



Super
KIMY

PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAIQUES

LE CONTEXTE : LES ENERGIES RENOUVELABLES

Le vingtième siècle a mis en évidence un problème préoccupant : nous consommons actuellement, sans les reconstituer, les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) dont le stockage s'est effectué durant des millions d'années. De plus, l'utilisation de ces ressources fossiles génère d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO_2), actuellement source d'inconvénients majeurs pour la planète. C'est donc la différence entre vitesses de formation et de consommation de ces ressources qu'il faut bien avoir à l'esprit : elle est la cause de l'augmentation rapide de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, puis dans les mers (le cycle pour ce dernier cas est de l'ordre de 10 siècles). Lorsque l'on sait qu'un excès de dioxyde de carbone par rapport à l'équilibre dit « calco-carbonique » provoque la mise en solution du carbonate de calcium, matériau de constitution des coraux et autres carapaces de crustacés, on comprend que certaines conséquences ne seront pas banales. La réaction générale s'écrit simplement :



Un excès de CO_2 favorisera donc la transformation de la gauche vers la droite, alors que c'est l'inverse qui se produit actuellement. En d'autres termes, le dioxyde de carbone (c'est un acide) peut libérer le carbonate (c'est une base) du solide où il est engagé.

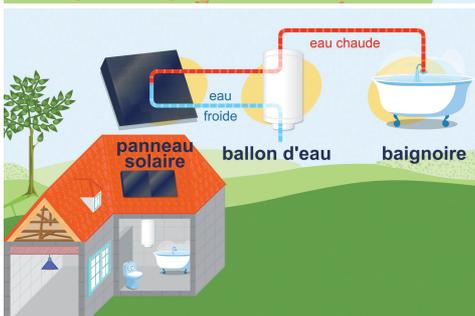
Pour s'affranchir des énergies «fossiles», il faut se tourner vers le concept d'énergie « renouvelable ». Il s'agit de convertir au mieux l'énergie solaire, qui est le seul vrai réservoir inépuisable, car c'est bien le soleil qui est à l'origine de plusieurs types de phénomènes :



- L'évaporation de l'eau (des mers, des fleuves, ...) avant sa condensation sous forme de pluies qui alimentent les barrages et font tourner des turbines à plus basse altitude.



- Les vents et donc l'énergie éolienne, car l'air chaud, moins dense que l'air froid, s'élève en altitude, créant localement une aspiration et les vents correspondants.



- L'échauffement des panneaux solaires thermiques (donnant de l'eau chaude).





► La photosynthèse, productrice de la biomasse, et qui n'a pas d'autre source pour l'énergie qui lui est indispensable.

L'énergie lumineuse est mise en réserve dans les liaisons chimiques de la molécule de glucose $C_6H_{12}O_6$



Nous allons dire ici quelques mots sur les panneaux solaires photovoltaïques : le rayonnement solaire y provoque dans un semi-conducteur une séparation des charges électriques, ce qui engendre un courant électrique.

QUELQUES REPERES HISTORIQUES

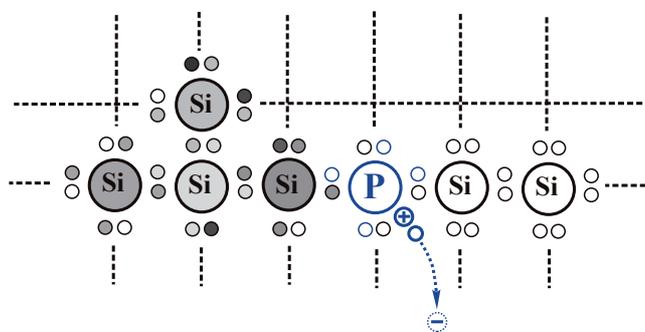
- C'est E. Becquerel qui fit la première observation d'un photocourant, dès 1839, avec une électrode en platine et l'autre en cuivre oxydé, plongées dans une solution conductrice acide.
- C'est encore au 19^e siècle que des propriétés semi-conductrices furent mises en évidence (1877), par WG Adams et RE Day, sur le sélénium.
- Il fallut attendre le vingtième siècle pour avoir des résultats importants. L'interprétation théorique de l'effet photo-électrique par Einstein date de 1905, mais les véritables applications pratiques n'ont été réalisées que vers le milieu du siècle : en 1941, la première jonction p-n dans le silicium, puis l'obtention d'une cellule à bon rendement (construite par les chercheurs de la Bell Telephone Laboratories en 1955) et les fameux transistors. Le grand public, lui, connaissait surtout le germanium.

PRINCIPE DES SEMI-CONDUCTEURS

I - SEMI-CONDUCTEURS DE TYPES n ET p

Un semi-conducteur est un composé dont la conductivité électrique (plus forte que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO_2 , donc très abondant dans la nature. La figure montre comment se font les liaisons dans un cristal de silicium (cf fig. 1a) : chaque Si comporte 4 électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique, comme le phosphore P et le bore B, qui ont respectivement un électron périphérique en plus et un électron périphérique en moins que le silicium. Si de temps en temps un atome P remplace un Si (c'est une impureté représentant une fraction de %), il apporte non pas quatre, mais cinq électrons, et se trouve avec neuf électrons périphériques, configuration qui n'est plus stable. Un électron (bord bleu épais) a donc tendance à quitter ce système où il n'est pas bienvenu, et devient alors une **charge négative mobile** (entourée de pointillés), laissant donc derrière elle une **charge positive fixe** (trait gras), liée à l'atome de phosphore. Le caractère négatif de la charge mobile a donné à ce type de semi-conducteur son appellation « de type n ».

Le cas du semi-conducteur « de type p » est symétrique du précédent. L'atome de bore (B) n'a que trois électrons périphériques et, dans ce cristal, il a besoin d'en retrouver un supplémentaire avec l'arrivée de l'électron en pointillés. Ce dernier devient alors fixe, lié au bore. C'est l'équivalent d'une charge positive (défaut d'électron) quittant l'atome de bore pour devenir un « trou » positif mobile. En somme, pour revenir à 4 électrons comme Si, les impuretés libèrent un électron (cas de P) ou en capturent un (cas de B).



Electrons du silicium : ● ● ● ●, etc.
 Electrons du phosphore : ○ ○ ○ ○ ○
 Electron supplémentaire du phosphore : ●, donnant une charge mobile ●⁻
 et laissant un trou : ⊕

Fig. 1a - Semi-conducteur de type n

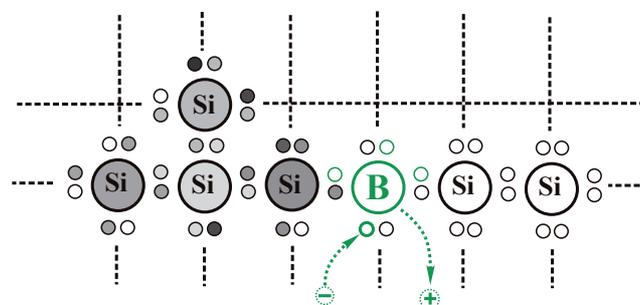


Fig. 1b - Semi-conducteur de type p

II - LA JONCTION n - p

Si une partie d'un semi-conducteur est « dopée n », et l'autre « p », les deux étant séparées par un plan dit de jonction, les charges électriques mobiles de la zone n sont les électrons (majoritaires) et les charges fixes celles de l'élément dopant (phosphore par exemple); inversement, dans la zone p les trous positifs (absences d'électrons) sont mobiles et les électrons du dopant (B par exemple) sont fixes. En l'absence de tension électrique extérieure, les charges mobiles migrent vers le plan de jonction (où elles se recombinaient : fig. 2a), laissant derrière elles des charges fixes. Ces dernières sont la source d'un champ électrique intense, dirigé de n vers p, repoussant les charges mobiles éventuelles vers les deux extrémités (fig. 2b) : la région voisine du plan de jonction est alors désertée par les charges mobiles.

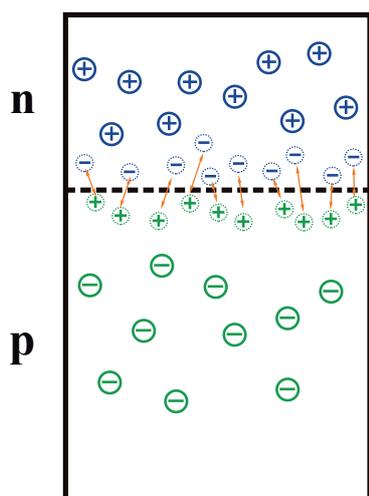


Fig. 2a - Migration des charges mobiles vers le plan de jonction

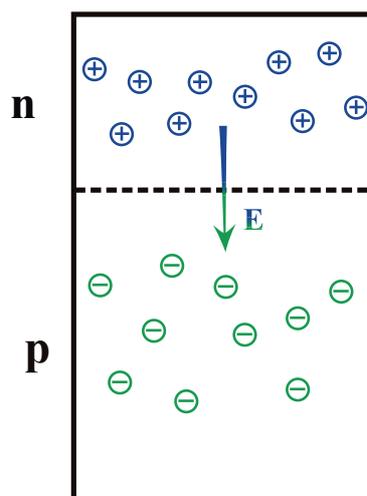


Fig. 2b - Champ électrique E résultant, dû aux charges fixes

III - CELLULE SOUS ECLAIREMENT

Nous fermons maintenant un circuit électrique comportant une jonction n-p et éclairons la partie n (très mince). Lorsque des photons lumineux (énergie du soleil) munis d'une énergie suffisante pénètrent le cristal, ils arrachent des électrons supplémentaires (fig. 3 et 4); l'excès de ces électrons aura tendance à quitter la zone n par l'extérieur ; ils sont en effet repoussés, comme nous venons de le voir, par le champ électrique très fort au voisinage du plan de jonction.

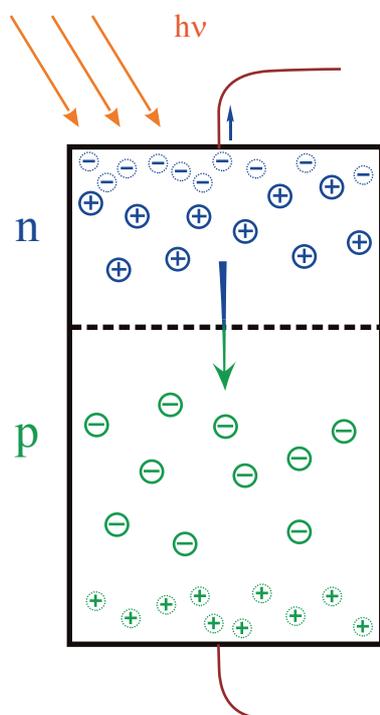


Fig. 3 - Jonction n-p éclairée

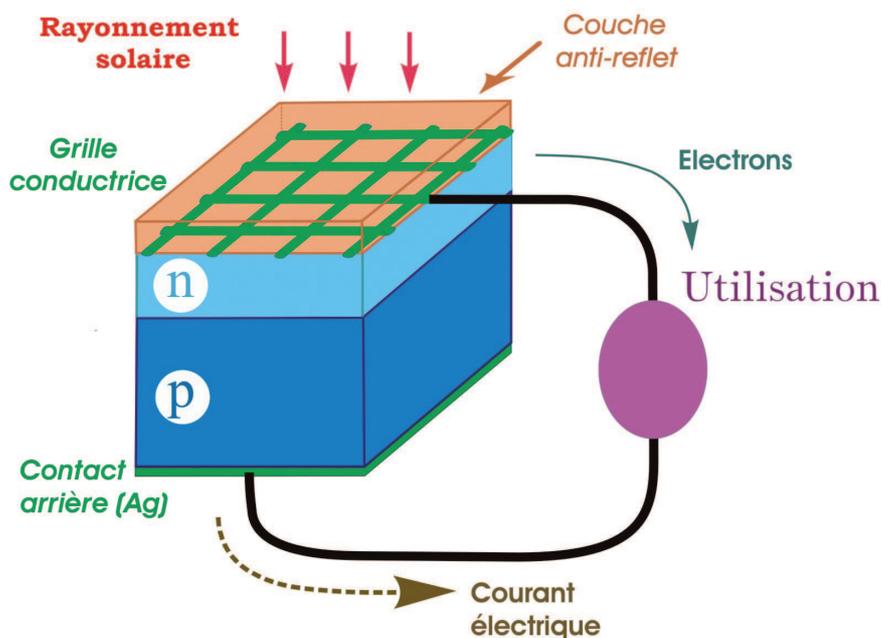


Fig. 4 - Cellule photovoltaïque

Il apparaît alors un courant dans le circuit extérieur (par définition dans le sens inverse de celui des électrons). C'est le photocourant, qui ne circule que dans un seul sens : de la zone p vers la zone n dans le circuit électrique (et de la zone n vers la zone p dans le semi-conducteur. L'origine du terme « semi-conducteur » est donc liée à ce sens unique de circulation du courant, ainsi qu'à la plus grande résistance à son passage (en comparaison de ce qui se passe pour les métaux). On obtient ainsi un convertisseur photovoltaïque, permettant l'obtention d'une différence de potentiel utilisable, source de courant électrique susceptible d'alimenter un appareil électrique.

IV - L'INTERACTION PHOTON - SEMI-CONDUCTEUR

Nous avons vu qu'en présence d'un circuit extérieur les électrons sont contraints de circuler. L'énergie nécessaire à leur mise en circulation dépend de la nature des atomes auxquels ils appartiennent. Einstein a montré l'existence d'une bande interdite caractéristique de chaque atome, barrière qu'il faut franchir pour mettre les électrons en mouvement. *Quand un semi-conducteur est exposé à un flux lumineux, les photons (énergie lumineuse) sont absorbés à condition que l'énergie du photon soit suffisante pour que l'électron puisse quitter la bande de valence (où il sert à assurer la cohésion de la structure) vers la bande de conduction (où il est mobile et capable de générer un courant électrique).*

Dans le cas du silicium, cette «barrière» à franchir nécessite une énergie minimum de 1,1 électron-Volt (eV) qui correspond à la partie la moins énergétique du rayonnement solaire (longueur d'onde voisine de 1 micromètre, située dans le proche infrarouge). Pour exploiter au mieux la totalité du spectre solaire, y compris la partie UV, on a été conduit à mettre dans la cellule photovoltaïque plusieurs jonctions différentes, superposées. Pour chacune d'elles, la bande interdite est adaptée à une partie donnée du spectre solaire : c'est ce qu'on appelle le concept de multijonctions.

Le rendement énergétique de la cellule, c'est-à-dire le pourcentage du rayonnement transformé en énergie

électrique, est nettement plus élevé et peut atteindre 41%.

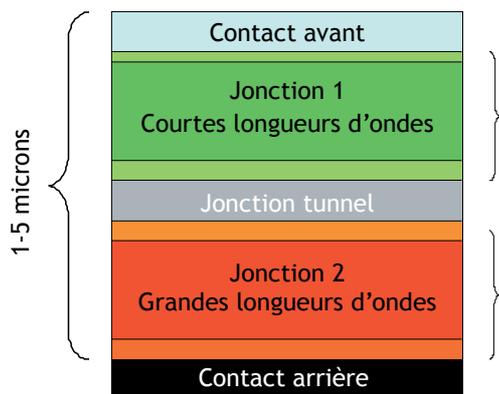


Fig. 5 - Cellule à double jonction
Avec l'aimable autorisation du Palais de la Découverte.

REALISATION PRATIQUE D'UN SEMI-CONDUCTEUR

Le silicium s'obtient en lingots de grandes dimensions. On y taille des plaquettes d'environ 200 micromètres d'épaisseur dont la teinte apparente est bleutée, après traitement anti-reflet.

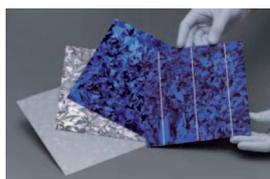


Fig. 6 - Cellule photovoltaïque
Avec l'aimable autorisation du Palais de la Découverte.

La face exposée au soleil est dopée au phosphore, donc de type **n**, l'autre est dopée au bore, donc de type **p**. Une grille conductrice déposée sur la surface laisse passer les photons : elle constitue le contact avant, surmonté d'un dépôt anti-reflet assurant le maximum de lumière.

Une couche conductrice d'argent (Ag) sert de contact arrière. La protection est assurée par du verre à vitre, avec une couche intermédiaire d'un polymère colle, efficace contre les agressions extérieures comme les impacts de grêle par exemple.

Les cellules encapsulées ont donc la solidité du verre.



Fig. 7 - Parc solaire de 10MWc installé à Pocking en Allemagne, capable d'alimenter 3 300 maisons en électricité.
Avec l'aimable autorisation du Palais de la Découverte.

Dans un système comme celui de la simple cellule, la différence de potentiel est d'environ un demi-volt, insuffisante la plupart du temps, pour une installation domestique par exemple. Il faut donc organiser les cellules en série pour augmenter la différence de potentiel, et en parallèle afin d'avoir des courants plus importants. La figure 8 montre le principe : quatre cellules en série (l'une après l'autre) donnent entre les deux extrémités quatre fois 0,6 volt, soit 2,4 V. En mettant une seconde série (fournissant le même courant) en parallèle avec la première (donc à côté), on double le courant qui passe à l'extérieur.

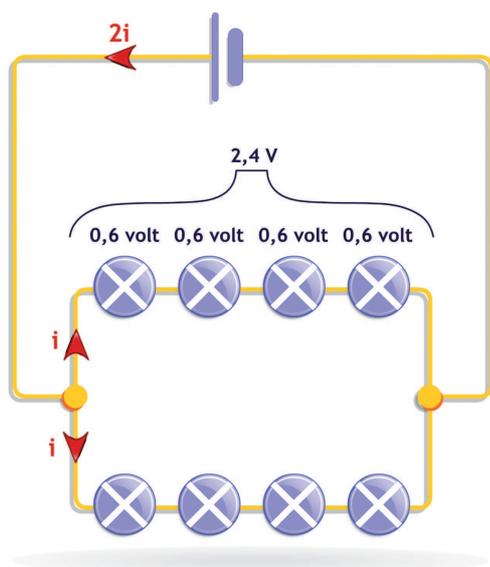


Fig. 8 - Circuit série parallèle

Un ensemble ainsi réalisé est alors appelé module photovoltaïque, avec des dimensions de l'ordre du mètre carré, délivrant environ une puissance de 100 à 150 Watt (W) à la latitude de l'Espagne en plein midi, exprimée par convention en Watt-crête (Wc). Rappelons que la puissance totale apportée par le rayonnement solaire est de l'ordre de 1 360 W/m² au voisinage de la terre, et de 1 000 W/m² au niveau du sol, du fait de l'absorption par l'atmosphère. Si l'on associe des modules photovoltaïques entre eux, on obtient un champ de modules qui constitue ce qu'on appelle une installation photovoltaïque. Les plus grosses installations peuvent atteindre aujourd'hui plusieurs millions de Watts.



Fig. 9 - Installation mc-Si, 750kWc

Avec l'aimable autorisation du Palais de la Découverte.

© Photowatt.

Cette énergie électrique est distribuée en courant continu ; elle peut l'être en courant alternatif grâce à des onduleurs. On peut, soit l'utiliser directement (stockage dans des batteries d'accumulateurs), soit l'injecter sur le réseau électrique, cette dernière option étant largement majoritaire.

Les autres qualités de ce type de dispositif sont la simplicité de montage, la sécurité et la longévité (de l'ordre de 20 ans). On en remarque de nos jours dans les rues, sur les horodateurs par exemple et, bien entendu, sur les toits des immeubles et des maisons (depuis plus longtemps encore sur les refuges de haute montagne).

LES DIFFERENTES FILIERES PHOTOVOLTAIQUES

Pour la filière « silicium » (assurant actuellement 94 % du marché), il faut distinguer plusieurs types de matériaux, car le rendement varie suivant la structure cristalline : il est plus élevé (jusqu'à 24 %) avec du silicium monocristallin que pour une phase polycristalline, et encore plus faible si elle est amorphe.

D'autres composés existent : le diséléniure de cuivre et d'indium (« CIS »), le tellure de cadmium (CdTe), mais aussi les composés appelés III-V (par référence à la classification périodique) du type GaAs et InP, qui appartiennent à la catégorie des cellules à plusieurs jonctions dont le rendement énergétique peut aller jusqu'à 40%.

À côté de ces filières bien établies sont apparues de nouvelles possibilités, fondées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, et qui n'en sont encore qu'à leurs balbutiements.

Les filières Si, CIS et CdTe sont actuellement les seules largement utilisées. Des unités de production, utilisant CIS ou CdTe et allant jusqu'à 500 MWc avec des rendements énergétiques de 10 à 20%, sont actuellement opérationnelles dans le monde.

FAISABILITE

NOUS ALLONS ICI REpondre A QUELQUES QUESTIONS RELATIVES AU DEVELOPPEMENT DE CE TYPE D'ENERGIE.

- EFFICACITE DU PHOTOVOLTAIQUE

L'énergie solaire reçue annuellement par un mètre carré de surface à la latitude de la France est de l'ordre de un million de Watt-heure (trois fois moins qu'au Sahara par exemple). Une seconde donnée est fournie par le rendement énergétique du photovoltaïque : de 10 % à 20%. La troisième concerne la production électrique française en un an : 550 térawatt-heure (550×10^{12} Wh), l'infrastructure routière représente en France seize mille kilomètres carrés. Si l'on décidait de n'utiliser que des panneaux photovoltaïques comme source d'énergie, il en faudrait donc quelque cinq mille kilomètres carrés (à 10% de rendement). Ce n'est excessif qu'à première vue : l'infrastructure routière représente en France seize mille kilomètres carrés. Une autre référence : en 1997, le pays comptait 10 700 km² de surface bâtie. C'est pourquoi les « toits photovoltaïques » sont un objectif général. Le Japon et l'Allemagne ont ouvert la voie, de même que la loi récente adoptée en Californie, visant l'objectif « un million de toits solaires ».

- POUR QUEL COUT ?

Le prix de revient du Watt-crête (Wc) n'est pas négligeable : il avoisine les 3 €. Il diminue au cours du temps, ne serait-ce que par accroissement du parc ; on s'attend à 0,7 € /Wc d'ici quelques années. La politique des États est importante dans ce contexte. La France, par exemple, a voté en juillet 2006 une loi permettant le rachat de cette énergie par EDF à un prix intéressant pour les particuliers qui optent pour des panneaux photovoltaïques.

- SITUATION ACTUELLE EN FRANCE

La croissance de la production de modules photovoltaïques est de l'ordre de 40 % par an. Toutefois, la puissance installée reste encore minime : elle correspond à une tranche de centrale nucléaire, soit environ 1% de la production française d'électricité.

Elle devrait atteindre de 3 à 12% en Europe en 2020, et augmenter encore par la suite.

EXPERIENCES ET ILLUSTRATIONS

- Mise en évidence du spectre lumineux : prisme pour voir la décomposition de la lumière, reproduction du spectre lumineux. Prévoir une source lumineuse : incandescence ou « fluo » (à vapeur de mercure) et une fente d'entrée (deux demi-lames à rasoir collées sur un support rigide et laissant passer la lumière), ainsi

qu'un objectif ou une lentille afin d'observer en lumière parallèle.

- Classification périodique des éléments pour voir où sont placés Si, P, B, Se, Cu, In, Ga, As, Cd, Te.
- Différences structurales entre cristal, polycristal, amorphe, en prenant l'exemple du carbone.
- Montrer une cellule photovoltaïque, par exemple dans le cas d'un éclairage de jardin.
- Courant continu, courant alternatif, onduleur.
- Concepts d'énergie et de puissance : Watt (W) et ses multiples (kW, MW, GW, TW), Watt-heure, Watt/m².