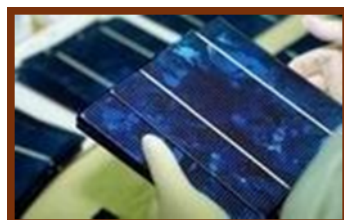


# Tenants et aboutissants de l'énergie solaire



## Table des matières

1	Introduction à l'énergie.....	2
1.1	Les unités utilisées.....	3
1.2	L'énergie sous toutes ses formes.....	4
2	Les énergies.....	5
2.1	Notre situation énergétique.....	5
2.1.1	Contexte énergétique suisse.....	5
2.1.2	Contexte énergétique mondial.....	8
2.2	Un moment-clé.....	9
2.3	Les différentes sources d'énergie.....	10
2.3.1	Les énergies non-renouvelables.....	11
2.3.2	Concept des énergies renouvelables.....	12
3	Pourquoi l'énergie solaire ?.....	17
4	L'énergie solaire.....	22
4.1	L'énergie solaire, quelles technologies ?.....	22
4.1.1	L'énergie solaire passive.....	22
4.1.2	L'énergie solaire thermique.....	23
5	Le solaire photovoltaïque.....	25
5.1	Situation du solaire.....	26
5.1.1	Marché mondial du solaire photovoltaïque.....	26
5.1.2	Potentiel du photovoltaïque en Suisse.....	27
5.2	La cellule photovoltaïque.....	27
5.3	Cellule de Grätzel, concept de l'EPFL.....	32
6	Mise en œuvre du photovoltaïque et ses applications.....	37
6.1	Les applications autonomes.....	37
6.2	Les applications raccordées au réseau.....	38
7	Réflexion personnelle.....	42
	Sources.....	43
	Annexes.....	45

# 1 Introduction à l'énergie

L'énergie n'est pas une notion datant du siècle passé ainsi que du XIXe siècle où les vertus du pétrole furent découvertes. L'énergie est un concept bien plus ancien.

Depuis toujours, l'Homme a été animé par la volonté d'utiliser toutes les ressources de la nature pour rendre sa vie plus facile ou plus agréable. Ces ressources sont notamment ce que nous appelons des sources d'énergie. En raison leur nombre ainsi qu'à leur variété, leurs découvertes ne se sont pas faites en un jour.

Au tout début son évolution, l'Homme ne disposait que de ses muscles et de sa propre force pour assurer sa survie (*énergie musculaire*). Puis vint la découverte d'une première forme d'énergie qui est sans aucun doute le *feu*, d'où l'âge du feu. Les hommes préhistoriques trouvèrent déjà en cette source un moyen pour se chauffer et cuire leur nourriture, la viande par exemple afin de la rendre plus tendre et plus agréable sous la dent. Cette source d'énergie leur permit ensuite de transformer les matériaux afin d'améliorer leurs outils par exemple. Ces derniers lui facilitaient ses tâches quotidiennes.

Lorsque l'Homme commença à domestiquer des animaux, ceux-ci prirent une place considérable dans la vie de l'Homme. Ils le soulagèrent d'une partie de ses efforts : c'est ce qu'on appelle les animaux de trait.

Après avoir exploité sa propre force et celle des bêtes, l'Homme commença à exploiter les énergies contenues dans la nature. Le vent, *énergie éolienne*, pour se déplacer le long du Nil sur un bateau à voile par exemple. A cela s'ajoutent les chutes d'eau et le courant des rivières, *l'énergie hydraulique*, pour effectuer certains travaux. Ces trois dernières formes d'énergie restèrent pendant des siècles la principale source d'énergie mécanique.

Vers la fin du XVIIe, la machine à vapeur fit son apparition et un demi-siècle plus tard elle fut optimisée. Cette invention fut le point de départ de la révolution industrielle. Et notons surtout que c'est à ce moment-là que l'Homme put enfin utiliser la chaleur pour produire du « travail ».

L'Homme a produit, depuis des centaines de milliers d'années, de l'énergie de différentes manières. L'ère industrielle a accéléré le développement de celles-ci. Mais c'est en ces temps que l'énergie est devenue indispensable à presque toutes les activités humaines: le chauffage, l'éclairage, la conservation, les transports et la liste est longue. Le charbon, déjà utilisé pour le chauffage plusieurs siècles avant J.-C., va être massivement extrait lors de la seconde partie du XIXe siècle. A cette époque, le charbon est largement utilisé pour faire fonctionner les machines à vapeurs, les locomotives, par exemple, qui vont faciliter les échanges commerciaux. Les premières usines vont naître pour produire ce combustible en masse.

Le 27 août 1859, le premier derrick<sup>1</sup> fut construit. L'extraction de pétrole brut démarrera au début du XXe siècle. Comme cette énergie offre de multiples avantages, c'est à partir de ce jour que l'industrie du pétrole va lentement se mettre en route. L'« or noir » va ainsi devenir l'énergie la plus importante et la plus convoitée du monde.

---

<sup>1</sup> Un derrick est une charpente métallique qui supporte le trépan d'un puits de pétrole.  
Définition trouvée sous : <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/derrick/>

Enfin, la découverte de la radioactivité naturelle en 1896 a ouvert la voie à la maîtrise de l'atome, qui débouchera après des développements technologiques considérables, sur la bombe atomique puis sur l'utilisation de l'énergie nucléaire de fission. Il s'agit de casser de très gros atomes d'uranium pour libérer de l'énergie. Cette source d'énergie est la plus récente : les premières centrales nucléaires datent en effet des années 1950.

Nous nous retrouvons aujourd'hui avec un bouquet énergétique qui s'est diversifié à travers les siècles. Auparavant nous avons cru au progrès et nous avons continué à consommer sans nous soucier des énergies que nous utilisons. C'est au siècle dernier, en 1973, que la crise pétrolière va engendrer un bouillonnement d'idées, ainsi toutes sortes de technologies de substitution aux énergies fossiles sont envisagées. C'est donc après ce choc pétrolier que les gens ont porté à nouveau leur intérêt sur les énergies plus naturelles et plus anciennes.

## 1.1 Les unités utilisées

Il n'est pas toujours simple de s'y retrouver dans les unités de mesure de l'énergie, car elles dépendent de divers facteurs, tels l'usage dont nous en faisons, des coutumes propres à chaque pays ou des caractéristiques essentielles à chaque énergie. Les unités pour mesurer l'énergie dépendent donc des utilisateurs.

Les scientifiques utilisent en général le joule (J), une petite unité qui mesure le travail nécessaire pour soulever de 10cm une masse de 1kg. La puissance qui produit un joule en une seconde s'appelle le watt (W). Comme le joule est très petit, on utilise souvent dans la vie courante le kilowattheure (kWh), qui vaut 3,6 millions de joules. C'est cette unité que nous retrouvons sur nos factures d'électricité, car il correspond à l'unité de puissance, qui représente le taux de consommation d'énergie par unité de temps. Le kWh est donc l'énergie fournie par une puissance de un kilowatt pendant une heure. Si une installation solaire a une puissance nominale de 1 kW, cela signifie qu'elle produira 1 kilowattheure (kWh) d'énergie par heure lorsqu'elle atteint sa performance maximale (ensoleillement fort).

1 kilowattheure (kWh) = 1 000 watts x 1 heure

Les économistes et les industriels, pour qui le kilowattheure est trop petit, ont inventé une unité plus commode pour eux : la tep, tonne d'équivalent pétrole. Ceci s'explique aussi par le fait que le pétrole est la source d'énergie dominante. Elle leur sert pour comparer entre elles les différentes formes d'énergie. 1,6 tep représente la consommation moyenne d'énergie d'un habitant de notre planète, cette est une unité pour la consommation d'énergie locale. Pour la consommation d'un pays, on parlera de millions de tep (Mtep), voir de milliards de tep (Gtep). 1 tep = 11 628 kWh

Les préfixes : **kilo (k)  $10^3$ , mega (M)  $10^6$ , giga (G)  $10^9$ , tera (T)  $10^{12}$ , peta (P)  $10^{15}$**

Lorsque l'on dépasse l'échelle locale, des kW par exemple, il n'est pas toujours évident de s'imaginer la quantité ou la consommation d'énergie réelle dont on est entrain de parler. Donc, pour mieux se représenter certains chiffres, j'ai trouvé la comparaison avec des centrales ou réacteurs nucléaires très utile et adéquate.

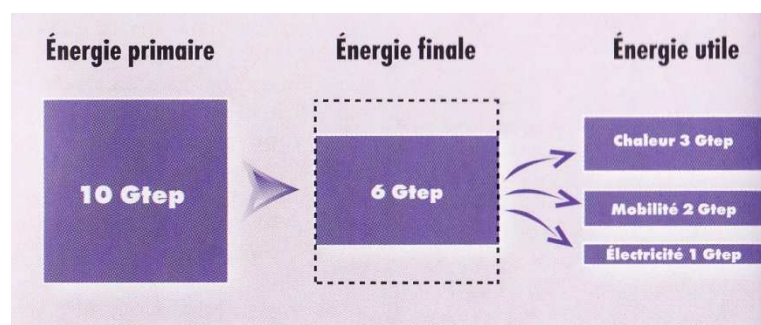
1 TW = 1000 GW =  $10^6$  MW. Un réacteur nucléaire (une centrale nucléaire compte généralement de 1 à 3 réacteurs) développe typiquement une puissance de 1000 MW = 1 GW. 1 TW représente donc la puissance de 1'000 réacteurs nucléaires, et donc celle d'au minimum 300 centrales. Mais attention, en 2006, 442 réacteurs fonctionnels ont été décomptés. Cela équivaut à un total de 370 GW produisant 17% de l'électricité mondiale.

## 1.2 L'énergie sous toutes ses formes

Il faut distinguer les sources d'énergie primaires, qu'on trouve directement dans la nature, de l'énergie finale sous une forme utilisable au quotidien.

L'électricité, par exemple, est une énergie finale. En effet, elle n'existe pas dans la nature cependant elle est obtenue par conversion d'une énergie primaire.

L'énergie contenue dans les énergies primaires (pétrole brut, gaz naturel, etc.) est transformée en produits énergétiques finaux (essence, électricité, etc.) pour être ensuite convertissable en produits de consommation (chaleur, lumière, mouvement, etc.) avant d'être finalement dégradée en chaleur.



*Atlas des*

*pour quel développement ?*, Bertrand Barré, Editions Autrement, Collection Atlas/Monde, Paris, 2007, p.6

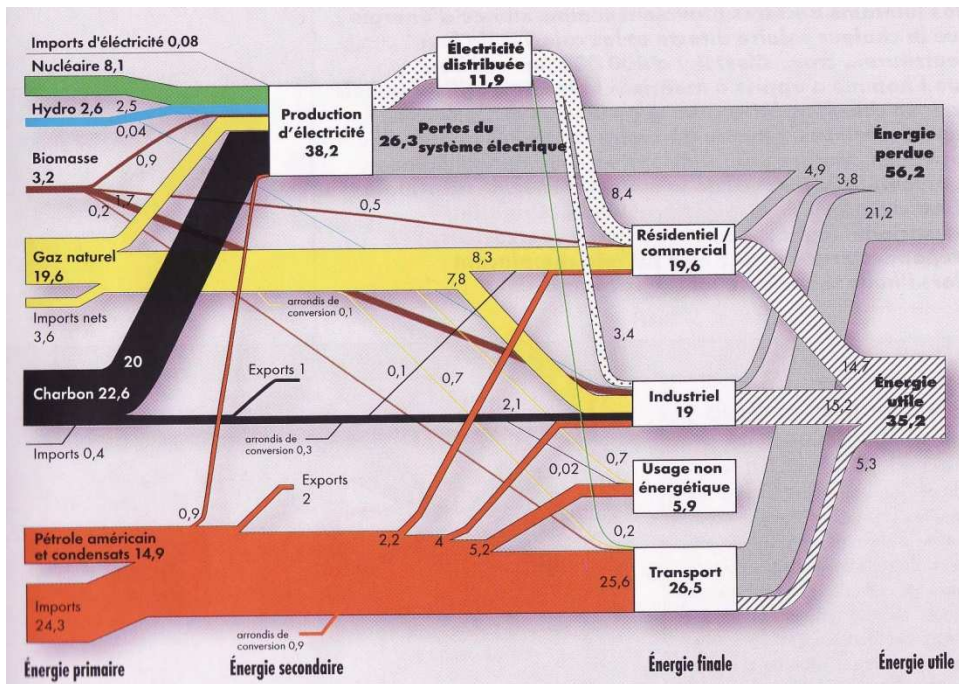
*énergies, Quels choix*

Une problématique se pose à l'heure actuelle : plus de la moitié de l'énergie est perdue en cours de route lors de ces processus de transformations mais aussi de transports.

Prenons un schéma des flux énergétiques aux USA (2002), tiré de *l'Atlas des énergies, Quels choix pour quel développement ?*, Bertrand Barré, Editions Autrement, Collection Atlas/Monde, Paris, 2007, p.7.

Ce schéma ci-dessous illustre la complexité du bilan énergétique d'un pays et met en avant notre gaspillage permanent.

A gauche se trouvent les différentes sources primaires, produites ou importées. A droite, l'énergie utilisée dans les grands secteurs de l'économie. Au milieu, sont annotés les transformations, dont les pertes de rendement sont regroupées ensuite en haut à droite en « énergie perdue ». On constate que plus de la moitié de l'énergie est perdue dans les processus de transformation et de distribution.



## 2 Les énergies

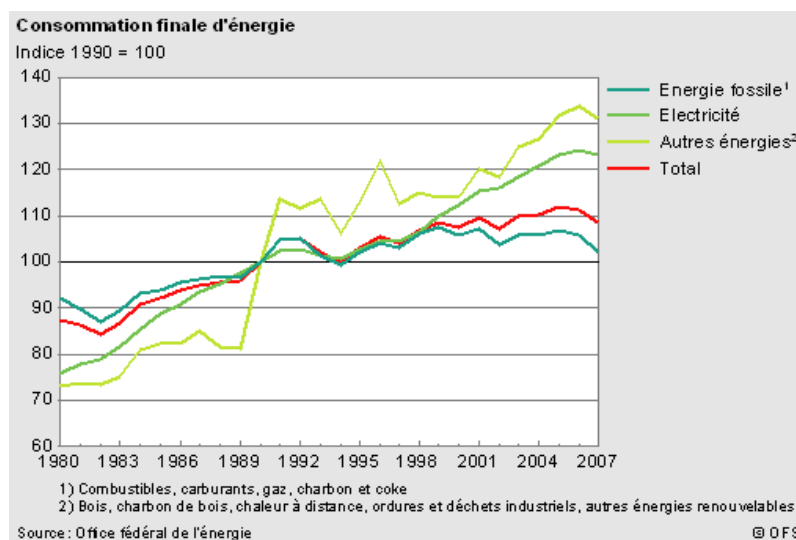
### 2.1 Notre situation énergétique

#### 2.1.1 Contexte énergétique suisse

La production ou la consommation d'énergie d'un pays remplissent plusieurs besoins tels que l'électricité, la chaleur, les carburants pour les transports, etc. Pour cette partie, je me suis intéressée à la consommation finale d'énergie et à la production d'électricité pour illustrer le contexte énergétique en Suisse ainsi que la place des énergies renouvelables.

Statistique globale suisse de l'énergie,

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/02/04/blank/ind21.indicator.130601.2106.html>



L'indice 1990 = 100 indique que l'année de référence dans ce graphique est l'année 1990. Cette année-ci, la consommation d'énergie fossile s'élève à 578'840 Tj, l'électricité à 167'670 Tj et au total la consommation finale atteint 798'510 Tj. En 2007, ces chiffres sont passés à 590'590 Tj, 206'760 et l'ensemble atteint les 865'420 Tj.

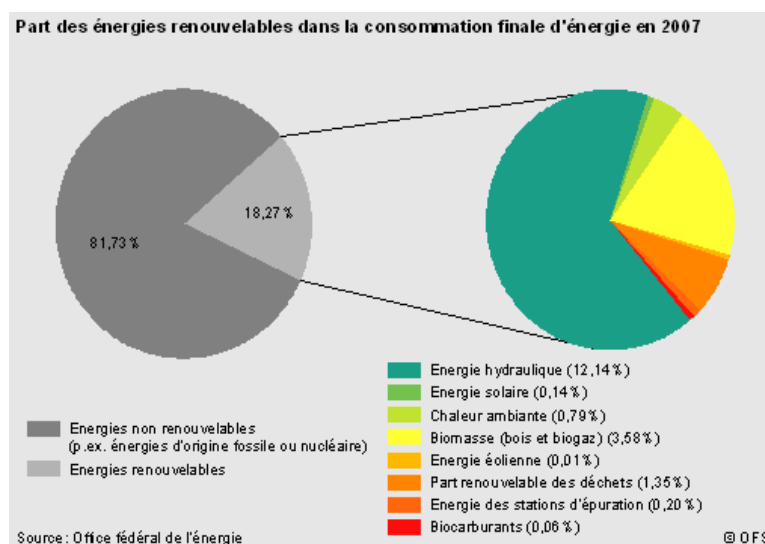
On constate dans l'ensemble que la consommation finale annuelle d'énergie a augmenté de 66'910 Tj depuis 1990, cela représente 8% de plus. Pendant cette période, la consommation d'énergies fossiles a augmenté de 2% et celle d'électricité de 23%.

### Répartition des énergies renouvelables :

- Consommation finale d'énergie en Suisse

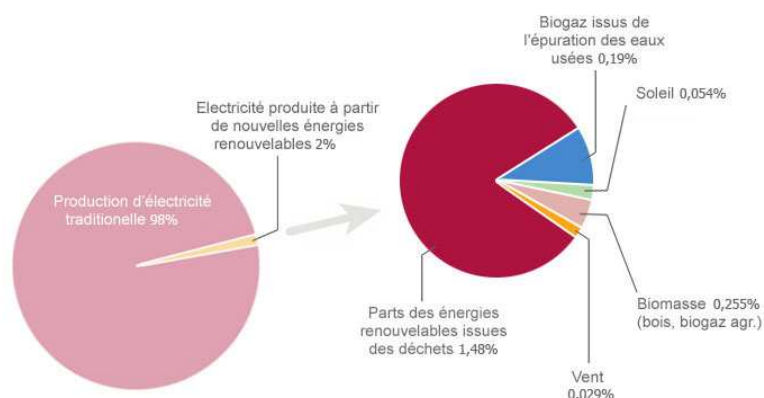
En Suisse, l'énergie hydraulique représente une part importante de l'énergie produite à partir des sources renouvelables, environ les deux tiers, soit 66%. En seconde place vient la biomasse (bois ou biogaz agricole), qui constitue 20%, et puis 7% proviennent de composants renouvelables de déchets. Les autres technologies énergétiques telles que l'utilisation de l'énergie solaire, de l'énergie et des composants renouvelables des eaux usées, ne produisent qu'une petite partie de l'énergie renouvelable. En térajoules, le total de la consommation finale en 2007 s'élève à 865'420 Tj, la part des énergies non renouvelables atteint les 707'290 Tj et les énergies renouvelables atteignent 158'130 Tj.

Statistique suisse des énergies renouvelables, Source : OFEN,  
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/02/04/blank/ind21.indicator.130608.2106.html?open=1305#1305>



- Autour de l'électricité en Suisse

En 2008, 56% de la production électrique suisse provenait de l'énergie hydraulique, et seulement 2% des autres sources renouvelables. Les 42% restant proviennent de l'énergie nucléaire, qui est importée en Suisse. Les énergies renouvelables représentent donc tout juste 58% de l'ensemble de l'énergie électrique suisse. Il est à noter que la plus grande part des nouvelles énergies renouvelables provient du traitement des déchets et non du vent ou du soleil.



Production d'électricité renouvelable en Suisse (2008), Source : OFEN, <http://www.electricitepourdemain.ch/contents/energie-renouvelable>

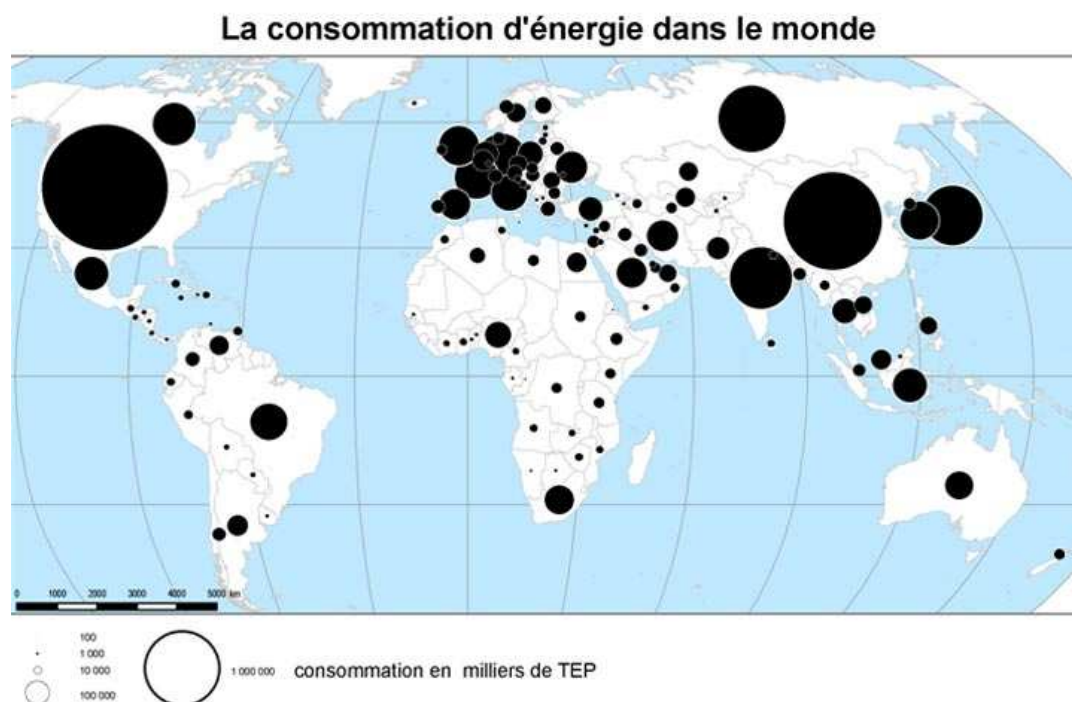
Nous pouvons nous féliciter d'avoir en Suisse une telle part d'énergie provenant de ressources renouvelables, en grande partie pour la production d'électricité où plus de la moitié provient de la filière hydraulique. D'après le bilan énergétique de 2008 fait par l'OFEN<sup>2</sup>, l'offre d'énergie primaire tire 15.6% des énergies renouvelables. Nous avons donc su exploiter au mieux l'énergie hydraulique ainsi que l'énergie provenant de l'incinération des déchets. La géographie de notre pays nous permet de construire des barrages hydroélectriques et des centrales au fil de l'eau, ce qui représente un avantage considérable pour la production d'énergie.

On peut dire que c'est déjà bien, mais la route vers un système énergétique stable et idéal est encore longue. Car nous ne sommes pas très diversifiés dans notre production d'énergie à l'aide des ressources alternatives. En effet, la géothermie n'est pas encore utilisée en Suisse et le solaire pourrait voir sa part augmenter. Nous verrons que le potentiel de ce dernier est considérable.

Malgré les quelques ressources énergétiques indigènes dont nous disposons, la Suisse reste fortement dépendante de l'étranger. Les produits pétroliers, le gaz et le combustible nucléaire, qui nous fournissent la grande part de notre énergie, sont importés.

<sup>2</sup> L'OFEN est l'Office fédéral de l'énergie en Suisse.

## 2.1.2 Contexte énergétique mondial



<http://www.planete-energies.com/FrontOffice/Players/PopupPlayerImage.aspx?contentId=265b459b-fce4-4c10-9b1e-065511965d60&pageFrom=Dossier>

L'Union européenne fait partie du podium des trois régions les plus énergivores de la planète. Elle représente 16 % de la consommation mondiale, alors que sa population correspond seulement à 7.3 % de la population mondiale. A la première place on retrouve les Etats-Unis (20% de la consommation mondiale avec 4.4% de la population planétaire) et en troisième la Chine. Mais si l'on prenait toute l'Asie-Pacifique (Chine, Inde et Japon entre autres), cette région dépasserait de peu la position des USA. La consommation mondiale de l'année 2005 s'est élevée à 11'350 millions de Tep et celle de l'Europe à 1'816<sup>3</sup> millions Tep.

Combien cela représente-t-il de centrales nucléaires ? 1'816 millions de Tep correspondent à 21'100 TWh. Prenons les TWh et divisons-les par le nombre d'heures en une année. Cela nous fait donc  $21'100\text{TWh} \div 8'760\text{heures} = 2.4\text{ TW}$ , représentant donc la puissance instantanée fournie par 2'400 réacteurs nucléaires. Sachant qu'une centrale possède entre 1 et 3 réacteurs, le nombre minimum de centrales nucléaires serait de 800 soit plus qu'il n'en existe sur notre planète !

La principale source d'énergie consommée par l'EU sont les hydrocarbures<sup>4</sup> avec 61% (en 2007). Les sources naturelles n'approchent que les 7%. Le bilan de la consommation énergétique de l'Union fait donc apparaître une très forte consommation d'énergie, en même temps qu'une dépendance forte aux hydrocarbures.

<sup>3</sup> [http://www.planete-energies.com/contenu/dossier/energie\\_europe/consommation.html](http://www.planete-energies.com/contenu/dossier/energie_europe/consommation.html)

<sup>4</sup> Un hydrocarbure est un élément contenant exclusivement du carbone et de l'hydrogène. Le pétrole et le gaz naturel sont des hydrocarbures. (<http://enseignants.edf.com/edfenseignants/lexique>)

## 2.2 Un moment-clé

Pour répondre à la progression rapide des besoins mondiaux d'énergie depuis 1950, nous avons systématiquement privilégié l'augmentation de la production au détriment d'une utilisation plus rationnelle de l'énergie. Bientôt, si nous n'agissons pas, nous en paierons le prix.

Confronté d'une part à la préservation de notre planète et de l'environnement, d'une autre à l'épuisement des réserves d'énergies non éternelles que nous utilisons (en effet les puits de pétrole ne sont pas des puits sans fin), le monde doit, aujourd'hui faire face à des défis essentiels à la prospérité future de l'humanité.

A la lecture des *World Energy Outlook* de ces dernières années, il m'est apparu évident que nous nous trouvons actuellement à un moment-clé de notre histoire en matière d'approvisionnement et d'utilisation en énergie. Effectivement, le système énergétique mondial se trouve à un croisement inévitable car à l'heure actuelle les tendances de l'offre et de la consommation d'énergie ne sont guère viables pour l'environnement, l'économie et le social. En d'autres termes, nous nous retrouvons face à deux problèmes majeurs liés à l'énergie : 1) Nous ne disposons pas d'approvisionnement suffisants et sûrs à des prix abordables. Les réserves de pétrole seront épuisées dans quelques dizaines d'années. 2) Nous nuisons à l'environnement par notre consommation excessive. Celui-ci est menacé d'une détérioration grave et irréversible, ce qui a notamment comme conséquence de modifier le climat de notre planète.

Un changement s'impose donc et pour cela nous avons déjà plusieurs solutions possibles. Il est temps, alors que nous avons encore de l'énergie en quantité suffisante, de produire de nouveaux moyens ou de développer des énergies qui nous seront bientôt essentielles.

Il s'agit d'assurer un approvisionnement énergétique fiable aux prix le plus raisonnable possible, et d'accomplir une transformation rapide, et cela dès maintenant, du système d'approvisionnement afin de supprimer ou au moins diminuer notablement les émissions de gaz carbonique (dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>), ainsi que d'autres gaz à effet de serre, et qu'il devienne durable, stable et respectueux de l'environnement.

Pour répondre à ce problème mondial, voici comment j'ai envisagé la chose :

Il faut tout d'abord **agir en prenant conscience**. De nombreuses recherches permettent des découvertes et des projets, mais ceux-ci ne sont que trop peu exploités et peinent à être mis en place. Lorsqu'il s'agit d'injecter de l'argent dans des banques, lors d'une crise économique, l'Etat et les milieux économiques se concertent et passent à l'action, cela après peu de temps. Par contre quand il s'agit d'investir de l'argent là où nous ne voyons pas immédiatement de changement, cela pose bien plus de problème. En effet, nous préférons nier la part de la faute de l'Homme dans le réchauffement climatique que de nous pencher financièrement sur ce problème. Investir dans des palmes qui brassent du vent ne rapporte pour l'instant rien à côté du pétrole ! Mais un jour viendra un retournement de situation.

Nous nous trouvons actuellement dans une situation énergétique délicate, ce n'est pas encore de la pénurie, mais il est temps, maintenant que nous savons ce qui nous attend, de tirer la sonnette d'alarme afin de mettre en place de nouvelles technologies. Et cela **pendant que nous disposons**

**encore d'énergie et de temps en suffisance** à leur élaboration. Je pense que pour l'instant nous ne nous sentons pas encore assez menacés pour nous sentir concernés.

Après avoir commencé à penser différemment, nous pourrions enfin **développer des ressources énergétiques alternatives**, que nous nous appliquons à laisser de côté : **les énergies renouvelables**.

Le développement des énergies renouvelables permet premièrement de limiter la consommation des énergies fossiles à un niveau raisonnable et ainsi de :

- Réduire la dépendance et les problèmes géopolitiques, et par la suite apporter une sécurisation de l'approvisionnement énergétique par la diversification et la mobilisation de ressources locales
- Contribuer à la généralisation de l'accès à l'énergie dans le monde entier (milieux ruraux ou isolés par exemple)
- Stimuler l'économie et des richesses locales (investissements et création d'emplois par exemple)
- Réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et ainsi limiter les dégâts infligés à l'environnement
- Réserver le pétrole à d'autres applications pour lesquelles il est difficilement remplaçable
- Maîtriser la consommation de l'énergie en évitant les gaspillages et les pertes

## 2.3 Les différentes sources d'énergie

On distingue **deux grandes catégories de sources d'énergie** : les énergies de flux, ou renouvelables, ainsi que les énergies de stock, non renouvelables et fossiles.

- Energies non-renouvelables :
  - Les énergies fossiles sont des énergies provenant de la combustion de matière organique (à base de carbone) fossilisée, c'est-à-dire des hydrocarbures bruts : le pétrole, le charbon et le gaz naturel.
  - L'énergie nucléaire est un cas à part avec l'uranium. L'uranium est considéré comme une source d'énergie non renouvelable, mais il n'est pas un combustible fossile.

Toutes ces énergies sont constituées de gisements limités.

- Energies renouvelables :

Il s'agit de toutes les formes d'énergie qui se renouvellent, soit par le rythme naturel soit par l'activité humaine (déchets). Ce sont des énergies dont le gisement se reconstitue en permanence et sont donc inépuisables à l'échelle humaine. En quelque sorte, leur disponibilité ne diminue pas lorsqu'on les utilise.

### 2.3.1 Les énergies non-renouvelables

- **Pétrole**

Les avantages de cette énergie sont déjà bien connus. Les coûts de production du pétrole sont faibles. L'extraction, la manipulation, le transport ou encore le stockage ainsi que son raffinage reste peu coûteux grâce à la haute teneur énergétique de ce carburant.

Le problème des réserves a déjà été soulevé dans la partie précédente. La combustion du pétrole contribue à l'effet de serre, et à cela s'ajoute son transport qui représente un danger pour l'environnement. Ici je fais référence aux naufrages de navire-citerne qui entraînent un immense déversement dans les océans. Le transport fait penser que justement le pétrole n'est pas une source bien répartie dans le monde, de plus celui-ci nous provient de pays instables, où des risques géopolitiques élevés.

- **Charbon**

Les réserves de charbon sont d'une part nettement plus importantes que celles du pétrole et d'autre part bien réparties sur la surface du globe- à part dans l'Union Européenne. Cette ressource est donc préservée des divers problèmes dus à la géopolitique.

Le charbon est connu pour être le combustible le plus polluant. Les gaz libérés par sa combustion contribuent à l'effet de serre et de plus ils entraînent pluies acides qui endommagent les lacs, les forêts et les récoltes.

- **Gaz naturel**

Le gaz est bon marché. Tout comme le charbon, il est mieux réparti sur la planète que le pétrole. Son dégagement de CO<sub>2</sub> est largement inférieur à celui des autres combustibles.

Ses principales réserves sont concentrées au Moyen-Orient, mais celles-ci sont, au rythme actuel de la consommation mondiale, à peine plus élevées que les réserves pétrolières. Le gaz a malgré tout une part dans la contribution à l'effet de serre, et ses installations ont aussi un impact sur l'environnement.

- **Uranium**

L'énergie produite par l'uranium, l'énergie nucléaire, est considérable. En effet, l'uranium libère une énergie de 2.9 GJ. Un seul gramme de celui-ci fournit 69 fois plus d'énergie que la combustion de 1'000 g de pétrole (42 millions de Joules soit 42 Mj).<sup>5</sup>

L'énergie nucléaire ne rejette que peu de gaz à effet de serre, cependant sa production engendre des déchets radioactifs, qu'il faut stocker. Ce stockage pose de grandes questions car ces déchets extrêmement sont enfouis sous nos pieds. De plus, s'ajoutent les risques d'accidents et ceux d'attaques terroristes.

---

<sup>5</sup> [http://www.physagreg.fr/CoursTS/Physique/Cours/Physique-B-chap5-complement\\_diff\\_petrole\\_uranium.pdf](http://www.physagreg.fr/CoursTS/Physique/Cours/Physique-B-chap5-complement_diff_petrole_uranium.pdf)

### 2.3.2 Concept des énergies renouvelables

#### Aujourd'hui des énergies de substitution, demain des énergies essentielles

Comme nous l'avons vu précédemment, les principaux défauts des ressources énergétiques que l'Homme utilise aujourd'hui sont les nuisances et les dégâts qu'elles produisent et le fait d'être d'origine fossiles, donc non renouvelables. Il faut que nous remplacions progressivement et dès maintenant ces anciennes habitudes, que nous laissions entrer les énergies renouvelables dans notre vie quotidienne. Un certain nombre d'entre elles sont déjà en application, mais leur utilisation ne reste que très marginale.

L'utilisation de l'énergie solaire apparaît comme une solution (actuellement d'appoint) réaliste et efficace, tout particulièrement dans la production de chaleur et d'électricité. Pour les habitants proches des mers, l'utilisation de la force houlomotrice (des vagues) est également réalisable. Pour le chauffage des maisons, il est possible d'utiliser la géothermie (l'exploitation de la chaleur de la terre). Les personnes vivant à la campagne peuvent exploiter le gaz issu du fumier et du compost. Ces solutions permettent aujourd'hui déjà de réduire efficacement notre dépendance énergétique fossile.

En ce qui concerne la production d'énergie renouvelable à une plus grande échelle, un grand nombre de projets et de concepts ont fait leurs preuves. Certains ont déjà leur place sur le marché. Il existe des centrales solaires, éoliennes, marémotrices, géothermiques et bien d'autres qui ont prouvé que l'Homme est capable de maîtriser ces nouvelles énergies mais surtout qu'il existe de nombreux moyen de substitution. Cependant, ces réalisations sont souvent restées à l'état de prototypes ou ne sont que très peu développées, car le coût de ces énergies, une fois encore, ne peut malheureusement pas encore concurrencer celui du marché.

Il faut bien tenir compte du fait que toutes les énergies renouvelables ne sont pas forcément 100% respectueuses de l'environnement. Le fait qu'une énergie se reconstitue n'implique pas dans tous les cas qu'elle soit « verte et propre ». En effet, leur exploitation peut aussi engendrer des déchets et des émissions.

Le solaire, l'éolien, l'eau et la géothermie ne rejettent aucune pollution, lorsqu'ils produisent de l'énergie. Tandis que la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles, tels que le charbon ou le mazout.

Prenons aussi garde aux conséquences de la production des éoliennes et des panneaux solaires, par exemple. Leur production demande certaines sources d'énergies, ainsi que des matériaux et des méthodes de fabrication qui n'épargnent pas totalement notre environnement. Cependant ces nuisances sont bien moins importantes que celles des énergies fossiles.

## L'énergie éolienne



Eolienne du Gütsch au-dessus d'Andermatt, <http://www.wind-data.ch/wka/wka.php?wka=GUE>

C'est le principe du moulin à vent. L'éolienne a pris aujourd'hui sa place. L'énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un mât qui peut être relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinier le grain ou à pomper de l'eau ou plus fréquemment à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'électricité est produite par la conversion de la force du vent. Il existe des éoliennes de grande puissance, regroupées en parc, dont l'énergie produite est injectée dans un réseau de distribution. D'autres éoliennes, de plus faible puissance, sont installées sur des sites isolés, et que l'on nomme aérogénérateurs domestiques. Leur puissance reste faible mais l'électricité est utilisée pour des besoins individuels ou par des petits réseaux collectifs.

Le parc éolien du Mont Croisin dans le Jura bernois, <http://www.juvent.ch/index.php?page=pages/galerie>



## La biomasse

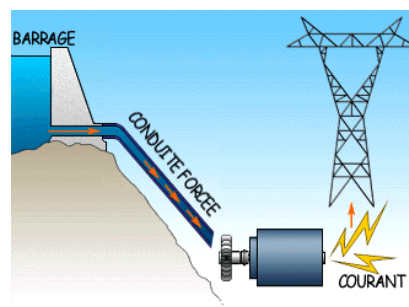
Appliqué à l'énergie, le mot biomasse désigne les formes d'énergie tirées du vivant : le bois, et plus largement tous les végétaux utilisés que nous utilisons, comme les biocarburants issus des cultures de soja, de betteraves ou de colza et de biogaz qui résulte de la fermentation de matière organique tels les déchets de végétaux, des eaux usées, de fumiers. Cette source d'énergie permet de fournir de l'énergie de plusieurs façons : sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant.

## L'énergie hydraulique

C'est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes, aussi bien une chute ou un cours d'eau qu'une marée et les courants marins. Ce mouvement peut être utilisé directement, dans le cas d'un moulin à eau, mais il est plus couramment converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

Comme l'énergie éolienne, il s'agit d'une transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie mécanique de l'eau entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

<http://www.fnh.org/naturoscope/Energie/Hydroele/hydro2.htm>



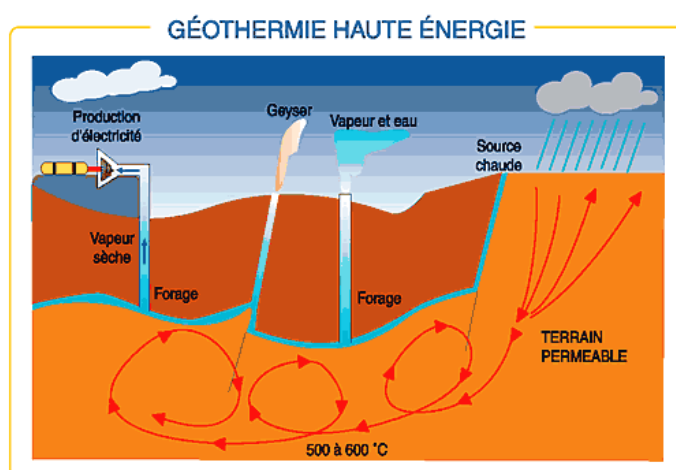
Principe général: L'eau est récupérée dans des bassins de retenue (barrage). Elle est ensuite dirigée à l'aide de conduites forcées vers des centrales hydrauliques situées plus bas. Elle fait tourner des turbines qui produiront de l'électricité. Cette dernière est ensuite acheminée par des lignes à haute tension vers de grandes villes.

Outre les grands barrages et les centrales hydroélectriques, il existe, y compris en Suisse, les petites centrales au fil de l'eau. Ces dernières sont situées sur une rivière et n'ont pas de réservoir. Elles utilisent le débit de fleuves ou de rivières assez importants. Le débit est plus important par rapport aux centrales à accumulation, que nous avons vues ci-dessus, mais la chute est minime. Les centrales au fil de l'eau s'adaptent donc au débit naturel du cours d'eau. Ces installations fournissent une énergie continue mais dépendante du débit.

Il y a déjà longtemps que la Suisse a recours à l'énergie hydraulique. Elle est la source d'énergie la plus importante de notre pays, et couvre environ 60% de nos besoins en électricité. Ceci est dû aux conditions géographiques favorables, ce qui n'est pas le cas d'autres pays.

Notons encore l'existence de l'énergie marémotrice. Les centrales marémotrices sont des centrales électriques qui génèrent du courant grâce à l'alternance des marées hautes et des marées basses. Ces installations fonctionnent sur le même principe qu'une centrale hydroélectrique. Un barrage est construit, lorsque la marée monte, il laisse passer la mer qui envahit le bassin de retenue. Avant que la marée ne redescende, le barrage est fermé et l'eau est ainsi retenue. Le niveau du bassin est alors plus haut que celui de la mer. Lorsque la différence de hauteur est suffisante, l'eau du bassin est dirigée vers des turbines qui transforment l'énergie en énergie électrique.

## La géothermie



Les sources naturelles de chaleur situées à quelques mètres en-dessous de nos pieds peuvent être utilisées pour amener de l'eau chaude vers les bâtiments (eau sanitaire et chauffage) ou pour générer du courant électrique.

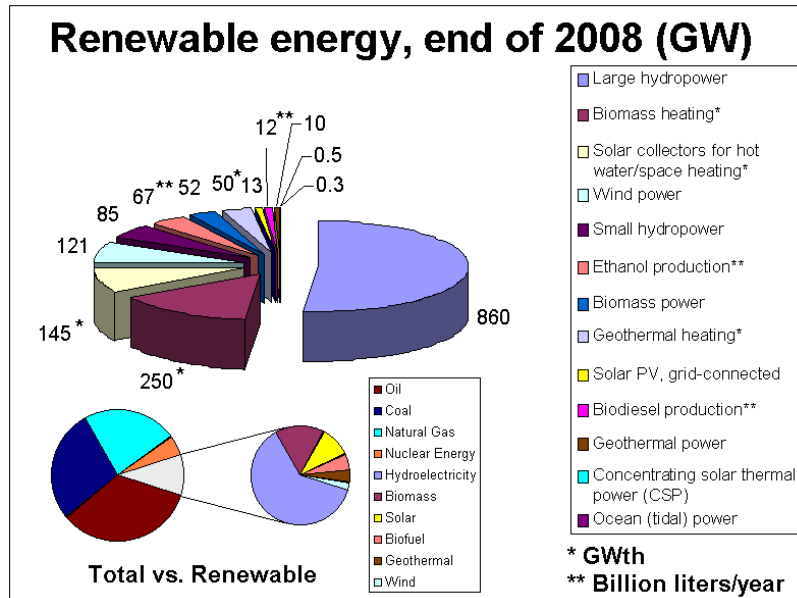
La géothermie haute température utilise la chaleur des profondeurs de la terre. Cette chaleur provient de la radioactivité naturelle de notre planète, qui maintient le magma à haute température. A certaines profondeurs de l'énergie circule sous forme de vapeur et d'eaux chaudes

car dans des sites bien précis, proche de la surface, le magma surchauffe naturellement les eaux souterraines. On peut y pratiquer des forages afin de soutirer directement la vapeur et la détendre dans une turbine pour fabriquer de l'électricité. Ainsi va le principe, plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente et grâce aux températures élevées il est possible de produire de l'électricité.

[http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/maison/d/quest-ce-que-la-geothermie\\_577/c3/221/p1/](http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/maison/d/quest-ce-que-la-geothermie_577/c3/221/p1/)

**Quels sont les problèmes principaux qui vont à l'encontre du développement de ces énergies ?**

Les énergies renouvelables sont réparties sur la surface du globe, mais le coût faible des énergies primaires freine les alternatives et les économies d'énergie. Cela ne favorise donc pas le développement des énergies alternatives qui sont plus coûteuses.



[http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_consumption](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_consumption), Source: BP Statistical Review

Effectivement, ces dernières vont contrer les inconvénients majeurs des énergies non-renouvelables : d'une façon générale leur contribution à l'effet de serre est minime, les impacts sur l'environnement sont fortement réduits. Malheureusement comme rien n'est parfait, ces énergies restent actuellement coûteuses. Du moins pour l'instant. De plus, ces énergies ont chacune des désavantages qui leurs sont propre. Nous allons les voir dans le tableau ci-dessous.

Certains pays, comme les USA ou les Emirats arabes unis, n'encouragent pas les énergies renouvelables car ils sont de grands propriétaires pétroliers et ne tirerait pas de bénéfice en suivant cette voie. Ce qui n'est pas du tout réfléchi à mon avis. Si l'on observe l'ensoleillement de ces régions on constate que nous seulement la nature les à gâter de l'or noir mais aussi des bienfaits du rayonnement solaire (cf. *Ensoleillement global annuel dans le monde*).

Comme ces sources d'énergie ont bien entendu aussi des inconvénients. Alors laquelle choisir? Sur la page suivante, un tableau permet de dégager les points faibles des énergies renouvelables.

L'éolien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Je n'irai pas jusqu'à dire que les éoliennes détériorent le paysage car c'est selon les goûts de chacun, mais ce sont des installations d'une certaine ampleur. Elles doivent être à distance suffisante des habitations.</li> <li>• Ces installations émettent un bruit notable.</li> <li>• Le vent n'est pas constamment exploitable, seulement 30% du temps en moyenne. Car si le vent est trop fort, l'éolienne est bloquée pour éviter qu'elle ne se rompe. Elles ne peuvent donc pas être construites partout.</li> </ul>
La biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couper du bois provoque des déforestations importantes, de nombreux pays sont déjà déboisés et presque désertiques. Les ressources organiques ont besoin d'être préservées, car la protection des forêts, de la faune et de la flore va au-delà des questions d'un simple recyclage.</li> <li>• La biomasse dégage des gaz comme le monoxyde de carbone, un gaz toxique, lors de la combustion de végétaux et d'autres microparticules. Il y a donc production d'une pollution atmosphérique.</li> <li>• Suivant l'utilisation, cette source d'énergie a besoin d'espaces importants.</li> </ul>
L'hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suivant le lieu de construction, la création d'un barrage nécessite de noyer des vastes espaces potentiellement riches en faune et en flore et peut impliquer le déplacement de populations.</li> <li>• Les installations hydrauliques perturbent ou peuvent détruire des écosystèmes, c'est donc une nuisance à l'environnement qui n'est pas négligeable.</li> <li>• La construction de ces installations ne peut se faire partout, ni dans chaque pays du globe et peut demander de gros investissements</li> </ul>
La géothermie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La réalisation de forages profonds est une opération représentant de gros risques d'ordre géologique. Personnellement, l'idée de creuser le sol me fait craindre des conséquences nuisibles que nous n'avons pas prévues.</li> <li>• La libération éventuelle de gaz ou d'eau contenant des produits toxiques, à partir des gisements souterrains, représente un problème pour l'environnement.</li> <li>• Le dégagement de la vapeur et de chaleur peut entraîner des changements climatiques locaux et une pollution sonore.</li> <li>• Les coûts d'investissements peuvent être importants (travaux d'explorations, réalisation de forages).</li> </ul>
Le solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est une énergie qui subit des variations suivant la météo, de l'heure et de la saison. Il n'y a plus aucune production d'électricité lorsque le soleil se couche.</li> <li>• Elle reste encore relativement chère.</li> </ul>

Après avoir vu que nous devons bientôt changer nos sources énergétiques, non pas par choix mais par nécessité, nous avons observé la palette d'énergies variées dont nous disposons actuellement. Ces énergies alternatives offrent de nombreuses solutions mais elles comportent chacune des désavantages particuliers plus ou moins importants. On peut donc se demander laquelle est la prometteuse pour notre avenir. Je me suis penchée sur l'énergie venant du soleil, qui, comme nous allons le voir, possède un potentiel inégalable et dont les inconvénients peuvent être largement contournés.

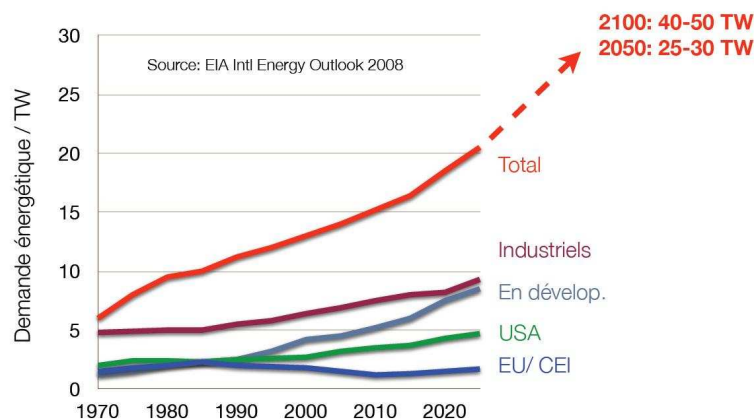
### 3 Pourquoi l'énergie solaire ?

#### Une énergie préservant des ressources précieuses et l'environnement

- La crise pétrolière de 1973 avait fait prendre conscience à l'humanité de la fragilité d'un système énergétique presque exclusivement fondé sur les énergies fossiles et donc épuisables. Les années 80 ont été celles de la prise de conscience de l'importance des conséquences de nos choix énergétiques sur l'environnement : les pollutions atmosphériques locales dues aux émissions de gaz provenant de la combustion des énergies fossiles, les conséquences de l'accident nucléaire de Tchernobyl, mais aussi les conséquences globales comme les risques de réchauffement planétaire. Dans ce contexte, le solaire présente évidemment de sérieux atouts. Son utilisation permet d'économiser des énergies fossiles et de retarder ainsi leur épuisement afin que l'on puisse progressivement rentrer dans une nouvelle ère énergétique sans pénurie. Son usage ne contribue pas aux nuisances environnementales à l'instar des énergies non renouvelables. Il est vrai que la fabrication d'installation solaire demande de l'énergie et comme dans toutes industries de fabrication, il y a des déchets. Cependant ces inconvénients restent minimes face à l'impacte des hydrocarbures sur notre planète. On peut aussi citer le fait qu'il n'y ait pas de danger sérieux d'accident, comme on peut l'imaginer pour l'énergie nucléaire.

#### Une énergie au potentiel énorme

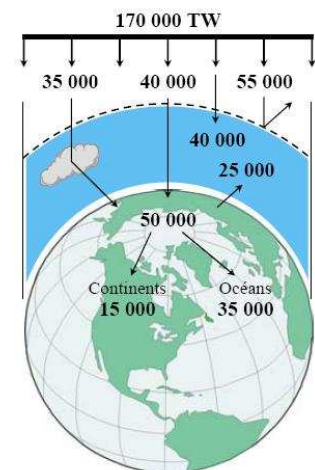
- En 2010, la demande énergétique mondiale s'élève à 15 TW. D'ici une quarantaine d'années nous aurons probablement un déficit énergétique de 10 à 15 TW. Alors que nos ressources s'épuisent, où va-t-on pouvoir trouver un tel potentiel d'approvisionnement ?



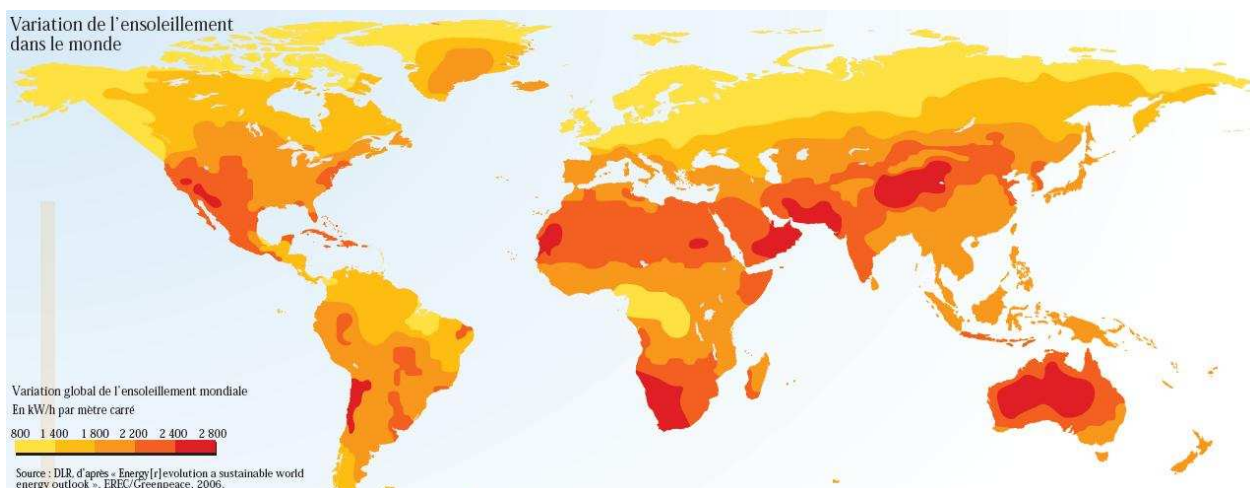
Ce graphique a été tiré d'une présentation PowerPoint que j'ai suivie à l'EPFL.

La Terre reçoit une puissance de 170 petawatts<sup>6</sup> (PW), c'est-à-dire 170'000 TW de radiation solaire entrante (l'insolation) en permanence sur l'hémisphère éclairée. Une partie des rayons qui arrivent sur la Terre est réfléchié ou absorbée par l'atmosphère. Le reste atteint le sol, qui en réfléchit et en absorbe à nouveau une partie. L'atmosphère, le sol et les océans, réchauffés, émettent à leur tour des rayonnements, dits infrarouges, vers l'espace.

Comme le montre ce schéma<sup>7</sup>, 30% du rayonnement émis par le Soleil atteint finalement la surface de la Terre et seulement 9% la surface des continents. Malgré ce fait, l'énergie reçue dépasse largement les besoins de la population mondiale.



- La carte ci-dessous indique les valeurs annuelles d'irradiation au sol. On peut constater que l'ensoleillement annuel varie de 800 à 2'800 kWh/m<sup>2</sup> suivant les régions du monde, mais aucune d'entre elles n'est totalement dépourvue de cette ressource énergétique.



Ensoleillement global annuel dans le monde, <http://www.cartografareilpresente.org/IMG/pdf/04-photovoltaique.pdf>

Ceci différencie le solaire de toutes les autres sources d'énergie que nous avons et en fait sa force. Le soleil nous offre donc un potentiel et des possibilités qu'aucune énergie ne pourrait ! Les énergies fossiles, l'éolien, l'hydraulique par exemple, ne peuvent être exploités directement dans chaque pays. L'énergie solaire demanderait seulement d'importer les installations, si le pays ne possède pas l'industrie permettant de les réaliser localement. Après quoi ce dernier produirait sa propre électricité et sa propre chaleur, ce qui augmentera

<sup>6</sup> Ce chiffre diffère selon les sources : ici je me suis fiée à un document de l'EPF, <http://bpe.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/Chapitre%205%20-%20Capteurs%20solaires.pdf> **174 PW** sous [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy), **170 PW** sous [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire), 178 milliards de MW ce qui correspond à **178 PW** dans le livre : *L'énergie solaire*, Benjamin Dessus et François Pharabod, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, 2<sup>e</sup> Edition, Paris, 2002.

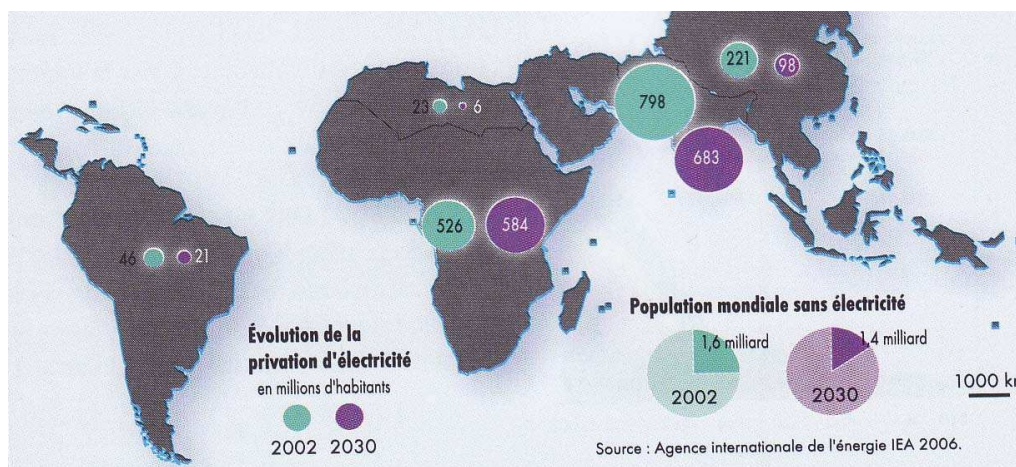
<sup>7</sup> <http://bpe.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/Chapitre%205%20-%20Capteurs%20solaires.pdf>

considérablement la production indigène. Cette nouvelle manière de concevoir l'énergie permettrait de réduire les importations et contribuerait ainsi à régler une partie des problèmes géopolitiques, et limiterait aussi les accidents de transport (déversement de barils de pétrole dans l'océan par exemple), la pollution liés au transport et les pertes d'énergie.

L'énergie solaire apporte la sécurité car elle est sans frontière et dépasse largement nos besoins. Comme le Soleil est accessible à tous et qu'il n'incite à aucune guerre, contrairement aux autres énergies telles les énergies fossiles ou l'énergie nucléaire, c'est une source d'énergie pacifique.

### Une énergie répondant aux besoins de tous

- En 2002, comme l'image ci-dessous l'indique (cercles turquoise), près d'un quart de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité. Cette dernière est indispensable au monde d'aujourd'hui, car elle n'est pas seulement là pour faire fonctionner nos jeux vidéo, notre télévision ou nos multiples moyens de distraction. Vivre sans éclairage le soir empêche les enfants de faire leurs devoirs et d'apprendre leurs cours. Mais plus important encore, sans réfrigérateur ces gens ne peuvent conserver des vaccins ainsi que de nombreux médicaments. Sans pompage, l'irrigation et surtout l'approvisionnement en eau potable est fortement limité.



*Atlas des énergies, Quels choix pour quel développement ?*, Bertrand Barré, Editions Autrement, Collection Atlas/Monde, Paris, 2007, p.13

Les cercles violets représentent le scénario de l'Agence internationale de l'énergie. Selon celui-ci, il restera encore presque un milliard et demi d'individus sans accès à l'électricité en 2030. Et pourtant, la consommation d'énergie ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> ne cesseront d'augmenter.

La meilleure source d'énergie dans les cas isolés s'avère être le solaire. De plus, comme on peut le constater sur la carte, le soleil ne manque pas dans les régions concernées. L'énergie photovoltaïque a la propriété particulière de constituer un système autonome et permettrait ainsi l'accès à l'électricité de ces nombreuses régions isolées, qui ne sont pas irriguées par des réseaux électriques.

Cette utilisation des rayons du soleil donne lieu à une production d'électricité locale. Les cellules photovoltaïques, installées sur les maisons ou à proximité immédiate des villages, pourraient fournir

un courant directement à leurs utilisateurs. Ceci sans qu'il soit nécessaire de tirer d'importants et coûteux réseaux.

L'article paru dans le *Times* (et repris en traduction française dans le *Courrier International*), *Malawi : Les petits miracles de l'énergie solaire*<sup>8</sup>, nous offre un exemple concret des « bienfaits » de cette source d'énergie. On y découvre un agriculteur du village de Kafukule, situé au nord du pays, qui voit sa vie changer grâce aux panneaux solaires. Il n'est pas le seul, les habitants prennent aussi part au changement. Car au Malawi seule 4% de la population est reliée au réseau électrique.

L'agriculteur malawite achetait du kérosène afin d'alimenter les vieilles lampes rouillées éclairant la maison. Ces dernières émettent des fumées responsables des maladies pulmonaires et risquent en permanence de causer un incendie. De plus le kérosène est coûteux. Un litre de ce combustible lui coûtait environ 1.10 euro et durait une semaine en moyenne. Il faut aussi savoir qu'on ne trouve pas toujours du kérosène au Malawi et la majorité des 12 millions de Malawites vivent avec moins de 0.55 euro par jour, donc une part énorme de leurs revenus sert à acheter du combustible. Ceux qui n'ont pas les moyens d'obtenir du kérosène abattent des arbres, notamment pour alimenter les fourneaux de cuisine. Le résultat est tel que le Malawi est l'un des pays les plus gravement déboisés. Comme la déforestation se traduit par l'érosion des sols, les récoltes ne cessent de diminuer.



Ce petit système, produisant de l'électricité à partir de l'énergie solaire, remplace un combustible coûteux et polluant et permet ainsi de faire des économies considérables, mais il résoudrait aussi les nuisances faites à l'environnement.

Le dispositif, décrit dans l'article, est simple. Il s'agit d'un panneau solaire à peine plus grand qu'un livre de poche branché sur deux câbles munis de pinces crocodile. Laisser au soleil pendant cinq heures, cette installation fournit assez d'électricité pour illuminer une ampoule LED, recharger un téléphone portable ou deux piles. Ces dernières peuvent être utilisées dans les petites radios qui sont souvent, dans les pays africains, le seul lien avec le monde extérieur. Outre les économies de kérosène, les Malawites peuvent recharger leur téléphone sur place et d'une manière simple et n'ont plus besoin de parcourir des kilomètres à pied pour le faire. Leur quotidien se voit considérablement simplifié.

Ces unités solaires sont fournies par une organisation caritative britannique, nommée SolarAid. Elle encourage les habitants à acheter des panneaux solaires, au besoin des microcrédits sont mis en place, ce qui permet aux personnes de rembourser leur unité à partir des économies réalisées sur les dépenses d'énergie. Chaque unité est vendue environ 21 euros. Il y a certainement d'après moi un marché économique derrière qui est en train de naître, mais l'organisation a su prendre conscience du potentiel de l'énergie solaire en mettant en place un petit dispositif adapté aux besoins d'un pays pauvre. Cet article démontre donc les bienfaits et les champs de possibilités réels de l'énergie solaire et ce n'est, je pense, qu'un début. Car pour l'instant ce ne sont que de petites unités profitables à

<sup>8</sup> *Malawi, les petits miracles de l'énergie solaire*, Jonathan Clayton, in *The Times*, 13.01.2010 à travers le site du *Courrier International*, <http://vert.courrierinternational.com/article/2010/01/13/les-petits-miracles-de-l-energie-solaire>

L'image est tirée de l'article, <http://vert.courrierinternational.com/article/2010/01/13/les-petits-miracles-de-l-energie-solaire>

l'échelle de la maison, mais le potentiel de cette technologie va, j'en suis sûre, évolué d'ici quelques années. On peut donc conclure que c'est un départ très prometteur pour l'énergie solaire.

Voici un autre exemple d'électrification rurale, cette fois à plus grande échelle, au Sénégal. Le village de Ndellé dispose d'une mini-centrale solaire. Eloigné du réseau électrique national, celui-ci produit désormais sa propre énergie et permet d'illuminer chaque foyer branché à ce mini-réseau. Mais ce n'est pas tout, des médicaments pourront être stockés et cela de manière adéquate. A cela s'ajoute la possibilité d'administrer enfin des soins de nuit.

On constate donc que l'énergie solaire peut avoir un rôle considérable dans le développement du Sud (aussi bien les pays africains que l'Inde cf. *population mondiale sans électricité*), du fait de son adéquation aux besoins les plus élémentaires des populations des pays pauvres, l'éclairage, les communications, la conservation des aliments et de produits pharmaceutiques. De plus ces régions du monde ne sont pas délaissées par le soleil, elles reçoivent son énergie en abondance (cf. *Ensoleillement global annuel dans le monde*). Le rayonnement solaire est bien plus élevé et plus constant dans l'année qu'en Europe. Cela permet à ces régions d'avoir des systèmes solaires moins conséquents pour un service équivalent au notre et constitue un atout économique.

## 4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie exceptionnelle.

Pendant des millénaires, le soleil ne fut utilisé par l'Homme que pour chauffer ou se chauffer. On peut dire que ce dernier était simplement resté passif quant à l'utilisation de cette source d'énergie car il n'avait pas réellement cherché à l'exploiter et ceci pendant plusieurs milliers d'années.

Étonnamment l'énergie solaire, qui est indispensable à la vie humaine et à la vie en général sur notre planète, n'a été directement exploitée par l'Homme qu'à partir du XXe siècle.

De nos jours, l'exploitation de l'énergie solaire s'est industrialisée et nous pouvons actuellement à produire de l'électricité grâce à elle.

Aujourd'hui, la recherche solaire évolue de plus en plus car nous lui prêtons enfin attention, nous commençons ainsi à savoir dompter cette énergie et à canaliser ses effets. Depuis quelques années, le marché de cette énergie ne cesse de croître et certaines découvertes nous font penser à un avenir très prometteur.

### 4.1 L'énergie solaire, quelles technologies ?

Comme je l'ai mentionné plus haut, l'énergie solaire permet de nombreuses applications précieuses à notre vie sur Terre, grâce à différents procédés et méthodes de transformation. On retrouve principalement deux grands domaines d'application :

- ☀ La production d'électricité
- ☀ Le chauffage et le refroidissement

Les techniques qui permettent ces applications en captant directement une partie de l'énergie solaire sont constamment améliorées. Aujourd'hui, on différencie trois méthodes bien distinctes :

- 1) Le solaire passif
- 2) Le solaire thermique
- 3) Le solaire photovoltaïque

Les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> sont des techniques de l'utilisation de l'énergie solaire dites actives en opposition au solaire passif.

#### 4.1.1 L'énergie solaire passive

Cette source d'énergie est principalement utilisée pour l'éclairage et le chauffage naturel d'une habitation. En plus de permettre une diminution de la consommation d'énergie, elle procure également un certain confort aux habitants.

Le but de l'utilisation passive est de tirer profit de l'apport direct du rayonnement solaire. Pour ce faire, il est nécessaire d'exploiter les éléments architecturaux d'une maison (murs, fenêtres, planchers, toits) mais aussi de son emplacement. Des façades doubles sont montées et sont tout comme les vitrages orientées vers le sud. Car une telle maison est souvent fermée au nord et ouverte

au sud pour capter le rayonnement solaire. Les murs et les sols doivent être appropriés pour augmenter l'isolation thermique. De ce fait, la chaleur apportée par les rayons du soleil est conservée pendant quelques heures par les murs et les sols pour être restituée en soirée et pendant la nuit. A la liste peuvent s'ajouter une véranda, voire si c'est possible la plantation de végétation aux alentours pour protéger l'habitation des vents et réduire ainsi les pertes de chaleur.

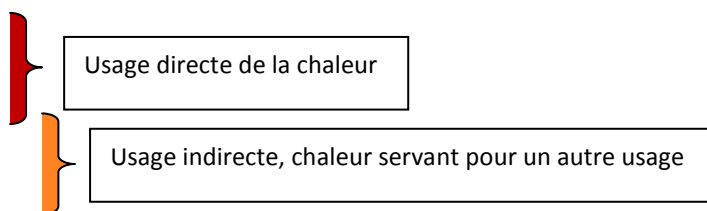
De la conception du bâtiment à la mise en place des composants appropriés, les façons sont diverses mais les principes restent les mêmes. On retient donc que le solaire passif, afin d'être exploité au mieux, demande une conception spéciale et appropriée d'un bâtiment ou d'une maison, que l'on appelle couramment éco-construction ou architecture bioclimatique.

A mon avis, il serait judicieux d'élargir cette utilisation de l'énergie solaire et de l'appliquer aux bâtiments publics, aux écoles par exemple, qui ne sont utilisées que le jour. Si un tel procédé, rien qu'au niveau de la lumière du jour et des vitrages, prenait part à la conception des nouvelles écoles, les néons au-dessus des écoliers n'auraient plus besoin d'être constamment allumés. Par conséquent et rien que de l'ordre de l'éclairage, une économie d'électricité non négligeable serait réalisable.

#### 4.1.2 L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique couvre, à lui seul, de nombreuses formes :

- Chauffe-eau et chauffage solaire
- Cuisinières et sécheuses solaires
- Chauffage des piscines
- Rafraîchissement solaire
- Centrales solaires thermiques

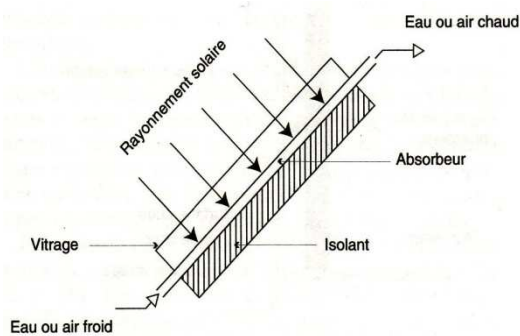


Le principe général consiste en la transformation des rayons du soleil en énergie thermique. Pour transformer l'énergie solaire, cette méthode utilise la chaleur transmise par rayonnement plutôt le rayonnement lui-même. C'est fondamentalement ce qui la différencie du photovoltaïque. La production du solaire thermique peut être soit utilisée **directement** (pour chauffer un maison, un bâtiment ou une piscine par exemple) ou **indirectement** (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique) cela va dépendre de nos besoins et de nos apports à couvrir.

##### Le capteur solaire thermique

Ce dispositif est constitué d'un vitrage simple ou double, placé devant un absorbeur dans lequel circule de l'eau chargé de transporter la chaleur. L'eau prend le nom de fluide caloporteur<sup>9</sup>, dû à sa fonction. Une isolation thermique est installée à l'arrière et parfois sur les côtés, elle limite ainsi les pertes thermiques.

<sup>9</sup> Le fluide caloporteur est un liquide présent dans le circuit des capteurs d'une installation solaire, qui véhicule la chaleur du capteur au ballon de stockage. Le fluide caloporteur est en général composé d'un mélange d'eau et de glycol pour assurer une protection antigel. <http://www.bati-depot.fr/photovoltaique/definition/fluide-caloporteur-769.html>

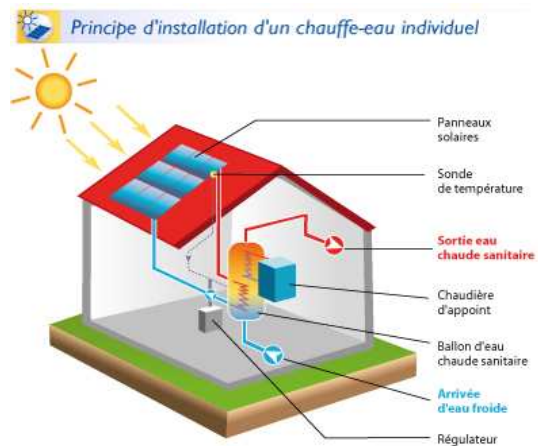


Lorsque le rayonnement solaire traverse le vitrage du capteur thermique, les photons frappent la surface métallique foncée de l'absorbeur. Ils sont absorbés par la matière et augmentent l'agitation des molécules, donc de la température du matériau exposé aux rayons du Soleil. La chaleur est transmise au caloporteur qui circule dans l'absorbeur. Le vitrage à l'avant de l'absorbeur crée l'effet de serre. Il augmente l'efficacité du capteur lorsque sa température est supérieure à la température extérieure.

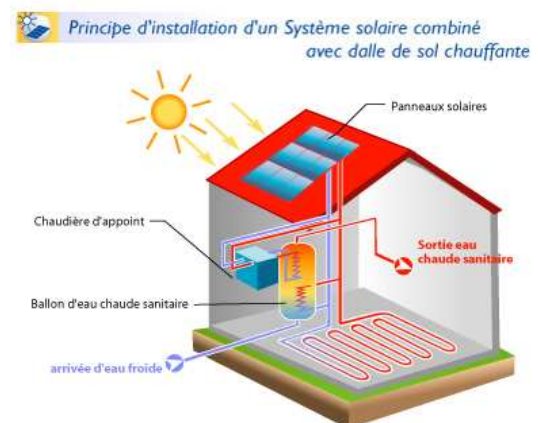
Coupe d'un capteur solaire thermique, *L'énergie solaire*, Benjamin Dessus et François Pharabod, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, 2<sup>e</sup> Edition, Paris, 2002, p.27.

Le capteur photothermique utilise le rayonnement solaire direct et diffus. Il n'est donc pas nécessaire de l'orienter en permanence en direction du Soleil.

Une pompe de circulation véhicule le liquide caloporteur chauffé dans les capteurs. Ce liquide fonctionne en circuit fermé. La chaleur est ensuite transmise à l'accumulateur (chauffe-eau ou réservoir) par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. La température des capteurs et celle de l'accumulateur sont constamment comparées. Dès qu'une différence positive s'enregistre, la circulation fonctionne automatiquement. Elle s'arrête lorsque cette température redevient négative.



L'accumulateur bien isolé permet de bénéficier de l'énergie solaire stockée, lorsque le soleil a disparu. Mais en cas de mauvais temps, où l'apport solaire est insuffisant, et lorsque l'énergie solaire emmagasinée dans l'accumulateur est épuisée, une énergie traditionnelle (mazout, gaz ou électricité) fournit l'appoint nécessaire.



La conversion rayonnement-chaleur, produit par des capteurs solaires, permet de fournir de l'eau chaude pour les besoins sanitaires mais contribue tout aussi bien au chauffage de l'habitat. Seule la distribution de la chaleur varie et reste plus complexe dans le deuxième cas. Notons qu'il est possible d'utiliser les deux types d'applications combinées ou séparées.

D'après l'entreprise suisse AGENA, 1m<sup>2</sup> de capteur photothermique par personne produit le 65% d'eau chaude sanitaire annuelle de cette dernière. En été, cette proportion atteint presque 100%.

*Usage directe de la chaleur*, <http://www.aer-groupe.fr/servlet/ShowInfo?M=S155SFR10RF>

Les centrales solaires thermiques

La production d'électricité par l'énergie solaire suit le même principe que les autres transformations de chaleur en électricité (centrales thermiques ou centrales nucléaires par exemples). On transforme la chaleur en énergie mécanique, sous la forme d'un gaz porté à haute température et haute pression qui fait tourner une turbine. Puis cette énergie mécanique est transformée en électricité, lorsque la turbine entraîne un alternateur. Pour que le système ait un bon rendement, il est indispensable d'obtenir des hautes températures pour chauffer le gaz. Les capteurs solaires ne permettent pas d'atteindre les très hautes températures nécessaires. Le principe d'une centrale solaire va donc être de concentrer les rayons solaires vers un point. La concentration du rayonnement solaire permet d'obtenir de hautes températures et ainsi la production d'électricité.



Centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques,  
[http://sycomoreen.free.fr/syco\\_francais/solaire\\_thermoelec\\_artactuel.html](http://sycomoreen.free.fr/syco_francais/solaire_thermoelec_artactuel.html)

## 5 Le solaire photovoltaïque

### Phénomène photovoltaïque : la conversion de la lumière en électricité

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui avait découvert la pile électrique en 1800. Mais c'est le savant Antoine Becquerel, en 1839, qui est le premier à avoir mis en évidence cette conversion particulière de l'énergie- la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, cent ans après sa découverte, le phénomène photoélectrique restait encore peu connu et seuls certains curieux s'y intéressaient en laboratoire. Entre temps, l'effet photovoltaïque du sélénium avait été mis en avant et servait pour la photographie. Mais tout change brutalement en 1954 quand trois chercheurs américains, Chapin, Fuller et Pearson, mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium capable de transformer directement l'énergie solaire en électricité avec un rendement de 6%. Cela arriva juste au même moment où l'industrie spatiale, qui était en train de naître, cherchait des solutions pour alimenter ses satellites et c'est ainsi que tous les grands laboratoires s'intéressèrent à cette nouvelle technologie. Puis, en 1958, une cellule avec un rendement de 9% est mise au point et en même temps, les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace.

Très vite, la technologie du silicium monocristallin s'impose et permet d'obtenir, certes à des coûts très élevés, des cellules photovoltaïques extrêmement fiables. Ce sont des galets de moins de 1 mm d'épaisseur et de 5 à 10 cm de diamètre qui transforment directement la lumière en courant électrique continu sous une tension faible (inférieure à 1 volt). Une telle cellule est capable de produire de l'ordre d' 1 watt électrique quand elle reçoit du soleil 10 watt lumineux. On dit que son rendement de conversion dans ces conditions est de 10%.

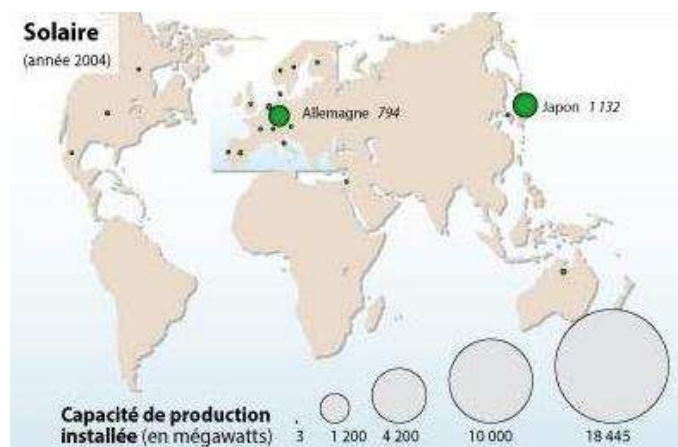
Mais les industriels ont attendu le premier choc pétrolier de 1973 avant de s'y intéresser sérieusement.

Il y a une vingtaine d'années apparaissait la calculatrice de poche solaire. Quelques cellules photovoltaïques y remplaçaient avantageusement les piles électriques, en créant ainsi une économie d'énergie et limitant aussi des nuisances pour l'environnement. Aujourd'hui, on trouve facilement dans des grandes surfaces et dans des magasins dédiés à l'écologie de nombreux objets fonctionnant à l'énergie solaire : torches, lampes de jardins, montres, chargeurs de batteries. Aujourd'hui tout ou presque peut fonctionner à l'énergie solaire.

Ce chapitre aura pour but de comprendre comment fonctionne une cellule photovoltaïque, d'avoir une meilleure idée des différents types de cellules qu'offre le photovoltaïque et de constater que plusieurs générations ont déjà été étudiées avec comme objectif à chaque fois de s'attaquer aux inconvénients de la ou des photopiles précédentes. Afin d'insérer une manipulation dans ce travail de maturité, j'ai choisi de découvrir l'étonnant fonctionnement de la cellule de Grätzel, inventée au début des années 90 à l'EPFL, en construisant une cellule PV à colorant naturel.

## 5.1 Situation du solaire

### 5.1.1 Marché mondial du solaire photovoltaïque



Répartition de l'énergie solaire en 2004, [http://cartographie.sciences-po.fr/cartotheque/64C\\_energies\\_renouvelables\\_2005.jpg](http://cartographie.sciences-po.fr/cartotheque/64C_energies_renouvelables_2005.jpg)

L'Allemagne et le Japon sont partis en tête de la course solaire et présentent aujourd'hui une avance considérable dans le domaine du photovoltaïque.

Mais depuis quelques années, tout accélère rapidement et de nouveaux acteurs prennent place sur ce marché. C'est notamment le cas des USA, de l'Espagne, de l'Italie et de la France. Ces pays ont instauré des directives en faveur du photovoltaïque telles que des subventions régionales pour les particuliers et les professionnels, des réductions d'impôts avantageuses et un tarif de rachat de l'électricité produite favorable. En Suisse, nous sommes malheureusement peut-être encore trop

vieux jeu, mais aussi stricts et trop économes dans les dépenses pour les projets solaires par rapport à notre voisin l'Allemagne.

A la fin de l'année 2007, nous sommes arrivés au total de 7'957.4 MW d'énergie solaire photovoltaïque sur la surface du globe. Cette somme représente l'équivalent d'environ 8 réacteurs nucléaire. Cette même année, la Suisse totalise 36.2 MW soit à peine 0.45% des puissances cumulées installées dans le monde. L'Allemagne détient la première place avec 3'998 MW soit la moitié des puissances photovoltaïques mondiales. Le Japon atteint les 24% tandis que les USA à peine 10%.<sup>10</sup>

### 5.1.2 Potentiel du photovoltaïque en Suisse

En Suisse un large potentiel reste inexploité. Chaque année, environ 2'000'000 m<sup>2</sup> de surface de toiture sont construits, et seuls 56'000 m<sup>2</sup> sont couverts par des installations solaires, soit moins de 3%. Ce qui est extrêmement regrettable. Dans tout le pays, il existe plus de 400km<sup>2</sup> de surface de toiture, or si l'on installait des modules photovoltaïques sur les toits et les façades les plus ensoleillés, on pourrait subvenir à un tiers de nos besoins annuels en énergie électrique selon une étude effectuée par l'Agence Internationale de l'Energie (l'AIE), Photovoltaic Power Systems Programme PVPS en 2002 [http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1\\_11.pdf](http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_11.pdf).

## 5.2 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque converti l'énergie du soleil en énergie électrique. Lorsqu'on l'éclaire avec une certaine quantité de lumière, elle produit du courant électrique. Mais c'est plus précisément dans les matériaux semi-conducteurs que la conversion photovoltaïque a lieu.

Avant de comprendre le fonctionnement d'une photopile, il faut tout d'abord se rappeler de deux points importants : toute matière est faite d'atomes comportant des électrons qui gravitent autour d'un noyau et un courant électrique est une circulation d'électrons. Dans un conducteur électrique, comme un fil de cuivre par exemple, les électrons sont totalement libres de circuler et permettent ainsi le passage d'un courant. Dans un semi-conducteur, la situation n'est pas la même. Les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes.

Dans le cas d'une photopile, la lumière pénètre dans un semi-conducteur, le silicium (matériau le plus utilisé). Les photos apportent alors une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer. C'est ainsi qu'est produit le courant électrique.

Une photopile traditionnelle est une tranche de silicium que l'on prend en sandwich entre deux électrodes métalliques + et – pour collecter le courant produit. Mais pour attirer les électrons vers les électrodes, il faut une force interne. Une différence de potentiel et donc créée entre les deux bornes

---

<sup>10</sup> Ces chiffres ont été tiré d'un tableau de données de BP Solar : [http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2008/STAGING/local\\_assets/2009\\_downloads/renewable\\_table\\_solar\\_photovoltaic\\_power\\_2009.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2009_downloads/renewable_table_solar_photovoltaic_power_2009.pdf)

d'une cellule photovoltaïque pour permettre la circulation du courant. Cette différence est produite par ce que l'on appelle le « dopage » des parties avant et arrière de la tranche de silicium :

- Dopage de type p : Une face est dopée avec du bore, c'est-à-dire qu'on ajoute à cette couche des atomes de cet élément. Le bore a la propriété de posséder moins d'atomes que le silicium. Ainsi cette zone est dopée positivement et prend le nom de zone p ou silicium p.
- Dopage de type n : L'autre couche est dopée au phosphore, qui possède plus d'électron que le silicium. Cette zone est dopée négativement et se nomme de zone n ou silicium n.

Il y a donc deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit de charges négatives.

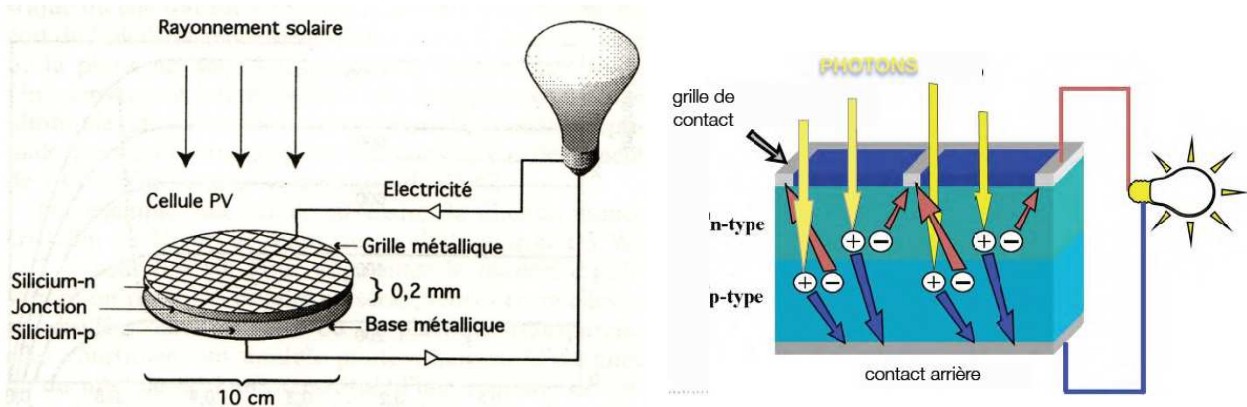


Schéma d'une photopile, (1) *L'énergie solaire*, Benjamin Dessus et François Pharabod, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, 2<sup>e</sup> Edition, Paris, 2002, p.49 ; (2) tirée d'un présentation à l'EPFL

Lorsque les photos frappent le matériau semi-conducteur de la cellule photovoltaïque, les électrons des atomes sur la couche externe absorbent l'énergie. Cette absorption permet aux charges négatives de se libérer de leurs atomes et deviennent mobiles. L'espace laissé vide (un trou) est comblé par un autre électron provenant de l'autre couche. C'est-à-dire que les électrons en excès dans la zone n diffusent dans la zone p. Cette première devient chargée positivement et l'autre devient chargée négativement. Il va ainsi se créer un champ électrique entre elles qui tend à repousser les électrons de la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction, dite p-n, est formée. Le courant électrique est recueilli par les fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.

### L'unité de puissance de des photopiles : Le watt crête

La performance d'une photopile se mesure à sa capacité de transformer l'énergie solaire en électricité. On définit son rendement comme le rapport de la puissance électrique maximale qu'elle fournit à la puissance lumineuse qu'elle reçoit du Soleil. Le rendement électrique indique ainsi le pourcentage de rayonnement solaire capté et converti en énergie électrique. Un rendement atteignant les 30% est qualifié d'exceptionnel car en théorie, et à l'heure actuelle, une cellule ne peut convertir plus 40% du rayonnement. C'est le meilleur résultat obtenu à ce jour en laboratoire (aux USA sur une surface de maximum 5 mm<sup>2</sup>).

Une convention internationale définit la puissance d'une cellule photovoltaïque, en watts crête ( $W_c$ ), comme étant la puissance optimale que peut fournir la photopile sous un ensoleillement de 1'000 W/m<sup>2</sup> à une température de 25 °C.

Par exemple, une cellule circulaire de silicium monocristallin de 10 cm de diamètre produit environ  $1.3 W_c$  (2.7 A sous 0.5 V). Pour augmenter la tension d'utilisation, on place des cellules en série. Elles sont reliées entre elles et encapsulées dans un verre ou un plastique transparent, afin de les protéger des chocs et de l'humidité. C'est ainsi que l'on obtient un module photovoltaïque. De cette manière un module de  $1m^2$ , constitué d'une centaine des cellules précédentes, atteindra une puissance crête d'une centaine de watts. Sous un ensoleillement de  $5 kWh/m^2$  par jour comme dans le Sud de la France en été, ce module produira au maximum 0.5 kWh d'électricité par jour. En Suisse, où l'ensoleillement est inférieur ( $3.8 kWh/m^2$ ), on obtiendra un maximum de 0.38 kWh par jour.

Aujourd'hui, nous différencions généralement plusieurs types de cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques. Les panneaux conventionnels sont tous basés sur le silicium, un semi-conducteur, et sont appelées plus généralement cellules de 1<sup>ère</sup> génération. D'autres sortes, avec une technique de fabrication différente, se trouvent depuis peu sur le marché et constituent la 2<sup>ème</sup> génération du photovoltaïque. La 3<sup>ème</sup> génération de cette technologie tend à faire son apparition dans l'industrie, pour l'instant elle est principalement au stade de la recherche. Pour diverses raisons, notamment la concurrence, il nous faudra attendre quelques années avant sa production industrielle.

### 1<sup>ère</sup> génération

Cette première famille de cellules solaires est constituée de matériaux solides cristallisés. Il faut bien noter que le silicium, le matériau le plus répandu dans les photopiles, présente un bon rendement à fort et à moyen éclairément. Il est soit cristallin soit amorphe. Cette dernière forme fait partie de la génération suivante.

Ici l'on parle de matériau cristallin, parce que le silicium qui les constitue est un cristal.

- Silicium monocristallin

Appartient à ce type la photopile constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Rendement des modules commercialisés: 11-20%

- Silicium polycristallin

Cette photopile-ci, est composée de plusieurs cristaux assemblés, d'où son nom. Elle ressemble à une mosaïque avec des fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres, qu'on appelle grains. Il est moins performant que son prédécesseur, essentiellement aux éclairéments modérés. Rendement des modules commercialisés: 11-15%



Module polycristallin (à gauche) et monocristallin (à droite), <http://www.photovoltaique.info/Les-differentes-technologies.html>

Le silicium cristallin reste la cellule solaire la plus performante parmi celles sur le marché. Cependant, elle se voit entravée par nombreux défauts et désavantages :

- Coût de production élevé et coût du courant élevé: ces cellules cristallines sont très énergivores car la construction des panneaux PV requiert beaucoup d'énergie. Le Si en est le principal fautif, c'est un matériau coûteux par le prix mais aussi par l'énergie qu'il requiert à la fabrication. Ce qui constitue la problématique majeure de cette technologie. Et bien entendu qui dit production coûteuse dit achat important, et donc ne permet pas l'accès à tous.  
Rajoutons pour concrétiser ce fait, qu'il faut au minimum 3 à 4 ans de fonctionnement à plein tube régime à un panneau cristallin pour rendre l'énergie dont a eu besoin pour le construire, c'est ce que l'on appelle l'énergie grise.
- Emission de gaz à effet de serre : comme il faut beaucoup d'énergie pour réduire la silice en silicium, le photovoltaïque de cette génération est la source renouvelable qui émet le plus de gaz nuisible à notre environnement. Ces émissions restent néanmoins toujours bien inférieures à n'importe quelle source fossile.
- Effet d'intensité et effet d'orientation : Ces photopiles conventionnelles fonctionnent très bien à haute intensité solaire, en plein été à midi par exemple, où elles atteignent leur rendement maximum. Au moindre nuage ou dès que l'intensité lumineuse baisse, le rendement chute et peut passer de 20% à 10% pour le cas du monocristallin.
- Intégration limitée : problème esthétique et pratique. Ces panneaux sont lourds et pas très esthétiques ils n'offrent pas des possibilités d'intégration à l'architecture très variées.

Ces éléments nous permettent clairement de voir les failles de la technologie actuelle et de constater qu'elle n'est de loin pas encore à la pointe. Il nous reste donc encore beaucoup d'efforts à faire. Ceci ne concerne pas seulement les chercheurs mais aussi les industriels occidentaux et les régisseurs de l'économie, qui peinent à suivre l'évolution. Le monde de l'énergie se trouve bien trop souvent confronté aux barrières de l'économie mondiale.

## 2<sup>ème</sup> génération

Les cellules en couches minces constituent cette seconde génération. On constate déjà une évolution en comparaison avec à la première génération de cellules solaires. On n'utilise plus de matériaux lourds, ce qui permet des économies d'énergie et d'argent. On envisage aussi avec le PV amorphe une photopile pour les besoins sous un éclairage faible, diffus ou artificiel. A l'exception de cette dernière, le silicium est, dans cette catégorie, remplacé par d'autres semi-conducteurs.

Le principe de ce type de cellules à couches minces est que la couche du semi-conducteur est directement posée sur un substrat tel que le verre. La production de ce genre de photopiles est moins coûteuse car elle consomme moins de matériau semi-conducteur, de plus elle ne nécessite pas les divers transformations du silicium nécessaires aux cellules cristallines.

On distingue :

- Le silicium amorphe

Cette catégorie est connue pour alimenter des appareils de faible consommation, tels que des montres, des calculatrices et des appareils de mesure. Elle est nettement moins puissante au soleil que les deux cellules précédentes ayant le silicium comme semi-conducteur. Mais elle possède une excellente sensibilité aux faibles éclairagements, lors de temps couvert ou sous une lumière artificielle. Ce qui lui vaut un excellent usage à l'intérieur. Elle permet de réaliser des petits formats grâce à la simplicité de découpe. A noter que son prix est également inférieur à celui des cellules cristallines. Rendement des modules commercialisés: 7-9%



- Le diséléniure de cuivre indium,  $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  (CIS) :

Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince et permet aussi de s'affranchir du silicium. De plus, les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques. Rendement des modules commercialisés: 9-11%



<http://www.ecostal.be/fr/catalog/wurthsolar/modules-photovoltaiques-cis-wurthsolar-75wc~ar300081.aspx>

- Le tellurure de cadmium (CdTe) :

Les coûts de production de cette technologie sont inférieurs. Elle offre un rendement plus important que les cellules photovoltaïques dans des conditions nuageuses ou de luminosité diffuse. Rendement des modules commercialisés: 6-9%

<http://www.firstsolar.com/en/CdTe.php>



Inconvénients :

- Un rendement inférieur à la première génération : pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses, les cellules en couche mince nécessitent une surface plus importante.
- A nouveau de telles cellules doivent fonctionner 2 à 3 ans (suivant la technologie) pour produire l'énergie qui a été nécessaire à leur fabrication.
- La toxicité de certains éléments, tel que le cadmium, pour leur fabrication.

On constate que ces deux premières générations de cellules comportent aussi bien des avantages que des inconvénients. La génération suivante vise une technologie la moins chère à la fabrication et la moins coûteuse possible en énergie. De plus, les chercheurs vont s'attaquer aux inconvénients cités plus haut et pour ce faire il faut changer totalement d'approche.

### 3<sup>ème</sup> génération

## 5.3 Cellule de Grätzel, concept de l'EPFL

Particulièrement en vogue, telle qu'elle fut présentée au début du mois de mars au Japon lors du PV expo<sup>11</sup>, cette photopile s'inspire de la nature. Sa découverte faite à l'EPFL par M. Grätzel au début des années 90, a ouvert une voie prometteuse de l'énergie solaire photovoltaïque. Ce professeur suisse est présenté comme l'inventeur de l'énergie solaire bon marché. Ses découvertes ont relancé l'intérêt de chercheurs du monde entier pour cette source d'énergie. Sa technologie pleine de promesses est la seule cellule photovoltaïque qui utilise des molécules pour absorber la lumière et créer des charges électriques.

Il m'a été possible de découvrir et de concrétiser une photopile à colorant naturel. Mais avant de commencer la manipulation photochimique, voici quelques explications au sujet de cette découverte.

Après les cellules à base de silicium, les scientifiques se sont fixé deux nouveaux buts : trouver une technologie plus avantageuse financièrement et en énergie consommée pour sa fabrication. C'est en s'inspirant de la nature, plus précisément de la photosynthèse végétale, que le chimiste suisse reproduit une photosynthèse artificielle au sein de l'EPFL. Ainsi un nouveau type de cellules solaires va être inventé, les cellules à pigments photosensibles ou cellules DSC (Dye Solar Cell).

Elle fonctionne comme une plante. La chlorophylle, le vert de la plante, absorbe la lumière. Dans la cellule photovoltaïque c'est un colorant accroché à une couche de céramique. La membrane des feuilles transporte le soleil transformé en glucide. Dans la photopile solaire, c'est un matériau bon marché qui conduit le courant.



<sup>11</sup> Salon international de l'énergie photovoltaïque ayant lieu chaque année à Tokyo.

**Rapport d'un après-midi à l'EPFL**, dans le bâtiment principal de chimie, pour une construction d'une cellule photovoltaïque à colorant naturel :

Nous sommes un vendredi après-midi, où dans un des bâtiments historiques de l'EPFL. Inauguré en 1978, c'est effectivement le site le plus ancien de cette école. A mon arrivée dans le labo, tout est prêt et m'attend déjà. Je n'ai plus qu'à m'asseoir et à écouter les instructions pour le déroulement de la manipulation.

La conception de ce type de pile solaire (et qui fonctionne!) ne requiert que peu d'éléments et est accessible à tout le monde. On pourrait parler d'un modèle d'une photopile tout public. C'est ce qui la rend aussi intéressante, car on pourrait envisager qu'elle puisse être vendue en forme de kit. Le montage simple permettrait une énergie propre à la portée de tous. Par sa simplicité et son coût nettement inférieur, elle pourrait ainsi susciter bien plus d'intérêt que les photopiles précédentes.

Le matériel que j'ai utilisé lors de cette manipulation est constitué de quelques éléments simples :

- quelques framboises
- une solution iodurée servant d'électrolyte<sup>12</sup>
- une plaquette de verre transparente avec sur un côté un film poreux de  $\text{TiO}_2$  (dioxyde de titane)<sup>13</sup>
- une plaquette de verre transparente avec un côté rugueux (deviendra la face conductrice avec un catalyseur)
- un crayon (pour le graphite qui jouera le rôle de catalyseur)



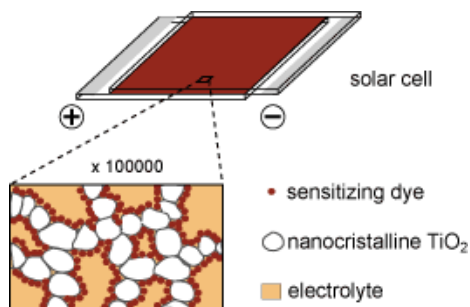
<sup>12</sup> L'électrolyte utilisé dans la manipulation était un mélange d'iodure de lithium (LiI) et de iode ( $\text{I}_2$ ) dans l'éthylène glycol tel que la solution contenait approximativement 0.8 M de ions  $\text{I}^-$  et 0.15 M de triiodure ( $\text{I}_3^-$ ). Le triiodure provient de la combinaison (réversible) d'un ion  $\text{I}^-$  avec une molécule de  $\text{I}_2$ .

<sup>13</sup> Le dioxyde de titane est un matériau relativement courant. De par son indice de réfraction élevé, il est très utilisé en particulier comme pigment dans les peintures blanches, le papier, le dentifrice,... Ce composé est obtenu par hydrolyse du tétrachlorure de titane  $\text{TiCl}_4$ , lui-même tiré du traitement par le chlore gazeux de minéral de fer, où le titane se trouve très souvent sous forme d'impureté. Le prix du  $\text{TiO}_2$  n'est pas négligeable, même si en vrac son prix en février n'était que de l'ordre de 2'500 \$ la tonne (env. 2.50 frs/ kg). Un pigment de bonne qualité ou un produit de départ tel que le  $\text{TiCl}_4$  pur a un prix de détail beaucoup plus élevé qui porte le coût du  $\text{TiO}_2$  dans une pile solaire à près de 25 frs/ m<sup>2</sup> de panneau.

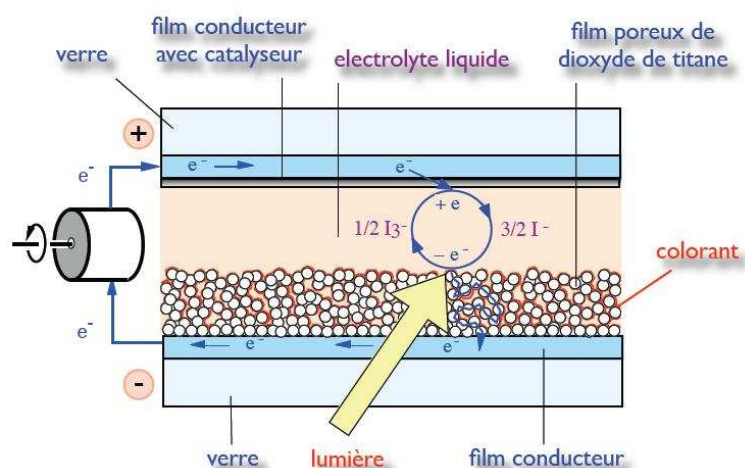
La procédure que j'ai suivie reste tout aussi simple :

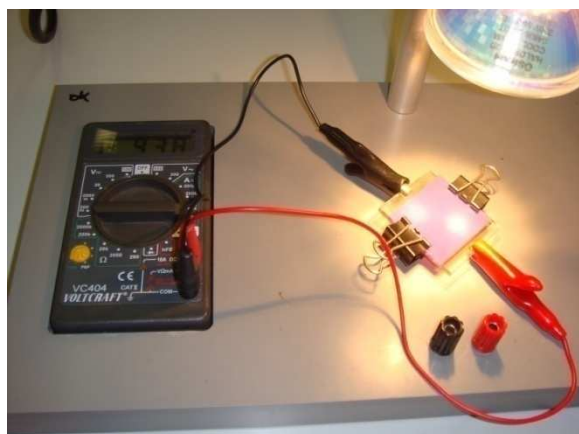
1. J'ai commencé par écraser les framboises, le jus de celles-ci est un colorant, l'anthocyanine. Il faut bien noter que les molécules du colorant utilisé doivent rester attachées au  $\text{TiO}_2$ , l'anthocyanine a donc cette propriété.
2. La mise en contact la surface de  $\text{TiO}_2$  du verre en contact avec le colorant s'ensuit.
3. Ensuite, je suis passée à la préparation du catalyseur. Il suffit de « gribouiller » le côté rugueux de la seconde plaquette, qui est le côté conducteur. Le semi-conducteur sur cette plaquette est transparent mais on reconnaît cette dernière en la testant avec un ohm-mètre. Il faut veiller à garder une couche de graphite la plus uniforme possible, on obtient ainsi une plus grande surface de catalyseur.
4. La prochaine étape consiste à rincer la plaquette de  $\text{TiO}_2$  afin de ne garder que le colorant et à éponger délicatement l'eau à l'intérieur des pores pour que l'électrolyte rajouté puisse avoir une place.
5. J'ai ajouté 3 gouttes d'électrolyte à l'aide d'une pipette, afin d'assurer la conduction de la cellule.
6. Puis, j'ai déposé la plaquette avec le film conducteur et le catalyseur sur celle du  $\text{TiO}_2$ . Le graphite a ainsi pénétré dans les pores de ce dernier. Il faut maintenir les deux plaquettes ensemble à l'aide de petites pinces et bien veiller à les mettre le plus au bord possible afin de garder une surface maximum d'irradiation.
7. Pour voir si le système fonctionne, il suffit d'allumer la lampe et d'irradier à travers le  $\text{TiO}_2$ . En branchant le système sur le petit moteur de l'EPFL on constate qu'un courant est bien établi. Pour regarder le potentiel, on branche le système à un multimètre. Afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles, on déplace simplement les plaquettes pour trouver le meilleur point d'irradiation.

(1) Composition d'une cellule à colorant sensibilisateur, <http://www.solaronix.ch/technology/dyesolarcells/>



(2) Principe d'une cellule DSC, image tirée d'un document de L'EPFL





Les meilleurs résultats que j'ai obtenus sont: une intensité de 9.52 mA (milliampère) et une tension de 0.48 V. La puissance de cette photopile est de  $9.25 \text{ mA} \times 0.48 \text{ V} = 4.56 \text{ mW}$ .

Pour me donner une meilleure idée de quoi cela pouvait représenter, j'ai calculé l'énergie générée sur une année. En comptant que la cellule est irradiée en moyenne 12h par jour (comme elle fonctionne parfaitement sous la lumière diffuse et artificielle), j'obtiens un résultat de 2 Wh en 365 jours !

A l'EPFL le meilleur voltage d'une cellule photovoltaïque à colorant a été obtenu avec le complexe de Ru II : 0.8V. Le complexe de Ru II est un colorant synthétisé, il est totalement artificiel et possède les meilleures propriétés. Avec une intensité de  $16.9 \text{ mA/cm}^2$  soit de  $169 \text{ A/m}^2$ , la puissance d'une telle photopile est de  $169 \text{ A} \times 0.8 \text{ V} = 135.2 \text{ W}$  dans des conditions idéales. Sur un an, toujours avec une irradiation de 12h par jour, on obtiendrait environ 5.92 kWh par  $\text{m}^2$ .

Il faut  $8 \text{ m}^2$  à un module commercialisé à base de silicium pour produire environ 1'000 kWh par année, en comparaison la cellule DSC produit tout juste la moitié.

Il reste certes encore des progrès à faire mais on constate qu'une telle photopile, à partir de très peu de chose, fonctionne. Qu'à partir d'un procédé naturel on arrive à obtenir de l'électricité.

L'argument clé du professeur Grätzel est qu'il ne faut pas oublier que la photosynthèse marche bien depuis 3.5 milliards d'années donc nous avons un principe qui a fait ses preuves.

Les cellules Grätzel sont promises à un bel avenir. Celles-ci reviennent au quart du prix des cellules traditionnelles. Leur rendement n'est pas aussi bon que celui des cellules traditionnelles mais leur structure offre des possibilités d'intégration bien plus variées. La différence d'énergie produite pourrait être largement compensée par une production et une installation plus importantes.

Voici les avantages de ces cellules par rapport aux cellules à base de silicium :

- Un faible coût de fabrication
- L'énergie nécessaire à la production est réduite d'un facteur 6. Ce n'est plus 3 ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à leur fabrication, mais 6 mois.
- Les performances des cellules DSC sont peu dépendantes de l'angle d'incidence de la lumière
- Un rendement accru à basse intensité solaire et en lumière du jour diffuse
- Une possibilité d'utilisation bifaciale
- La coloration des cellules DSC ainsi que leur aspect sont variables



Photo tirée d'une présentation Powerpoint de l'EPFL

Les photopiles de Grätzel sont de réelles clés pour de nouvelles applications et par ailleurs des clés pour généraliser l'utilisation de l'énergie solaire. Leur facilité d'intégration, les choix de couleurs, leur transparence, leur flexibilité ainsi que leur légèreté sont des atouts considérables à l'heure actuelle.

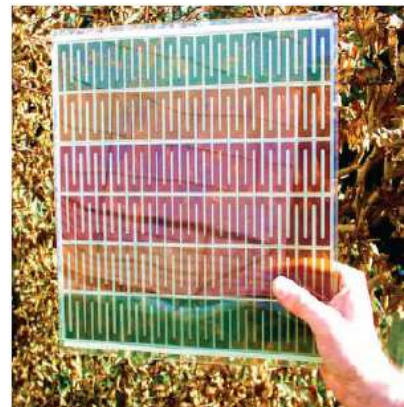
On pourrait penser que les avantages de ces cellules permettent de concurrencer les précédentes et on pourrait se demander pourquoi elles ne sont pas encore commercialisées. Remplacer les anciennes technologies prend du temps, de plus la concurrence pose une immense barrière. Les industries, produisant des panneaux photovoltaïques à base de silicium par exemple, ont réalisé un investissement considérable, ils souhaitent que ce dernier leur rapporte le plus possible et ils ne sont donc pas prêts à se tourner vers une nouvelle technologie.

Au Japon la beauté et donc le design comptent beaucoup. Très innovateurs, les Japonais ont investi massivement dans cette technologie.

Comme dit plus haut ces cellules transparentes peuvent être imprimées sur des surfaces souples, intégrées à des façades ou des vitres. C'est ainsi une filiale très importante pour le Japon, car ils n'ont pas assez de place et ne mettre des modules solaires que sur les toits, ce n'est pas suffisant avec tous les millions d'habitants.

Une start-up<sup>14</sup> japonaise alliée à un producteur de Taïwan, se sert de ces cellules suisses pour faire des applications variées et prévoit déjà d'ici peu de commercialiser des applications concrètes, des chargeurs pour appareils mobiles par exemple.

A mon avis, les Japonais avaient déjà compris il y a quelques années le potentiel de l'énergie solaire. Aujourd'hui, ils nous devancent de loin en matière de technologie. Peut-être ont-ils pris conscience des enjeux et s'activent déjà à changer leurs habitudes ainsi que leur système énergétique.



Images prises d'un document de l'EPFL

<sup>14</sup> Entreprise très récente du domaine des nouvelles technologies, à croissance ultrarapide.

## 6 Mise en œuvre du photovoltaïque et ses applications

Une seule **cellule photovoltaïque** ne pouvant produire une grande quantité d'électricité vu sa taille et son courant très faible, les fabricants regroupent les cellules en série afin de produire une énergie suffisante pour pouvoir charger une batterie. Comme les photopiles sont fragiles, le tout est encapsulé afin de les protéger des agressions extérieures, puis encadré pour renforcer la solidité. On obtient ainsi ce que l'on appelle un panneau solaire ou **module photovoltaïque**. Couramment ce sont des panneaux rectangulaires rigides, de quelques centimètres d'épaisseur et mesurant 0.5 à 3 m<sup>2</sup>.

Lorsque les panneaux sont connectés entre eux et fixés sur un support, on obtient un **champ photovoltaïque** fonctionnant comme une seule unité de production d'électricité. La puissance d'un champ ou d'un module s'exprime, comme la photopile, en watt crête. Pour calculer la puissance et le rendement, on peut dire que 8 à 10 m<sup>2</sup> de modules photovoltaïques donnent 1 kWc, ce qui permet de produire en Suisse annuellement 1'000 kWh d'électricité. L'installation revient à environ Fr. 10'000 CHF. Lorsque l'on calcule sur 10 ans, le courant électrique coûte environ 1.-/kWh. Les fabricants garantissent un fonctionnement des modules à 100% durant 20 à 25 ans. Après quoi, l'installation perd 20 % de sa puissance et n'est plus garantie aux intempéries.

Le solaire photovoltaïque peut être utilisé de deux manières :

- ☀ **Applications autonomes**
- ☀ **Applications raccordées**

### 6.1 Les applications autonomes

- ☀ **Les satellites en orbite**

Pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui répondent à toutes les contraintes. C'est par ailleurs l'utilisation la plus ancienne du photovoltaïque.

- ☀ **Les installations que l'on peut qualifier de professionnelles**

Les bornes de secours au bord des autoroutes ou les parcmètres sont des exemples courants.

*Horodateur ou parcmètre alimenté par l'énergie solaire,*  
<http://www.enerzine.com/1/1632+Des-parcsmetres-solaires-trustent-la-ville-de-NY+.html>



- ☀ **Les appareils portables**

Quand l'alimentation est de petite taille, même de très petite taille, l'énergie solaire à sa place sur des objets portables au même titre qu'une pile : les calculatrices, les montres et les horloges, certains petits appareils de mesures (sport ou météo par exemple).

### ☀ L'électrification rurale des sites isolés

#### L'habitat photovoltaïque autonome

Certains lieux sont difficiles d'accès et donc onéreux à raccorder au réseau électrique : chalets en montagnes, refuges, habitations dispersées dans les régions rurales un peu reculées mais aussi les villages dans les pays en voie de développement. Plus l'implantation est éloignée du réseau plus cette application est intéressante. Outre sur les habitations fixes, on trouve des panneaux solaires sur des bateaux, des caravanes ou des camping-cars, des lampes et des fontaines de jardins, des motorisations de portails et la liste est longue.

Plus simple au possible, une installation autonome se compose d'un module solaire, d'un accumulateur (batterie) et d'un régulateur de charge. Ce dernier assure la charge et la décharge de l'accumulateur. Pour alimenter en 230 V un appareil électroménager ou d'autres que l'on branche aux prises, il faut équiper l'installation d'un onduleur. Les panneaux solaires produisent un courant continu, or il faut passer au courant alternatif pour pouvoir utiliser nos appareils ménagers. Ainsi l'onduleur convertit le courant continu généré par les cellules solaires et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique.

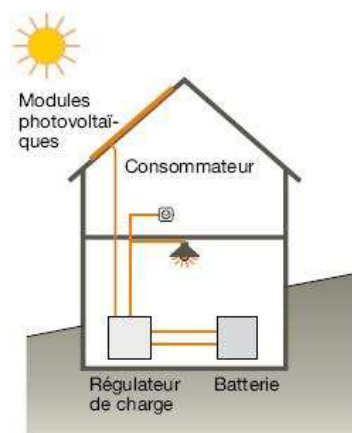


Schéma d'une installation autonome, [http://www.agena-energies.ch/sys\\_pac\\_phot.html](http://www.agena-energies.ch/sys_pac_phot.html)

## 6.2 Les applications raccordées au réseau

### ☀ Parcs photovoltaïques

Une quantité importante de modules sont posés sur des terrains ou sur des toits. Leur production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique. La surface de tels parcs va de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de quelques centaines de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts).

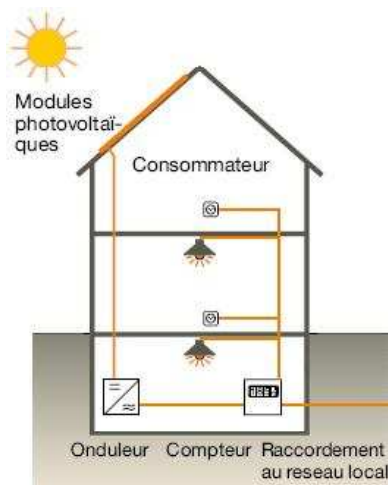
### ☀ Systèmes posés ou intégrés sur des structures

Même principe que pour les parcs, elles ne consomment pas l'électricité produite. Celle-ci est envoyée, en général aux alentours, pour une utilisation définie. Leur surface va en général de quelques centaines à quelques milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelques dizaines à quelques centaines de kilowatts-crêtes.



Ombrière de parking en France d'un supermarché, <http://www.sunvie.eu/sunvie-nos-references.html>

### ☀ Système attaché à un bâtiment



Les installations raccordées au réseau sont en général nettement plus grandes que les installations autonomes. La connexion électrique des modules se fait à l'aide d'un élément supplémentaire, le coffret de raccordement. Celui-ci contient normalement des dispositifs de protection contre la foudre et la surcharge engendrée par les modules.

Schéma d'une installation raccordée au réseau, [http://www.agena-energies.ch/sys\\_pac\\_phot.html](http://www.agena-energies.ch/sys_pac_phot.html)

### Quels besoins le photovoltaïque peut-il couvrir ?

La surface de 8 m<sup>2</sup> de modules solaires permet une puissance de 1kWc. Annuellement, cela fait une production de 1'000 kWh, soit entre 20 et 25% de la consommation électrique annuelle d'un ménage de 4 personnes. L'installation complète de 8 m<sup>2</sup> revient à 10'000 CHF.

Il faut savoir que produire son propre courant rapporte de l'argent. En Suisse, l'électricité renouvelable est obligatoirement rachetée par les compagnies ou les services locaux. La production photovoltaïque de chacun rapporte entre 72 et 98 centimes le kilowattheure.

En réalité, le producteur, qui a son installation raccordée au réseau, va vendre le courant qu'il produit, plutôt que de le consommer. En effet, en été lorsque l'installation va donner son maximum, les besoins du producteur seront faibles. La société électrique du lieu va donc pouvoir en profiter en rachetant le courant. En hiver au contraire, le propriétaire achètera son électricité à la compagnie, à un tarif plus bas que la sienne.

### Consommation annuelle d'un ménage en Suisse

En Suisse et d'après les fabricants, un ménage de 4 personnes consomme en moyenne 4'000 kWh chaque année.

Je me suis renseignée auprès de Suisse Romandie pour que je puisse obtenir la consommation d'électricité annuelle de ma famille en kWh. Du 7 février 2009 au 22 février 2010, nous avons consommé 3'794 kWh soit en moyenne 316 kWh/mois, tout en sachant que nous utilisons naturellement plus d'électricité en hiver qu'en été. Nous prenons soin de ne pas laisser la télévision tourner pour rien et nous éteignons les pièces que nous quittons. Cependant nous avons un nombre d'ordinateurs correspondant à celui de 4 personnes ce qui peut expliquer que notre consommation se rapproche de celle de 4 habitants, selon les statistiques d'AGENA.

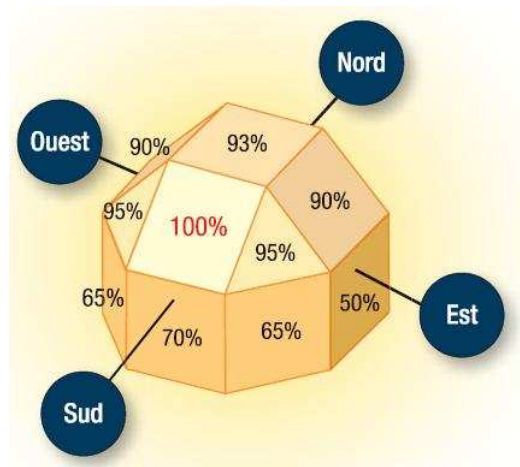
D'après <http://www.electricitepourdemain.ch/contents/consommation-deelectricite> qui se réfère à l'AES (Association des entreprises électriques suisses), un ménage en Suisse consomme en moyenne 5'500 KWh d'énergie électrique et ses besoins ne cessent d'augmenter.

Pour illustrer l'application du Photovoltaïque en réseau, j'ai souhaité prendre un exemple concret que j'ai surnommé le « Manège solaire ». Il est situé à St-Sulpice et appartient à M. Rham.

AGENA est une entreprise dont le but est la recherche, la fabrication et la diffusion de techniques de chauffage modernes, économes en énergie et respectant l'environnement. Spécialisée dans les domaines des énergies solaires, bois et les pompes à chaleur, AGENA réalise des installations permettant le chauffage de piscine, la production d'eau chaude et d'électricité ainsi qu'un système d'injection d'énergie électrique dans le réseau.

En visitant leur site internet j'ai découvert une réalisation photovoltaïque de cette entreprise située dans un village voisin, St-Sulpice. Par curiosité, je me suis rendue sur place, et j'y ai découvert un manège et quelques boxes à chevaux à côté d'une maison. Un employé de la petite écurie, à qui j'ai montré mon intérêt pour ces modules solaires, m'a invitée à prendre quelques photos. J'ai constaté que le côté de la toiture, dans laquelle étaient intégrés les capteurs solaires, était orienté en plein sud et possédait une inclinaison adéquate pour une réception optimale du rayonnement solaire.

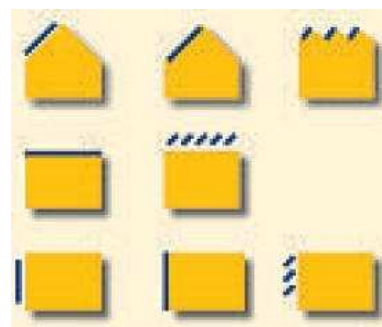
Photo du manège prise par moi-même au mois de mars, à 17h30. On y remarque l'intégration à la toiture ainsi que l'inclinaison.



Ci-dessus : [http://www.agena-energies.ch/Resources/AGENA\\_PV\\_2009.pdf](http://www.agena-energies.ch/Resources/AGENA_PV_2009.pdf),

Ci-dessous : [http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/solarwaerme/chaleur\\_soleil\\_maison\\_2007.pdf](http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/solarwaerme/chaleur_soleil_maison_2007.pdf)

Ces illustrations nous permettent en même temps de comparer l'apport énergétique suivant l'inclinaison des modules. Même face au sud, l'énergie solaire captée est différente. En prenant l'exemple pour un immeuble, car il n'y a pas que les maisons ou des manèges qui peuvent être équipés de modules photovoltaïques, on peut constater que des modules disposés sur une façade verticale d'un bâtiment ou d'un immeuble auront un captage solaire plus faible (70%) que si des rangées de capteurs avaient été installées sur le toit (93%). Le mieux serait avec une



inclinaison de 30°, on atteindrait ainsi, en conditions optimales, les 100% ! Cependant même si l'apport énergétique n'est pas 100%, il ne reste pas pour autant nul, donc il serait bon de l'exploiter au mieux !



A



B

A) Exemple de panneaux photovoltaïques installés en rangée sur le toit d'un bâtiment plat, [http://agen-energies.ch/galerie\\_PV\\_b\\_3/pages/page\\_1.html](http://agen-energies.ch/galerie_PV_b_3/pages/page_1.html)

B) Exemple de l'optimisation des façades d'un immeuble par l'intégration de panneau solaire photovoltaïque à la verticale, <http://www.bati-depot.fr/solaire/panneau-solaire/panneau-solaire-immeuble-solaire.html>

Revenons au manège solaire, le propriétaire du manège produit de l'électricité pour l'injecter dans le réseau. Le total de son installation s'élève à 125 m<sup>2</sup>, ce sont 96 modules au silicium cristallin intégrés dans la toiture, c'est-à-dire directement sur la charpente. Comme la puissance de l'installation est de 18.2 kW<sub>c</sub>, ce sont pas loin de 18'200 kWh produit chaque année. Sur un côté du toit, il y a donc de quoi subvenir aux besoins en électricité de 4 ménages, composés chacun de 4 personnes !

## 7 Réflexion personnelle

Lorsque j'ai rencontré le Prof. Moser à l'EPFL, je l'ai écouté attentivement mais avec un esprit critique. Le sentiment qu'il m'a laissé est que seule l'énergie solaire pouvait subvenir à nos besoins. Je ne partage pas cet avis. Je pense plutôt au soleil, comme à une source d'énergie mondiale, utilisée par tous, mais où chaque pays profiterait également des ressources propres et favorables à sa géographie, telle que l'énergie hydraulique en Suisse.

Je pense que la barrière du photovoltaïque, et donc de l'énergie solaire, reste le coût. Ce n'est, d'après mes recherches, pas dû à un rendement qu'on qualifie de pas assez élevé, car il suffit de mettre plus de panneaux solaires pour compenser. Et ce n'est ni un problème de place, des toits nous en avons autant que nous voulons.

La technologie du photovoltaïque est si prometteuse qu'il suffit d'un peu de temps et de la patience pour arriver à doubler le rendement actuel, résultats qui sont déjà atteignables en laboratoire.

De plus, l'actuelle dernière génération offrent de multiples portes et possibilités pour l'intégration du photovoltaïque dans notre quotidien, plus que de la simple intégration aux toitures que nous offrent déjà les 2 premières générations. M. Grätzel a-t-il trouvé l'énergie pour tous, non polluante et bon marché ? Je pense que oui.

L'économie et le marché, mais aussi les habitudes de chacun, posent problème.

L'énergie, sous n'importe quelle forme, nous concerne tous. Il serait bon que nous apprenions à modérer notre consommation d'énergie et à changer nos habitudes. Car, lorsque nous devons nous contenter d'énergies renouvelables, telles que nous les connaissons aujourd'hui, une prise de conscience sera nécessaire.

## Sources

### Images de la page-titre :

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gleisdorf.Solarbaum.jpg>

[http://www.sses.ch/sses\\_1.php?data\\_4fs=14](http://www.sses.ch/sses_1.php?data_4fs=14)

<http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/cellules-photovoltaiques.html>

### Bibliographie :

*Physique Chimie, Sciences expérimentales*, Paul Avanzi, Alain Kespy, Jaques Perret-Gentil et Daniel Pfistner, Editions L.E.P., Lausanne, 2001

*Atlas des énergies, Quels choix pour quel développement ?*, Bertrand Barré, Editions Autrement, Collection Atlas/Monde, Paris, 2007

*Les enjeux de l'énergie : pétrole, nucléaire, et après ?*, Ludovic Mons, Petite Encyclopédie Larousse, 2005

*Les énergies renouvelables : Histoire, état des lieux et perspectives*, Jean-Christian Liébard, La Bibliothèque du naturaliste, Delachaux et Niestlé, Paris, 2001

*L'énergie solaire*, Benjamin Dessus et François Pharabod, Que sais-je ?, Presses Universitaires de France, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 2002

*Les bases de l'énergie photovoltaïque*, A. Labouret, P. Cumunel, J-P. Braun, B. Faraggi, Editions techniques et scientifiques françaises, 3<sup>e</sup> édition, Paris, 2001

*Energie solaire photovoltaïque*, A. Labouret, M. Villoz, Editions Le Moniteur, 3<sup>e</sup> édition, Paris, 2006

### Webographie :

<http://www.agena-energies.ch>

<http://www.fnh.org/naturoscope/Energie.htm>

<http://www.planete-energies.com>

<http://www.ef4.be/>

<http://www.wwf.ch/fr/lewwf/notremission/climat/energies/>

<http://www.bfe.admin.ch>

<http://www.bfs.admin.ch>

<http://www.aee.ch/fr/aee/erneuerbare-energien.html>

<http://www.solideas.com/solrcell/french.html>

<http://www.solaronix.ch/technology/dyesolarcells/>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_hydro%C3%A9lectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydro%C3%A9lectrique)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_%C3%A9olienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_Gr%C3%A4tzel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_Gr%C3%A4tzel)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule\\_photovolta%C3%AFque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_en\\_Suisse](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Suisse)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire)

[http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009\\_es\\_french.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_french.pdf)

[http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008\\_es\\_french.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_french.pdf)

[http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2007/WEO\\_french.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2007/WEO_french.pdf)

[http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2006/french\\_sum\\_06.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2006/french_sum_06.pdf)

## Annexes

### Témoignage d'une personne utilisant le solaire photovoltaïque de manière autonome

« Le solaire pour un camping-car »

Un camper est idéal pour passer des vacances, il y a tout pour vivre : cuisine, douche, un grand réservoir d'eau, l'eau est chauffée au gaz et le frigo refroidi également au gaz. Le seul inconvénient, c'est l'électricité. On en a besoin même l'été pour enclencher le chauffe-eau, pour faire fonctionner la pompe à eau, pour les plus gros consommateurs comme l'éclairage, la radio, voire la télévision lors de mauvais temps.



Quelques explications sont nécessaires pour comprendre le système des batteries et de leur charge.

Il y a 2 batteries dans un camper, la 1<sup>ère</sup> ne sert que pour le démarrage du véhicule., elle doit être capable de fournir un énorme intensité pendant un court instant, intensité de l'ordre de 4 à 500 ampères, ensuite la consommation est pratiquement nulle pour un moteur diesel, sauf pour les phares si on roule de nuit ou la radio, l'alternateur d'environ 120 Ah, régulé à environ 14V, compense rapidement la perte due au démarrage. Une capacité de 60 Ah suffit largement.

La 2<sup>ème</sup> batterie est séparée et ne sert que pour la partie habitation. Si le moteur tourne, l'alternateur charge déjà la 1<sup>ère</sup> batterie et dès que celle-ci est pleine, il charge alors la 2<sup>ème</sup>. Il faut alors rouler longtemps pour charger les deux batteries

Cette 2<sup>ème</sup> batterie n'a pas besoin de donner un courant aussi fort que celle de démarrage, c'est pourquoi il vaut mieux choisir une batterie à décharge lente, d'une capacité le plus élevée possible, 100 à 120 Ah est idéal.

Dans notre camper, je n'ai pu mettre qu'une batterie de 100 Ah, par manque de place. En effet, plus la capacité est grande plus la batterie est grosse, plus longue, plus large et plus haute. J'ai également installé un convertisseur 12 V-230V de 3500 W, pour charger mon Swisstrac<sup>15</sup>, pour brancher un sèche-cheveux, un micro-onde... , tout ce qui peut fonctionner au 230V.

<sup>15</sup> Sorte de tracteur électrique pour fauteuil roulant.



Le seul inconvénient de ces batteries, c'est qu'elles ne doivent pas être déchargées en dessous de 10 volts, sinon elles ne reprennent plus la charge. Une sécurité coupe le courant à 10.2 V.

En étant très économe, cette capacité de batterie tient environ 2 semaines. En passant des vacances à la mer, la pompe à eau pour les douches pour enlever le sel tourne plus, on se couche plus tard, donc la consommation d'électricité augmente.

Le premier montage solaire effectué est un ventilateur de plafond. La chaleur s'accumule vite dans ces véhicules et les nuits deviennent étouffantes. J'ai trouvé, aux USA, un petit ventilateur solaire prévu pour les bateaux, avec une force d'aspiration de 600 litres d'air par heure, de plus équipé d'un accumulateur au format d'une pile standard. De ce fait, il tourne 24h/24h, ce qui rafraîchit l'atmosphère en continu.

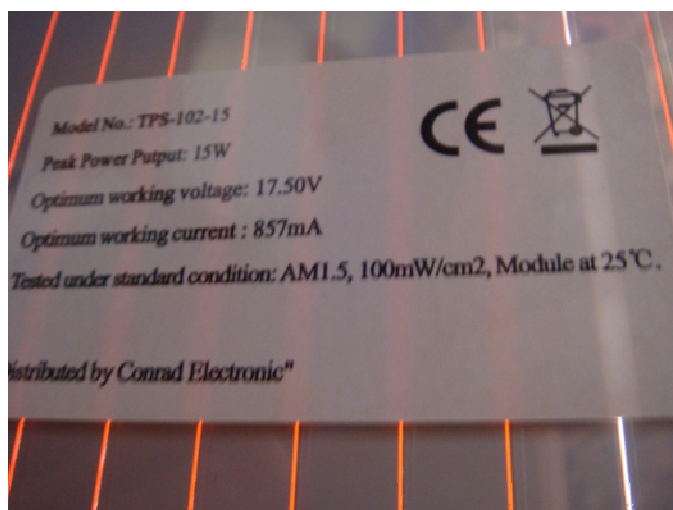
La décision de monter un panneau solaire m'est alors venue pour passer nos vacances en Grèce.

Nous voulions rester une semaine au moins en bord de mer. Mon choix s'est porté sur un panneau chargeant aussi le plus possible en étant à l'ombre ou en cas de temps couvert, d'une dimension légèrement plus grande que la fenêtre de la capucine qui est bien inclinée, je voulais un montage intérieur, derrière cette fenêtre afin d'éviter de monter sur le toit pour le nettoyer : une grande feuille d'arbre tombant dessus peut diminuer le rendement de plus de la moitié, comme on stationne sous les arbres...

J'en ai trouvé un de 20W, qui convenait parfaitement, de plus à un prix abordable, d'environ 0.4m<sup>2</sup>

Une journée pour lui fabriquer un support sans faire de trous dans les parois, inclinable facilement pour le nettoyage et le voilà prêt à être branché.

J'ai mesuré la tension en plein soleil à environ 25°, le panneau fournissait 19 V, donc 5 volts de plus que ce que la charge d'une batterie de 12V peut supporter. Il était alors aussi indispensable d'installer un régulateur entre le panneau solaire et la batterie.



Ce régulateur a aussi une autre fonction importante : il empêche le déchargement de la batterie lorsque le panneau solaire ne charge plus, par ex. pendant la nuit (fonction anti-retour).

Une diode verte indiquant que la batterie charge, une diode rouge si la charge est faible ou nulle.

Nous avons ainsi passé nos vacances avec toute l'électricité dont nous avons eu besoin, sans nous faire aucun souci.

Le meilleur constat de l'efficacité à été fait ce printemps : après environ 5 mois d'arrêt, la batterie de démarrage a dû être chargée car elle affichait environ 10.6 volts, ce qui rend, bien sûr, impossible de démarrer, phares faibles, etc.

La batterie de l'habitacle indiquait... 12.2 volts, toutes les lumières et les accessoires fonctionnaient parfaitement bien.

C'est un petit, tout petit panneau solaire par rapport aux gros que l'on peut voir sur les toits de maisons, mais largement suffisant pour l'usage d'un camping-car.



Michel Torny

Quelques photos du « manège solaire »

