



DE LA FORCE MUSCULAIRE AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'énergie a différentes formes et représente ce qui est dépensé lorsque l'on observe des transformations :

- énergie mécanique lorsqu'un objet se déplace ;
- énergie thermique lorsqu'un objet modifie sa température ou lorsqu'un corps change d'état (évaporation, condensation, sublimation, cristallisation) ;
- énergie chimique lorsque la nature des corps se transforme (combustion, réaction chimique).

L'énergie est nécessaire à la vie puisque celle-ci n'est qu'une suite de transformations et de mouvements. Elle est donc nécessaire à l'existence de l'Homme et son origine est le Soleil grâce à son rayonnement.

Une brève histoire de l'énergie

L'énergie est nécessaire à l'activité de l'homme qui vient d'abord du corps humain (le cerveau, les muscles) qui tire lui-même son énergie de son alimentation, elle-même le produit de l'agriculture rendue possible par le rayonnement solaire.



Figure 1

Les énergies de l'ancien temps : la traction animale ; les roues à aubes ; les moulins.

L'Homme, tout au long de son histoire, a découvert et développé différentes formes d'énergie et les a utilisées dans l'évolution de ses sociétés. Les figures 2 et 3 résument de la préhistoire à nos jours les grandes périodes énergétiques et leurs applications.



Figure 2

Au cours du temps, l'Homme a trouvé de nouveaux moyens de produire de l'énergie. Cela lui a ouvert de nouvelles possibilités techniques.

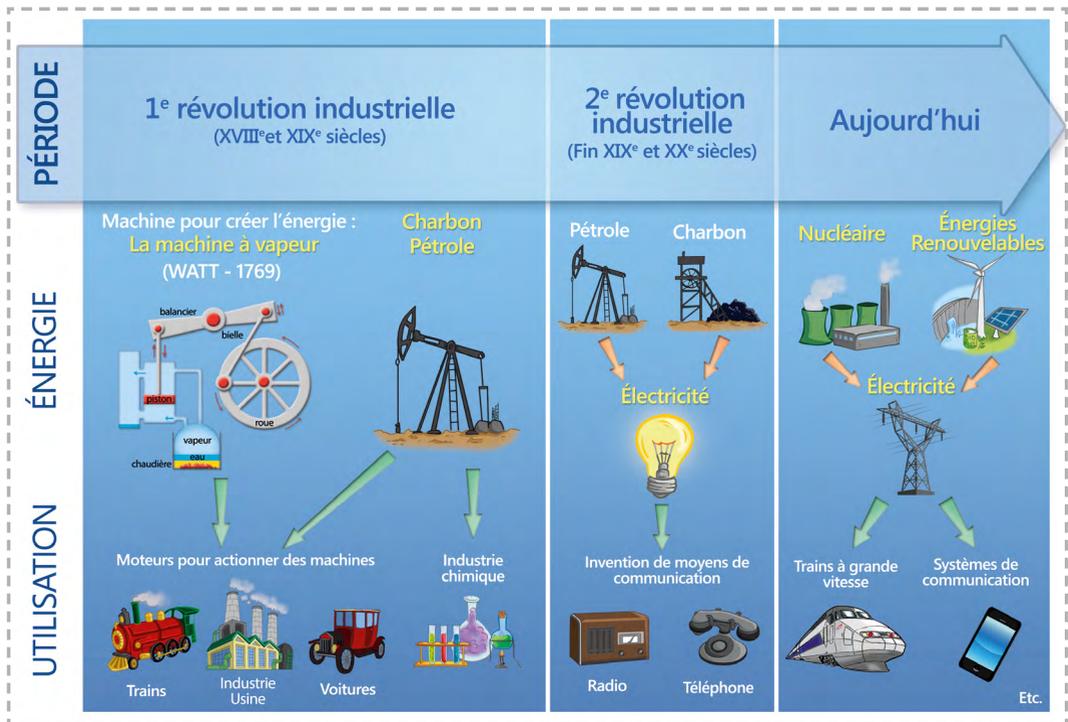


Figure 3

Depuis deux siècles, on découvre des moyens extraordinaires de produire de l'énergie ou de la domestiquer – l'électricité par exemple. Le développement technologique actuel (transports, communication, etc.) en est la conséquence.

L'énergie d'aujourd'hui

Depuis la deuxième révolution industrielle, on consomme tous beaucoup trop d'énergie. Progressivement, la source d'énergie privilégiée est devenue le pétrole, qui est facilement transportable et convient bien aux moyens de transport motorisés.

Par ailleurs, l'industrie s'est fortement développée (les transports, les bâtiments, l'éclairage, le vêtement, la fabrication des téléphones, etc.) et requiert énormément d'énergie.

Pendant longtemps, tout s'est passé comme si le pétrole était inépuisable sur la Terre. Aujourd'hui, on comprend que ce n'est pas vrai : en 50 ans, l'homme a extrait du sous-sol de la planète la moitié du pétrole qui y était contenu. On sait que l'on ne pourra pas continuer



à l'exploiter au même rythme. Comment faire avec notre civilisation basée sur le pétrole alors que celui-ci menace de faire défaut ?



Figure 4

Le pétrole s'épuise. Il faut inventer autre chose et changer nos habitudes de vie.

Une grosse difficulté vient de notre utilisation d'énergie : c'est la pollution. Le charbon, le gaz, le pétrole produisent du gaz carbonique (CO₂) quand on les utilise. Ce gaz carbonique est peut être à l'origine du réchauffement du climat qui vient perturber toute notre planète – et on voudrait ne plus en produire.

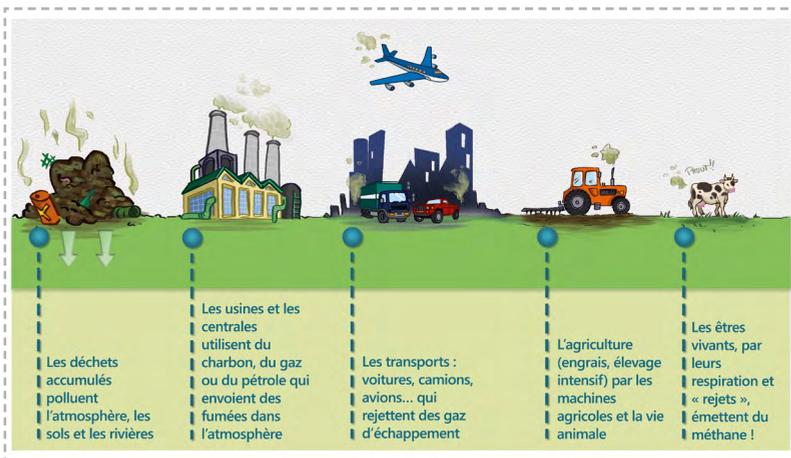


Figure 5

Toutes les activités humaines nous polluent. Il s'agit de maintenir cette pollution aux niveaux les plus faibles possibles.

Face à ces deux problèmes, nous devons trouver des solutions pour pérenniser notre consommation d'énergie – et donc notre civilisation.



Inventaire des moyens de production d'énergie



Une énergie fossile est une énergie dont les réserves se sont constituées voilà très longtemps. Elles proviennent de l'évolution géologique des forêts et sont donc enfouies. Elles sont présentes en quantités finies et s'épuisent donc au fur et à mesure de leur exploitation.

Les sources fossiles

Elles proviennent de la transformation géologique de matières végétales depuis des dizaines voire des centaines de millions d'années :

- du pétrole ;
- du charbon ;
- du gaz.

Toutes ces sources d'énergie (gaz, pétrole) devront à plus ou moins long terme être remplacées car leurs combustibles vont progressivement disparaître de la Terre. Il en est de même des centrales nucléaires. Elles dépendent de l'uranium qui sans être une matière fossile est en quantité limitée (dont épuisable) sur la Terre.



Remarque

L'énergie nucléaire provient de l'uranium (extrait de la croûte terrestre) qui dégage de l'énergie lorsqu'un atome fissile se casse ; cette énergie est utilisée dans les centrales nucléaires pour chauffer de la vapeur d'eau et faire tourner des turbines pour produire de l'électricité (voir encart « Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine »). L'uranium est un minéral ; il provient de la croûte terrestre, mais n'est pas une matière fossile.



Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se constitue ou se reconstitue plus rapidement qu'elle n'est utilisée. Elle est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps (échelle humaine).

Les énergies renouvelables

Elles sont utilisées aujourd'hui de façon minoritaire mais très prometteuse. Ces sources d'énergies sont :

- l'eau ;
- le vent ;
- le Soleil.

La nature donne un exemple : l'énergie de la vie provient du Soleil qui permet de transformer les molécules et fournit l'énergie chimique à la base de la vie.

On peut mimer ces procédés et de ce fait tirer avantage de différentes sources d'énergie :

- **la biomasse**, ce terme désigne toute la matière qui provient des organismes vivants ;



- la force de l'eau des rivières, **l'énergie hydraulique** ;
- le vent, **l'énergie éolienne**, pour faire tourner des turbines (voir encart « Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine ») ;
- le Soleil, **énergie solaire** ;
- des sources d'énergie qui viennent de la mer, les **énergies marines**, les marées, les courants marins profonds qui sont capables eux aussi de faire tourner des turbines (ces énergies sont encore au stade de l'expérimentation).

Les énergies renouvelables sont-elles à la hauteur de nos besoins ?

Nous avons à notre disposition plusieurs sources d'énergie renouvelable qui sont développées dans ce paragraphe. L'enjeu pour se substituer aux sources d'énergie fossiles est de répondre à nos besoins colossaux.

L'énergie hydraulique

Les rivières sont déjà largement équipées et pratiquement, saturées (tout au moins en Europe) pour la production d'électricité (hydroélectricité).

Les **énergies marines** resteront utilisées à très petit niveau car elles sont encore à titre expérimental pour longtemps.

Les sources hydrauliques ne sont pas suffisantes mais de nouvelles énergies sont prometteuses telles que **la biomasse**, **l'énergie éolienne** et **l'énergie solaire**.

La biomasse (énergies vertes)

À l'origine, la Terre ne contient pas d'organisme vivant, mais une atmosphère faite de gaz carbonique (CO₂) et d'eau. Par un mécanisme que l'on appelle **la photosynthèse**, la lumière du Soleil est capable de fabriquer des molécules organiques à partir de ces éléments.



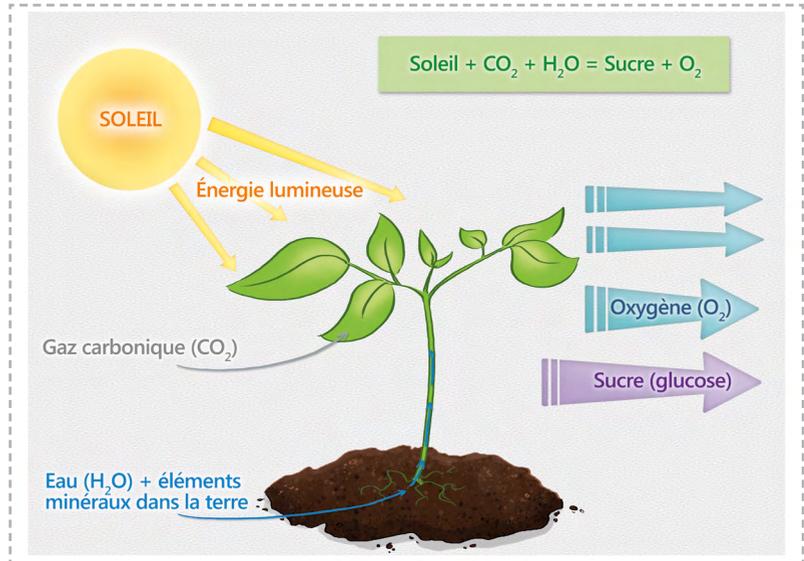
Remarque

On peut dire que l'énergie du Soleil est stockée dans les organismes vivants sous forme d'énergie chimique.



Figure 6

L'énergie verte. Grâce au Soleil, les molécules de l'atmosphère se transforment et permettent la vie. Des mécanismes analogues permettent de faire de nouvelles molécules, comme celles qui constituent des carburants pour l'activité humaine.



Ayant compris ces mécanismes de la vie, les chimistes peuvent les reproduire sur des systèmes qui les intéressent.

En particulier, ils ont développé des techniques pour fabriquer des carburants (hydrocarbures) à partir de la matière végétale (la biomasse).

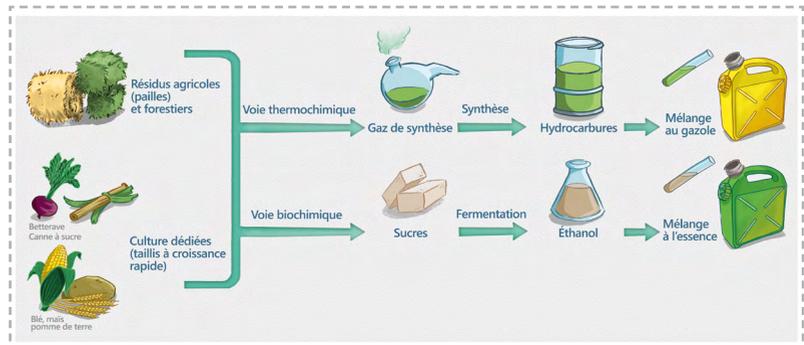
La matière végétale utilisée a plusieurs origines :

- des plantes cultivées spécifiquement (Fig. 7) ;
- des déchets agricoles et forestiers (Fig. 7) ;
- des algues ou des microorganismes.

Chacune de ces voies de synthèse de biocarburants a de nombreuses variantes dans ses procédés chimiques. Une recherche industrielle intense est actuellement consacrée à la question.

Figure 7

Schéma des procédés d'utilisation de la biomasse. On peut faire pousser des plantes spécifiques choisies pour la production de carburants (cultures dédiées) ; on peut aussi utiliser les déchets forestiers ou agricoles.





L'énergie éolienne

Les moulins existent depuis l'Antiquité. C'est le vent (l'énergie éolienne) qui fait tourner les ailes pour entraîner des machines tournantes.

Autrefois, des engrenages étaient utilisés pour mouler le grain et produire de la farine ou pour faire tourner des poulies et remonter l'eau d'un puits.

Aujourd'hui, les « moulins modernes » font tourner des turbines qui produisent de l'électricité : c'est l'électricité éolienne (voir encart ci-après).

Produire l'électricité grâce à un alternateur et une turbine

Il est possible de transformer l'énergie mécanique de l'eau ou du vent en énergie électrique grâce au principe illustrée sur la *figure 8*.

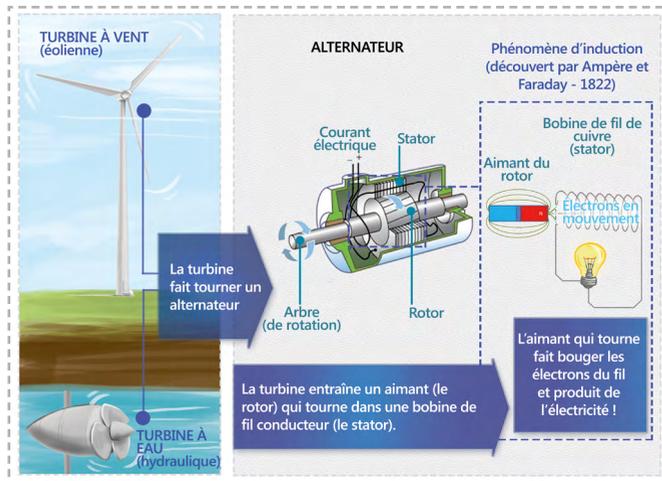


Figure 8

L'alternateur transforme l'énergie mécanique (rotation d'une roue sous l'effet d'un courant liquide ou gazeux) en énergie électrique. C'est l'élément de base des centrales électriques à charbon, gaz ou pétrole ainsi que des centrales nucléaires et des éoliennes.

Un aimant mis en mouvement dans une bobine de fil de cuivre produit du courant électrique. C'est le phénomène de l'induction, découvert par Ampère et Faraday il y a presque deux siècles. Il est à la base de toutes les installations génératrices d'électricité.

L'alternateur est une machine qui remplit précisément ce rôle : un aimant cylindrique tourne à grande vitesse dans une bobine de cuivre : on recueille le courant aux bornes de cette bobine. L'aimant de l'alternateur est entraîné par une turbine. Le principe est celui d'une roue à aubes, mise en mouvement par un courant d'eau (hydraulique) ou d'air (éolien). L'axe de cette roue est l'aimant de l'alternateur. Exemple de vitesse de rotation : 1 500 tours par minute.



Une source d'énergie doit être dimensionnée de façon raisonnable selon certains critères : une petite éolienne qui ferait fonctionner une lampe de poche serait une absurdité... beaucoup trop chère.

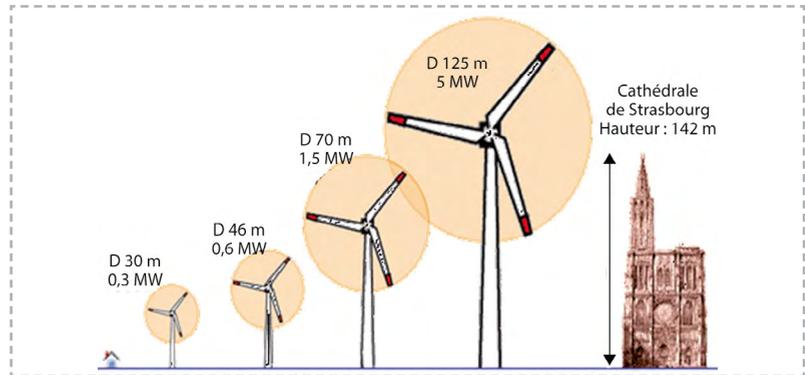
Pour une source d'énergie éolienne praticable, on utilise des éoliennes (moulins) de très grandes tailles que l'on regroupe en grand nombre sur un site : ce sont les « **fermes éoliennes** ».

On envisage pour les éoliennes des dimensions colossales (Fig. 9) de l'ordre d'une centaine de mètres de hauteur (c'est la hauteur du premier étage de la Tour Eiffel) ou plus.

Les difficultés technologiques sont très importantes : par exemple construire des mâts d'une telle hauteur, dans des sites choisis pour que le vent y souffle fort, et éviter qu'elles ne soient arrachées par le vent. La chimie a développé des matériaux (aciers spéciaux, aluminium adaptés) conçus pour résister à ces conditions.

Figure 9

La puissance des éoliennes est proportionnelle à la surface balayée par les pales.



Remarque

Une « ferme éolienne » produit environ 3,5 watts électriques par m^2 .



Remarque

On calcule que pour assurer toute la consommation électrique de la France, il faudrait des éoliennes sur une bande de cinq kilomètres de large, le long de toutes les côtes françaises.

Une caractéristique fait que la production d'énergie éolienne ne ressemble pas à celle d'une centrale à pétrole ou nucléaire : c'est le **phénomène de la dilution**. Il signifie que l'installation de production va occuper une place beaucoup plus considérable sur le sol : on doit éloigner les éoliennes les unes des autres pour ne pas perturber les courants gazeux et profiter de bonnes conditions de production.

Les éoliennes exigent beaucoup de place : installées à grande échelle, elles dégradent les paysages.

Pour éviter cette difficulté, on construit des éoliennes sur la mer – ce sont des « **fermes marines** » comme celle représentée sur la *figure 10* qui montre une partie d'une ferme éolienne marine construite en Hollande.



L'investissement industriel est très coûteux et très difficile à exploiter. En effet, les productions des centaines d'éoliennes de la ferme doivent être acheminées par voie de câbles sous-marins vers des stations électriques de hautes puissances.



Figure 10

Vue d'une ferme éolienne marine installée en Hollande (off-shore).



Remarque

L'implantation de fermes éoliennes est très avancée dans des pays comme le Danemark, l'Espagne ou l'Allemagne – où l'énergie éolienne est considérée comme rentable.

L'effet photovoltaïque

Le Soleil est avec le vent (et à un moindre degré la biomasse) la principale source d'énergie renouvelable dont l'exploitation se fait à grande échelle. Ceci est en particulier dû à l'existence de « l'effet photovoltaïque » qui permet de recueillir de l'électricité à partir d'un matériau irradié par le Soleil.



Remarque

En France, en janvier 2015, l'éolien assure environ 2,2 % de la production d'énergie électrique.

Les différents types de conduction électrique

Un corps solide peut être isolant, conducteur ou semi conducteur. C'est sur cette notion que repose l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'électricité. La *figure 11* schématise les différentes situations dans lesquelles les électrons des atomes peuvent se trouver :

- Ils peuvent être très fortement reliés au noyau de l'atome et ne sont pas affectés par leurs voisins (on les appelle électrons des couches profondes) ; c'est le cas des électrons des atomes de carbone du diamant par exemple, qui ne peut donc conduire l'électricité et constitue un excellent isolant.
- Ils peuvent être en contact avec leurs voisins et former avec eux des liaisons chimiques – ce sont les électrons de valence – qui rendent compte de l'existence même des corps solides ou des molécules.
- Dans un troisième cas les électrons les moins liés à leur noyau peuvent être délocalisés sur l'ensemble du corps solide et assurer la conduction de l'électricité, puisque celle-ci n'est rien d'autre qu'une circulation des électrons d'un bout à l'autre d'un corps conducteur. Les métaux sont la catégorie de solides la plus connue où ce phénomène de conduction intervient. Une certaine quantité d'électrons circulent en permanence dans ce qu'on appelle la bande de conduction (voir *figure 12*).

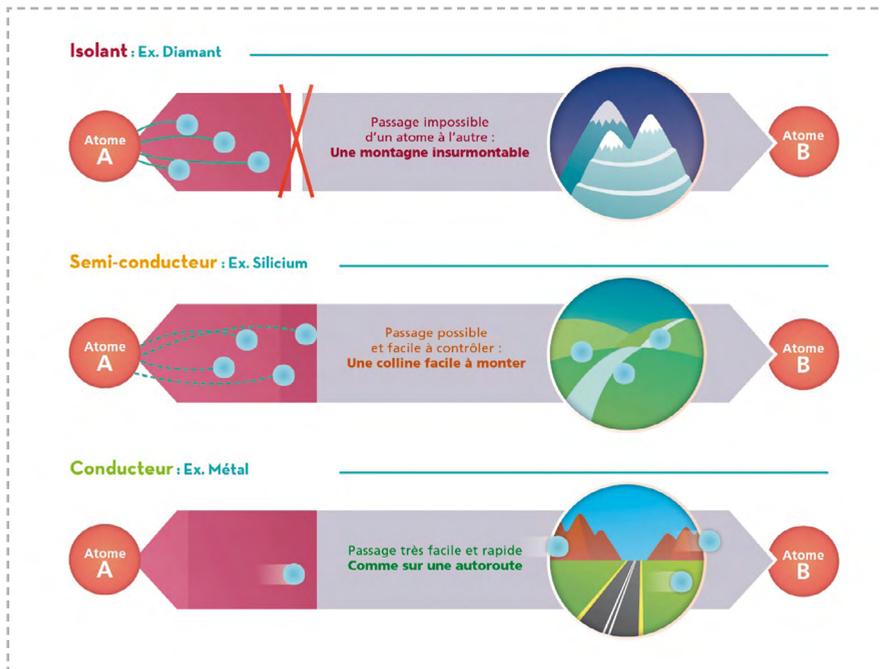


Figure 11

Principe de circulation des électrons externes entre les bandes de valence et de conduction.

Les semi-conducteurs possèdent des électrons aux propriétés intermédiaires. Sans excitation extérieure – par exemple à très basse température ou dans l'obscurité, ils restent dans les couches profondes ou dans la bande de valence. Si on leur apporte un peu d'énergie, par contre, par exemple en les chauffant ou en les soumettant à une tension électrique ou encore – c'est ce qui va nous intéresser ici – en les soumettant à une irradiation lumineuse, ces électrons quittent la bande de valence pour aller peupler la bande conduction. Sous excitation (irradiation par la lumière, par exemple), ces corps isolants deviennent conducteurs. Ce comportement est résumé sur la *figure 11*. Le diamant y est pris comme prototype de l'isolant et le silicium comme prototype du semi-conducteur. Ce corps a en effet d'excellentes propriétés de semi-conduction et c'est celui qui est le plus utilisé (mais pas le seul) pour capter l'énergie solaire.

Ceci vient de la propriété suivante. On peut résumer la *figure 11* en introduisant la notion de distance entre la bande de valence et la bande de conduction qui permet de comprendre le comportement des solides sous irradiation par la lumière (*figure 12*). Pour le diamant, cette distance (qu'on appelle le « gap » en utilisant un mot anglais) est plus grande que l'énergie de la lumière : donc l'irradiation n'a pas d'effet sur la conduction. Pour le métal, cette



distance est nulle et la lumière ne produit donc également aucun effet. Le semi-conducteur est dans une situation beaucoup plus intéressante : si on l'irradie par une lumière de faible énergie (on dit de grande longueur d'onde) les électrons de la bande de valence ne pourront pas être affectés, rien ne se passera. Pour une lumière d'une énergie supérieure à l'intervalle entre bande de valence et bande de conduction (le gap) en revanche, la lumière va effectivement se coupler aux électrons de valence, peupler la bande de conduction et permettre le passage d'un courant électrique par le semi-conducteur.

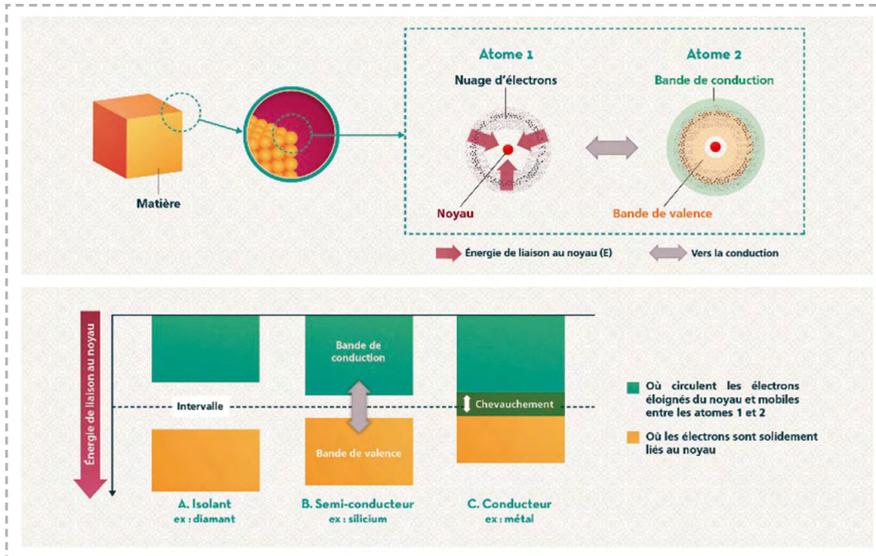


Figure 12

Niveaux d'énergie des électrons dans un solide. Il existe plusieurs situations qui expliquent l'existence de composés isolants électriques, conducteurs métalliques, semi-conducteurs.

L'encart « Les différents types de conduction électrique » permet de comprendre le principe de la cellule photovoltaïque.

Le « gap » du silicium est adapté à l'énergie de la lumière solaire si bien que les dispositifs au silicium éclairés par la lumière du Soleil voient leur bande de combustion se peupler d'électrons, et produisent le courant électrique que l'on recherche.



Photovoltaïque :

photo = lumière ;
volt = électricité,
désigne la transformation de
l'énergie lumineuse en
énergie électrique



Figure 13

Dans le silicium cristallisé, chaque atome Si est lié à quatre autres atomes de façons équivalentes. Les électrons responsables de ces liaisons sont représentés sur le schéma de gauche.

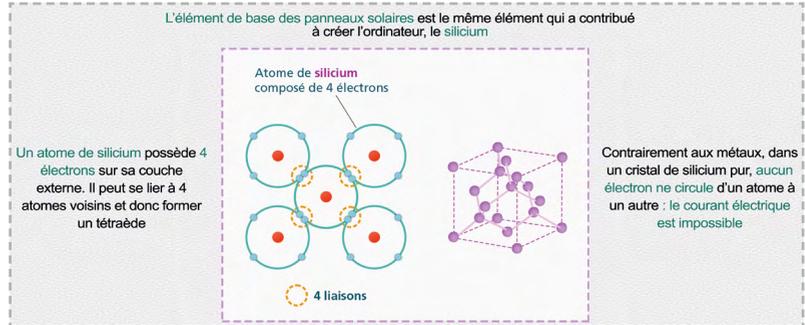
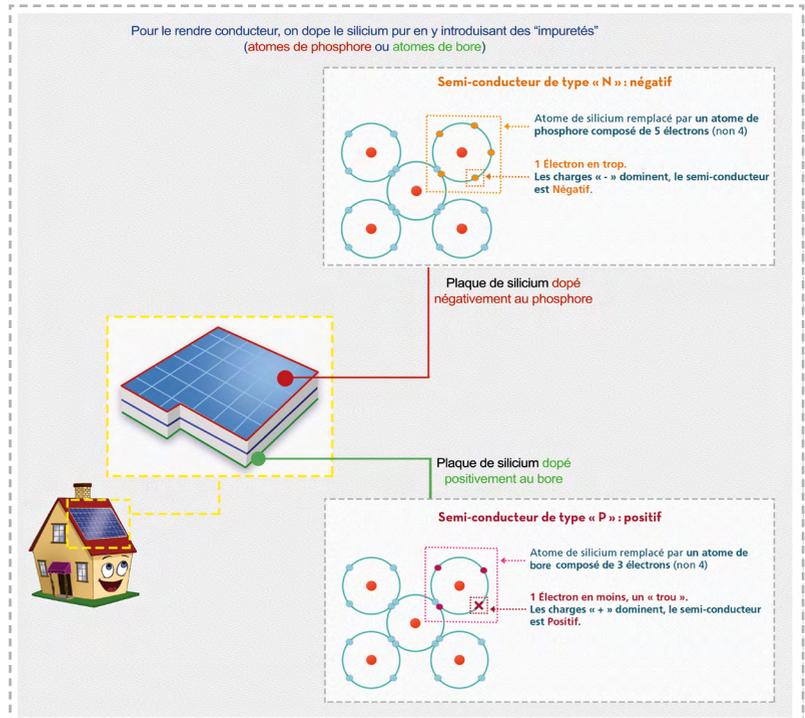


Figure 14

Le « dopage » du silicium introduit des électrons ou des « trous » supplémentaires selon qu'il correspond à une impureté de phosphore ou de bore. Ces charges (négatives ou positives) peuvent engendrer un courant électrique (conduction). Cet effet est à la base de l'utilisation du silicium pour convertir le rayonnement solaire en électricité.



Sur la *figure 15*, on peut voir que le rayonnement solaire irradie la face avant de la cellule ; une différence de potentiel avec la face arrière apparaît qui permet de générer le courant électrique. Le schéma correspond à l'utilisation du silicium sous forme cristalline. C'est la « filière historique » dont le rendement maximum est de 25 % (au mieux le quart de l'énergie lumineuse est transformé en énergie électrique).

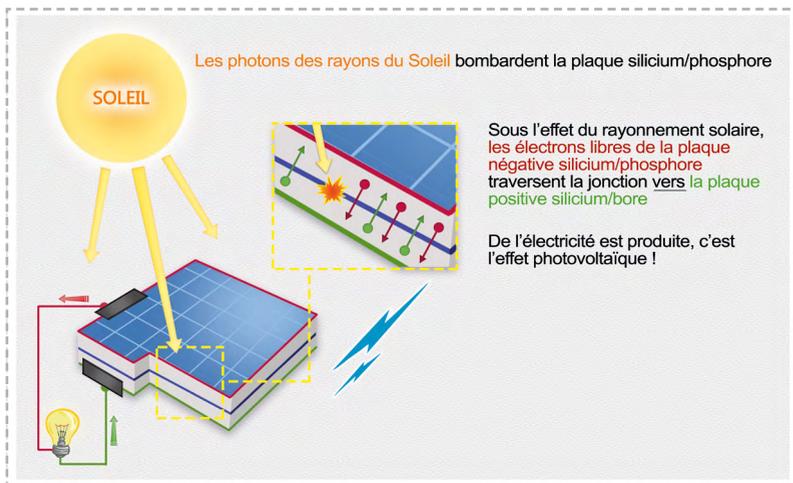


Figure 15

L'irradiation de la cellule photovoltaïque par le Soleil crée un courant électrique dans le circuit branché.

Bien que les solutions actuelles soient déjà satisfaisantes, d'intenses recherches se développent sur d'autres types de **cellules photovoltaïques** dans le but d'améliorer le rendement et les coûts.

La chimie est au cœur de ces développements qui consistent à fournir et tester de nouvelles techniques de fabrication et de nouveaux matériaux tels que :

- silicium amorphe après le silicium cristallin ;
- techniques de dépôts en couches minces ;
- nouveaux types d'alliages.

La « **dilution** » qui comme évoqué plus haut est importante pour l'éolien, l'est également pour le solaire.

Pour produire 1 000 Mégawatts, les densités de production sont :

- pour l'éolien :
 - 142 km², éoliennes terrestres (soit l'équivalent d'un terrain de 12 km sur 12 km)
 - 80 km², éoliennes maritimes ;
- pour une centrale thermique :
 - 0,32 km² ;
- pour le solaire (photovoltaïque) :
 - 32 km².

Les installations d'énergie solaire, qui demandent des surfaces très importantes, regroupent de grandes quantités de cellules. On peut voir sur la figure 16 quelques réalisations d'installations industrielles (bâtiments publics) utilisant des cellules photovoltaïques en couches minces sur verre.



Figure 16

Installations à énergie solaire :
a) ferme solaire dans les Landes (Cestas) ;
b) stade aux États-Unis ;
c) bâtiment public dans l'Ohio, aux États-Unis.



L'intermittence des énergies éolienne et solaire

Figure 17

L'intermittence des énergies renouvelables reste un vrai problème.



Les énergies éolienne et solaire proviennent de sources « gratuites » – le vent et le Soleil. Mais ces sources ne sont pas fiables. Ce phénomène s'appelle **l'intermittence** et il conditionne l'utilisation de ces énergies (voir chapitre « Le challenge de l'électricité verte »).

Développer les énergies renouvelables, c'est donc aussi envisager les moyens de **stocker l'énergie électrique produite**. Cette question est l'une de celle qui ralentit le plus le développement des énergies renouvelables (voir chapitre « Le challenge de l'énergie verte »).

À défaut de savoir stocker l'énergie électrique de façon praticable, on maintient en service de « vieilles » centrales électriques – par exemple à charbon. Ces centrales s'allument rapidement « à la demande » lorsque les sources renouvelables cessent de fonctionner et permettent de satisfaire le consommateur. À ceci près que leur coût vient s'ajouter à celui



des centrales renouvelables et qu'elles ne permettent pas de réaliser la diminution escomptée de pollution atmosphérique par le CO₂.

L'adaptation de la production d'électricité à l'intermittence de ces sources d'énergie déclenche de gros programmes de recherche scientifique et technique pour stocker l'énergie. Ces questions sont présentées dans le chapitre « Stockage de l'énergie électrique » de ce volume.

Les économies d'énergies

Le bon marché relatif des sources d'énergie fossiles, du charbon au gaz et au pétrole, nous éloigne tous des économies : on éclaire des locaux vides, on chauffe les résidences et les bureaux, ou on les refroidit selon la saison, avec de moins en moins de parcimonie.

Par ailleurs, les procédés de fabrication des produits de consommation ne regardent pas à la dépense d'énergie et le gaspillage des produits est considérable.

Avec des changements pas forcément très astreignants de nos habitudes de vie, on pourrait consommer nettement moins d'énergies (peut-être 20 % en moins). Depuis quelques années, des campagnes de communication font appel aux économies d'énergie.

Il est clair que les contraintes sur l'énergie devenant plus importantes, ce facteur « économie d'énergie » sera de plus en plus pris en compte. On voit déjà se multiplier des initiatives (campagnes citoyennes sur le tri des déchets par exemple) qui poussent aux économies d'énergie.

Conclusion

Les énergies renouvelables ont de nombreux atouts pour répondre à nos besoins énergétiques mais ne pourront pas à elles seules, dans l'immédiat, répondre à nos besoins actuels. Le défi du futur pour les énergies renouvelables ne pourra pas se dispenser d'une diminution de notre consommation et d'un changement de nos modes de vie.