actuelle¹. Francis T. Bacon reprend les études de la pile à combustible en 1932 et réalise un premier prototype de 1 kW en 1953, puis de 5 kW en 1959. Ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo.

Le très long écart de temps (plus d'un siècle) qui s'est écoulé entre la réalisation du premier modèle de pile à combustible et les premières utilisations s'explique par le très fort développement qu'ont connu les autres types de générateurs d'énergie électrique et par le fait que le coût des matériaux utilisés dans la pile à combustible reste encore actuellement élevé.

Généralités

Une pile à combustible est un générateur dans lequel la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple dihydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est généralement du platine. Si d'autres combinaisons sont possibles, la pile la plus couramment étudiée et utilisée est la pile dihydrogène-dioxygène ou dihydrogène-air (ceci s'expliquant notamment par l'abondance des ressources en hydrogène sur Terre et la facilité de production du dihydrogène).

Évolutions techniques.

Depuis 1977, certaines piles (utilisées sur les satellites) contiennent des membranes en polymères (électrolyte solide acide ou alcalin) rendus conducteurs, prenant la forme d'une fine membrane séparant les deux électrodes. Ces polymères contiennent du platine. S'agissant

d'un métal rare, polluant et coûteux, on lui cherche donc des alternatives ; on teste, par exemple en Chine, un polymère (polysulfone ou polysulfone à ammonium quaternaire) avec une cathode (côté oxygène) en argent et une anode (côté hydrogène) en nickel plaquée de chrome.



En 2010, des chercheurs américains et des chercheurs allemands ont proposé d'intégrer un catalyseur supplémentaire, moins coûteux et qui pourrait diviser par deux la quantité de platine des piles à combustible Nature Chemistry ; il s'agit de nanosphères construites avec des atomes de platine et de cuivre, dont les particules de cuivre sont par la suite en partie extraites, laissant une sorte de nanocoquille de platine de quelques atomes d'épaisseur. La méthode de production de ces nanosphères est telle qu'elle diminue leur capacité de fixation de l'oxygène, ce qui favorise la formation d'eau en rendant la pile plus productive. Selon cette équipe cela pourrait réduire de 80 % le prix des piles à combustible. Ce procédé pourrait être appliqué à d'autres métaux pour produire d'autres types de catalyseurs pouvant par exemple permettre une production d'hydrogène et d'oxygène à partir d'eau comme stockage chimique de l'énergie électrique produite par des éoliennes ou des panneaux solaires, avant de la restituer sous forme d'électricité.

En 2012, la société israélienne CellEra a déclaré avoir conçu une technologie de pile à combustible à membrane qui n'utilise pas de platine, à l'aide d'un électrolyte polymère solide qui conduit des ions hydroxyde (HO^-) en milieu alcalin. Cette société a déposé dix brevets concernant cette technologie.

Pile à combustible à hydrogène

Le fonctionnement d'une pile dihydrogène-dioxygène est particulièrement propre puisqu'il ne produit que de l'eau et consomme uniquement des gaz. Mais jusqu'en 2010, la fabrication de

ces piles était très coûteuse, notamment à cause de la quantité non négligeable de platine nécessaire et au coût des membranes échangeuses d'ions.

Sources et modes de stockage pour l'hydrogène

La synthèse, le stockage et l'approvisionnement en dihydrogène sont une partie du défi à relever car sur Terre, l'hydrogène est abondant, mais toujours combiné à de l'oxygène (H₂O, c'est-à-dire l'eau), du soufre (sulfure d'hydrogène, H₂S), du carbone (combustibles fossiles de types gaz naturel ou pétrole), etc.

- Le dihydrogène peut être produit en décomposant de l'eau, du méthane ou du bois/gazogène (durant deux ans le projet « Epilog » a testé avec succès des piles à combustible au gaz naturel à Forbach), par voie thermique ou électrochimique (électrolyse de l'eau). Produire de l'hydrogène nécessite une source d'énergie renouvelable (comme l'hydroélectrique, le solaire, l'éolien), de l'électricité nucléaire ou des combustibles fossiles.
- Le dihydrogène peut être stocké et transporté :
 - par voie gazeuse : comprimé dans des bouteilles ou des réservoirs (pression en général de 350, 550 ou 700 bar) ;
 - par voie solide : combiné dans des hydrures métalliques ;
 - par voie liquide : liquéfié (filiale abandonnée pour la mobilité) ou combiné chimiquement sous forme de méthanol ou de méthane qui seront ensuite transformés pour libérer du dihydrogène.
 - potentiellement dans des nanotubes de carbone.

Rendements globaux

Un groupe électrogène permet un rendement de 25 % et une pile à hydrogène peut atteindre 50 à 60 % (voire beaucoup plus avec la récupération de chaleur), mais les rendements énergétiques cumulés de la synthèse du dihydrogène et de la compression ou liquéfaction sont encore assez faibles. Ici, le dihydrogène n'est pas une source d'énergie primaire ; c'est un vecteur d'énergie.

Principe de fonctionnement

Le principe de la pile à combustible est l'inverse d'une électrolyse. La réaction chimique produite par l'oxydation et la rencontre de gaz produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Le fonctionnement de la pile à combustible nécessite un approvisionnement en combustible,

le plus utilisé étant l'hydrogène. Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 V¹³, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 1 050 °C selon les modèles¹. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.

Il existe plusieurs types de piles à combustible dont les plus connues sont :

la pile à membrane échangeuse de protons ;

la pile à oxyde solide.

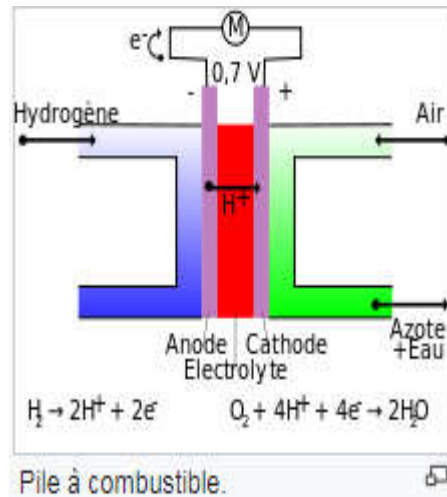
Pile à membrane échangeuse de protons

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte :

- deux plaques bipolaires :
 1. une pour distribuer l'hydrogène,
 2. une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau ;
- deux électrodes : une anode et une cathode pour faire circuler le courant électrique (électrons) ;
- une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte : elle bloque le passage des électrons et laisse passer les ions H⁺ ;
- des catalyseurs (platine) qui accélèrent les réactions entre les gaz.

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un reformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire à gauche sur la figure. Arrivé à l'anode, le dihydrogène (H₂) se dissocie (oxydation) en ions H⁺ et en électrons selon : $2\text{H}_2 = 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Les ions traversent alors la membrane, mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va générer un courant électrique.

À la cathode, les ions hydrogène, les électrons, et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon la réaction : $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$. L'eau et le dioxygène passent par la plaque bipolaire droite. Cette réaction va produire également de la chaleur pouvant être récupérée.



Pile à oxyde solide

Le principe est similaire. La seule différence est que la membrane échangeuse de protons est remplacée par une autre membrane appelée « membrane à oxyde solide ». Les molécules dans la pile à combustible ne vont alors pas réagir de la même façon :

- dans un premier temps, le dihydrogène entre par la plaque bipolaire à gauche sur la figure, et arrive sur l'anode ;
- là, le dihydrogène se dissocie : $2\text{H}_2 = 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (jusque-là, aucun changement) ;
- les électrons (e^-) empruntent un circuit extérieur, mais les ions H^+ (protons), au lieu de traverser la membrane, restent sur l'électrode ;
- après avoir traversé les dipôles, les électrons rejoignent la cathode chargée en dioxygène. Chaque molécule de dioxygène va fixer quatre électrons pour donner deux atomes doublement négatifs d'oxygène selon : $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}_2^-$;
- les ions O_2^- traversent la membrane et se combinent avec les protons H^+ pour former de l'eau : $4\text{H}^+ + 2\text{O}_2^- = 2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$.

Mais ce type de pile n'est pas plus performant que la pile à membrane échangeuse de protons, elle ne fonctionne qu'à très haute température (autour de 600 à 800 °C) et sa fabrication coûte plus cher pour des piles de faible puissance. Elles sont donc réservées à des applications spécifiques nécessitant une forte puissance.

Pile à combustible au méthanol

Il existe deux types de piles à combustible au méthanol :

- les piles RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est reformé pour produire l'hydrogène qui alimentera la pile ;

- les piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) : dans ces piles, le méthanol est directement oxydé dans le cœur de la pile et ne nécessite pas d'être reformé.

Contrairement aux piles utilisant l'hydrogène, celles-ci ne sont pas « propres » car elles rejettent du CO₂ et même du CO.

Les différentes techniques de piles à combustible

Tableau récapitulatif des différentes techniques de piles à combustible									
Type	Électrolyte	Ions en œuvre	Gaz/liquide à l'anode	Gaz à la cathode	Puissance	Température de fonctionnement	Rendement électrique	Maturité	Domaine
AFC - Alcaline	Hydroxyde de potassium	HO ⁻	dihydrogène	dioxygène	10 à 100 kW	60 à 90 °C	Pile seule : 60-70 % Système : 62 %	Commercialisé/ Développement	Portable, transport
DBFC - Hydru de de bore direct	Membrane protonique Membrane anionique	H ⁺ HO ⁻	NaBH ₄ liquide	dioxygène	250 mW/cm ²	20 à 80 °C	50 % monocellule	Développement	portable <20 W
PEMFC - à membrane d'échange de protons	Membranes polymère Nafion-PBI	H ⁺	dihydrogène	dioxygène	0,1 à 500 kW	60 à 220 °C	Pile : 50-70 % Système : 30-50 %	Commercialisé/ Développement	portable, transport, stationnaire
DMFC - à méthanol direct	Membrane polymère	H ⁺	méthanol	dioxygène	mW à 100 kW	90 à 120 °C	Pile : 20-30 %	Commercialisé/ Développement	transport, stationnaire
DEFC						90 à 120		Dévelop	

– à éthanol direct						°C		pement	
FAFC – à acide formique						90 à 120 °C		Développement	
PAFC – à acide phosphorique	Acide phosphorique	H ⁺	dihydrogène	dioxygène	jusqu'à 10 MW	environ 200 °C	Pile : 55 % Système : 40 %	Développement	transport, stationnaire
MCFC – à carbonate fondu	Carbonate de métaux alcalins	CO ₃ ²⁻	dihydrogène, Méthane, Gaz de synthèse	dioxygène	jusqu'à 100 MW	environ 650 °C	Pile : 55 % Système : 47 %	Développement/ Mise sur le marché	stationnaire
PCFC – à céramique protonante						700 °C		Développement	
SOFC – à oxyde solide	Céramique	O ²⁻	dihydrogène, Méthane, Gaz de synthèse	dioxygène	jusqu'à 100 MW	800 à 1050 °C	Pile : 60–65 % Système : 55–60 %	Développement	stationnaire

Applications

Les principaux champs d'application sont :

Les transports

Les piles à combustible alimentées à l'hydrogène sont utilisées pour alimenter plusieurs prototypes de voitures électriques et de bus électriques. Il est aussi prévu que des trains pour des lignes ferroviaires non-électrifiées entrent en service d'ici 2018 en Allemagne. Le Land de Basse-Saxe a annoncé en novembre 2017 la commande à Alstom de quatorze trains à pile à combustible, dont la mise en service est attendue pour fin 2020. Trois autres Länder allemands ont signé des lettres d'intention pour un total de soixante rames.

La production d'électricité

Aux États-Unis, le département américain de l'énergie, DOE, soutient le déploiement de systèmes de production électrique, que ce soit pour du secours électrique, de l'alimentation de sites ou de bâtiments, ou des chariots élévateurs électriques.

La cogénération

Des systèmes de cogénérations de petite puissance (mini-cogénération) sont développés, notamment en Europe, et sont à un stade de démonstration.

Cogénération domestique ou micro-cogénération : des appareils de chauffage domestiques intégrant une pile à combustible de 750 W, appelés ENE-FARM, sont commercialisés au Japon depuis 2009.

Plusieurs fabricants européens de micro-cogénérations à pile à combustible testent sur le terrain des prototypes pré-commerciaux dans douze pays européens. En mai 2016, le projet de la Commission européenne ene.field et Pace vise à développer des piles à combustible domestiques pour les particuliers, avec plusieurs marques associées à ce projet. Pace projette en 2017 d'installer en cinq ans à 2 650 exemplaires de micro-cogénérateurs en Europe, avec quatre industriels impliqués afin d'ouvrir un marché (objectif : 800 000 piles à combustible installées par an en 2050 en substitut aux chaudières à condensation).

Les piles à combustible sont envisagées pour alimenter divers appareils nomades, tels que des téléphones ou des ordinateurs portables. La viabilité industrielle se heurte encore à un rendement énergétique global assez faible compte tenu du fait que chaque étape (synthèse de l'hydrogène, séchage du gaz, stockage, vaporisation, rendement des réactions électrochimiques de la pile, circulation des fluides, régulation thermique, maintenance, récupération du platine, etc.) contribue à un rendement global encore décevant. Cependant, en 2009, des chercheurs japonais ont atteint un rendement de 56 % pendant plusieurs centaines d'heures avec une pile de 3 kW (avec en 2017 presque 200 000 unités installées en maisons individuelles). Dans le cadre du projet HiPer-FC (High Performance Fuel Cell) lancé par la NEDO en 2008, un « Centre de recherche sur les nanomatériaux pour les piles à combustible » travaille depuis le 25 août 2009. Les chercheurs (en 2009) y sont japonais mais aussi nord-américains, allemands, français, coréens et chinois.