

Conversion photovoltaïque et énergie solaire

Chapitre 3

III.1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques. Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ». Dans ce chapitre nous allons tout d'abord montrer les principales caractéristiques du spectre solaire, pour présenter ensuite l'idée principale de la conversion photovoltaïque. Pour cela, le principe de la conversion photovoltaïque est rappelé. Ensuite, nous abordons la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque. Puis nous énumérons les principaux paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque. Enfin nous terminons ce chapitre par l'état de l'art en technologies photovoltaïque, en passant en revue les différentes filières technologiques pour la fabrication des cellules solaires.

III.2. Histoire de la lumière solaire

Les premiers à s'intéresser à la lumière solaire sont les gréco-romains mais leurs découvertes sont plus utilitaires que scientifiques. Par exemple, les verres ardents qui permettent d'allumer un feu en concentrant les rayons. A cette époque un conflit est né entre les atomistes qui affirment que la lumière est constituée d'atome qui s'échappe de la matière et les pythagoriciens qui eux certifient que l'oeil envoie des rayons qui sondent l'espace.

Nous nous intéresserons plutôt aux principaux scientifiques (dis "modernes") qui ont réservé une partie de leur vie à l'étude de la lumière solaire. Nous allons retracer leurs histoires et leurs découvertes.

René Descartes (1596 - 1650) ,grâce aux travaux de Willbrord Snell, propose une loi de réfraction en 1637 qui est $n=c/v$ où n est l'indice de réfraction, c est la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s) et v est la vitesse de la lumière dans le milieu étudié. Cependant, un mathématicien persan Ibn Sahl avait déjà fais mention d'une loi de réfraction en 984 sur les miroirs ardents et les lentilles mais ce ne sont que les travaux de l'Européen qui furent retenus plus tard

Pierre de Fermat (1601-1665), en 1657, part du fait que la nature agit toujours le plus simplement possible. Grâce à l'indice de réfraction, il énonce que la lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit extrême.

Neuf ans plus tard, **Isaac Newton** (1643-1727) décompose la lumière blanche grâce à un prisme en un spectre de couleurs, sa découverte est révolutionnaire : la couleur est issue du rayonnement solaire et n'est en fait pas dans le verre!

En 1677, **Christiaan Huygens** (1629-1685) évoque la théorie ondulatoire de la lumière, cette dernière serait composée d'ondes et de particules.

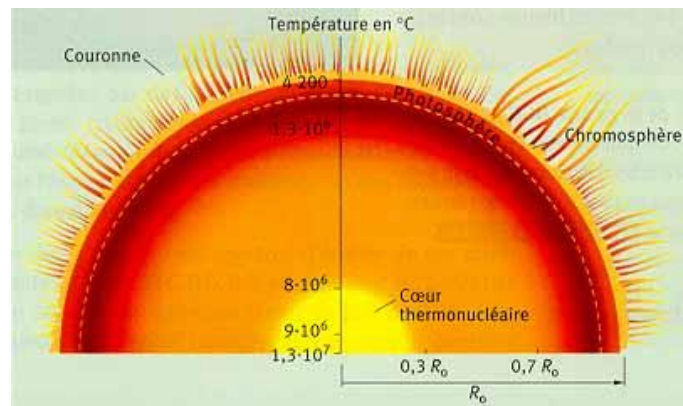
Il faudra attendre l'année 1801 pour que **Thomas Young** (1773-1829) confirme les travaux de Huygens: il fait passer de la lumière à travers deux fentes parallèles et la projette sur un écran, la lumière est diffractée et produit des franges d'interférences c'est à dire des alternances de bandes éclairées et non-éclairées, il conçoit la lumière comme une ondulation périodique oscillant à la fois dans l'espace (longueur d'onde λ) et dans le temps (période T), tout en se propageant à la vitesse c telle que $\lambda=cT$.

L'opticien et physicien **Joseph Von Fraunhofer** (1787-1826) crée un tout nouvel objet: un réseau. Il aligne une multitude de fils métalliques très rapprochés qui permettent de reproduire le spectre solaire comme un prisme. Tout comme Newton, il décompose la lumière blanche et découvre le phénomène de renversement des raies en 1814: un atome absorbe ou émet une radiation à une longueur d'onde très précise.

Albert Einstein (1879-1955) approfondit les travaux de Newton et découvre que la lumière se comporte à la fois comme une onde et comme un flux de particules. Il introduit la notion de photon qui est une particule de lumière et de chaleur s'échappant du soleil, son énergie, en J , est calculée grâce à $\Delta E = h\nu$ avec h qui est la constante de Planck soit $h= 6,63 \times 10^{-34} J.s$ et ν est la fréquence du rayonnement monochromatique en Hertz (Hz).

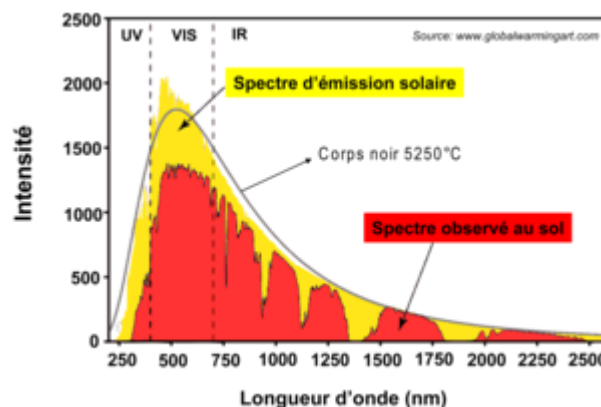
■ Composition du rayonnement solaire

Le soleil ainsi que son rayonnement ont de multiples caractéristiques.



Figure

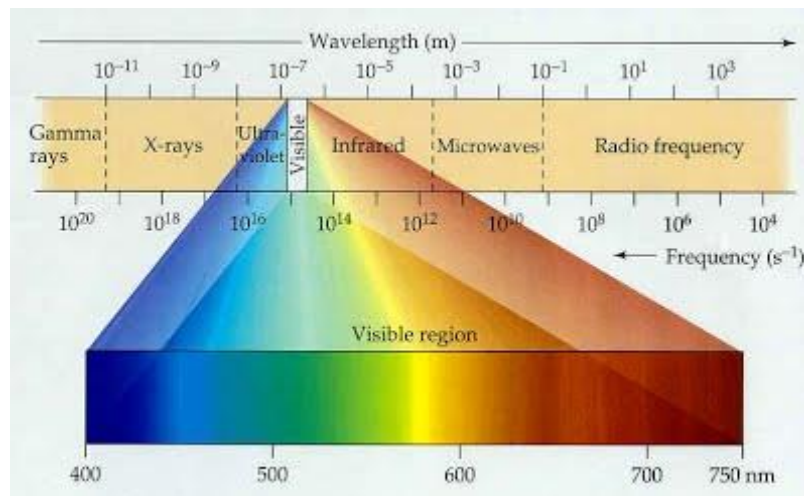
Le Soleil est l'étoile **centrale** de notre système solaire. D'après la classification astronomique, notre étoile est de type naine jaune. Elle est composée essentiellement **d'hydrogène** (78,4 % de la masse) et **d'hélium** (19,6 % de la masse), les 2% restant étant composé d'autres éléments chimiques dont les principaux sont l'oxygène et le carbone. Autour de lui gravitent la **Terre**, et **sept autres planètes** (Mercure, Vénus et Mars qui sont comme la Terre des "planètes telluriques", et Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune qui sont des planètes dites "géantes gazeuses") au moins cinq planètes naines (la plus connue étant Pluton), de très nombreux astéroïdes et comètes ainsi qu'une bande de poussière. Le Soleil représente à lui seul **99,86 % de la masse du système solaire** ainsi constitué (Jupiter représentant plus des deux tiers de tout le reste).



Figure

Le Soleil émet un rayonnement de type **électromagnétique**. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ **8 minutes et 19 secondes** à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Ce rayonnement constitue **un spectre continu** allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.



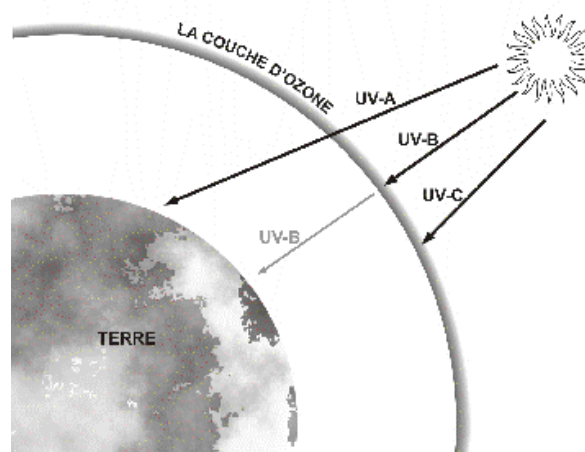
Figure

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de **raies d'absorptions** (voir ci-dessous)



Figure

Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : **5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge**, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

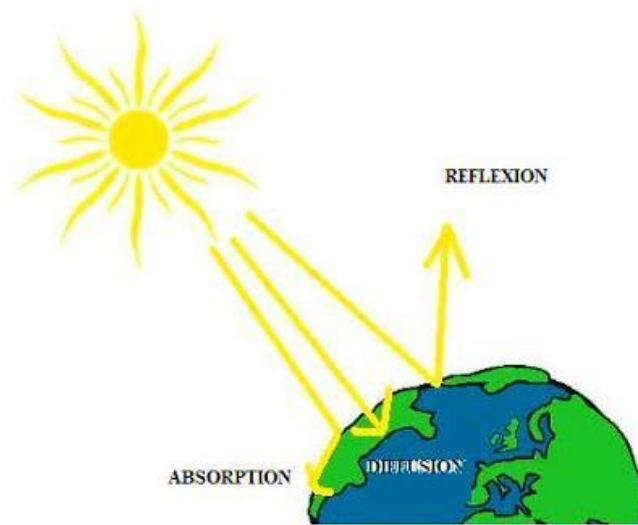


La couche d'ozone absorbe certains types de rayons ultraviolets, mais pas tous.

Figure :

Le rayonnement **ultra-violet** émis par le Soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les **UV-A** ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315 nanomètres ($1\text{nm}=1 \times 10^{-9}\text{mètre}$), les **UV-B** dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les **UV-C** qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la Terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont soit absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "**quantum d'énergie**" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation $\Delta E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda$, h étant la constante de Planck c'est-à-dire $6,63 \times 10^{-34}$ Joules par seconde. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie **plus important** que les photons composant le rayonnement infrarouge.



Figure

L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1 350 Watts/m² (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont **réfléchies, absorbées ou diffusées**, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme **l'épaisseur de l'atmosphère** où l'on se trouve ou encore **la position du Soleil** et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m².

Type d'onde	Longueur d'onde	Fréquence	Usages
Ondes radio	> 1 mm	< 3×10 ¹¹ Hz	Radio, TV, radars
Infrarouge	1 mm à 0,8 μm	3×10 ¹¹ à 4×10 ¹⁴ Hz	Vision nocturne, télécommandes
Lumière visible	0,8 à 0,4 μm	3,7×10 ¹⁴ à 7,5×10 ¹⁴ Hz	Vision diurne, photosynthèse
Ultraviolet	0,4 à 0,05 μm	7,5×10 ¹⁴ à 6×10 ¹⁵ Hz	Bronzage, purification de l'eau
Rayons X	0,05 μm à 10 ⁻² Å	6. 10 ¹³ à 3. 10 ²⁰ Hz	Radiographie
Rayons gamma	< 10 ⁻² Å	> 3. 10 ²⁰ Hz	-

Tableau I-1 : Principales ondes connues avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs usages [1].

Nous pouvons aussi remarquer que sans ce rayonnement, la Terre ne serait pas comme elle est actuellement.

Essentiel à la vie humaine

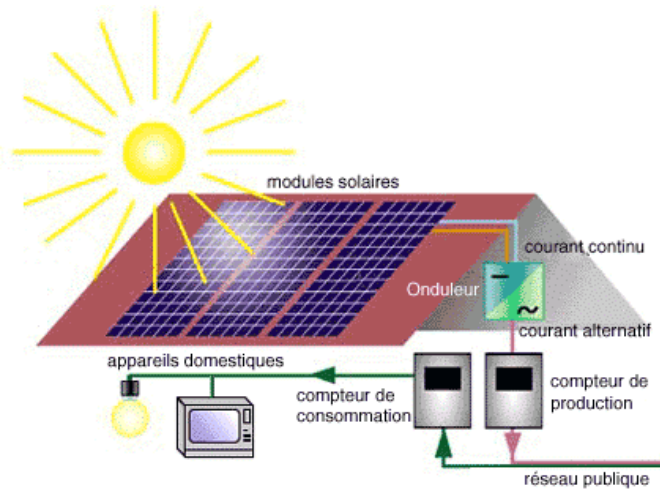
Le Soleil est essentiel à la vie humaine, sans lui la vie ne serait simplement plus possible.



Apparence de la Terre lors de l'apparition de la vie (supposition)

Rappelons que le Soleil est un des **facteurs à l'origine de la vie** sur Terre.

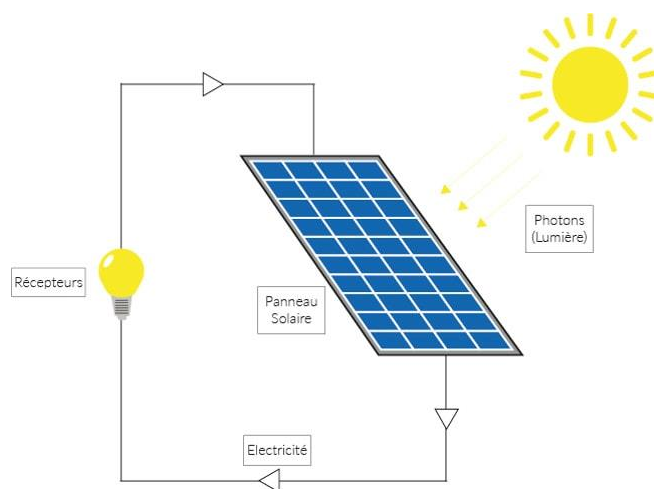
En effet, plusieurs facteurs ont permis l'apparition de la vie : notamment le CO₂ et l'océan, mais aussi le soleil qui a joué un rôle particulier. En effet, il a permis à l'air d'être maintenu constamment **chaud** et donc de **ne pas geler l'océan**. Ce dernier servait de **protection** aux cellules vivantes en évitant que les rayons ultraviolets du soleil détruisent les constructions chimiques des êtres vivants. Indirectement, cette énorme boule de gaz, d'environ 6 000°C, a facilité l'apparition de la vie dans l'eau. Cependant, une certaine faune arrive à vivre sans l'énergie du soleil dans les abysses près des sources hydrothermales des Galapagos (à l'est de l'océan Pacifique). Toutefois, sans le soleil à l'origine, la Terre ne serait pas comme elle est actuellement.



Figure

Le soleil nous apporte beaucoup de chose notamment de **l'énergie** dont il est la principale source. L'énergie **thermique**, délivrée par le rayonnement solaire (transformation de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium), est obligatoire à la survie, sans elle, le monde ne serait plus qu'un amas de glace. L'homme peut survivre à une ère glaciaire mais sans soleil, le corps humain ne pourrait s'adapter. De plus, l'énergie thermique est utilisée par l'homme qu'il transforme en **électricité** par le biais de panneau photovoltaïque: La lumière frappe le panneau et est convertie en électricité grâce à des modules photovoltaïques.

(Fonctionnement du photovoltaïque ci-dessus et panneau photovoltaïque à droite.)



Figure

Pour simplifier les choses, voici un petit résumé des étapes qui permettent de produire de l'électricité avec un panneau solaire photovoltaïque :

- ✚ Les **photons** viennent frapper les **cellules photovoltaïques**
- ✚ Les **électrons** se déplacent alors produisant un **courant électrique continu**

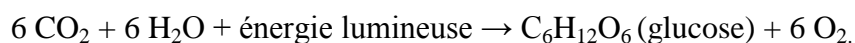
Ce courant électrique continu est transformé en **courant alternatif** grâce aux onduleurs

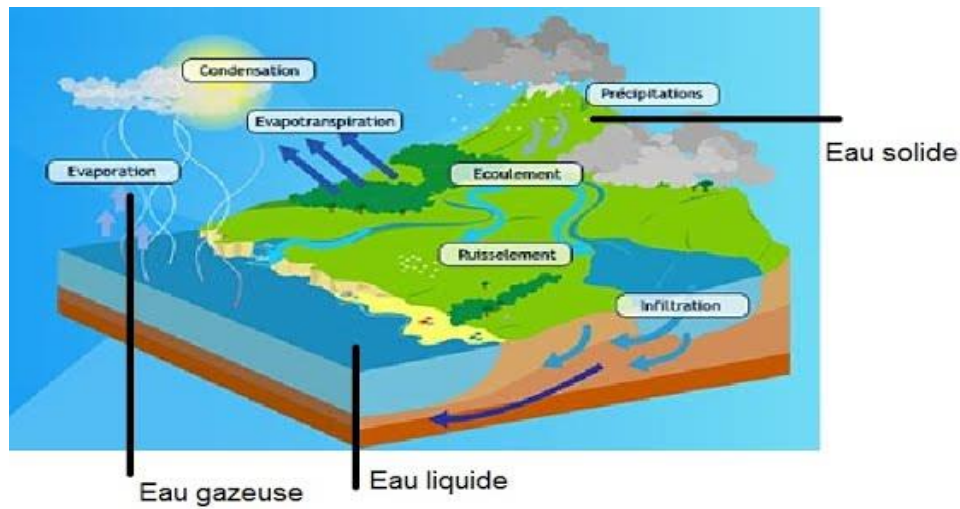
Essayons cependant d'aller un peu plus dans le détail. Le principal composant d'un panneau solaire photovoltaïque est un **module** qui permet de transformer l'énergie du soleil en électricité. Ce procédé est rendu possible par les **cellules photovoltaïques** qui composent le module. Chaque cellule est produite à l'aide d'un **matériau semi-conducteur** appelé le silicium. Ce matériau a un comportement assez spécifique lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire. En effet, la lumière du soleil se compose de **photons** qui vont venir frapper la surface du panneau solaire photovoltaïque. Ils vont ensuite transmettre l'énergie qu'ils comportent aux électrons du matériau semi-conducteur, c'est-à-dire le **silicium**. Les électrons vont alors se mettre en mouvement et ce déplacement produit **un courant électrique continu**. Le système permet ensuite d'additionner les quantités d'électricité produite par les différentes cellules qui composent le panneau solaire photovoltaïque.

Pour information, il est impératif de transformer ce courant électrique continu en **courant alternatif** afin qu'il soit utilisé au sein de votre logement ou bien envoyé sur le réseau de distribution électrique. C'est le rôle de ce qu'on appelle les **onduleurs**, machines indispensables à la génération d'électricité à partir de l'énergie solaire.

L'énergie solaire est **indispensable** à la chaîne alimentaire.

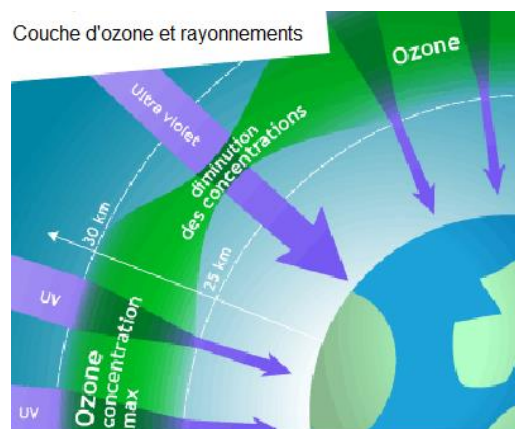
Elle est à l'origine de la **photosynthèse**, qui est une réaction chimique qui se déroule chez les plantes, cette dernière crée de l'énergie sous forme de molécules organiques: les glucides. Ce phénomène a lieu chez les chloroplastes, organites spécifiques des plantes végétales qui sont ensuite consommés par les animaux herbivores puis finalement, eux-mêmes consommés par les animaux carnivores. L'équation de la photosynthèse est :





Figure

L'astre influe aussi sur **l'état de l'eau**. Il diffère selon l'exposition au soleil et il peut prendre **trois formes différentes**: l'état **liquide** si la température est entre 0°C et 100°C , l'état **gazeux** si la température est au-dessus de 100°C puis l'état **solide** lorsque sa température est au-dessous de 0°C . Cependant, la neige est entre deux états : solide et liquide, il faut qu'il fasse suffisamment froid (près de -10°C) pour que les gouttelettes d'eau se cristallisent mais la chute de neige dépend surtout des conditions atmosphériques d'où l'importance du degré zéro pour la chute de neige. Sans l'activité solaire, l'eau ne pourrait pas être liquide et donc il n'y aurait pas de **réactions biochimiques**.



Figure

Quand l'activité solaire varie, l'émission d'ultraviolet est énormément **changée**. Elle a des effets sur la couche d'ozone stratosphérique. En effet, la Terre reçoit plus ou moins d'ultraviolet ce qui conduit à créer **moins d'ozone** ou, au contraire, en créent **encore plus**. L'ozone participe à l'effet de serre en absorbant **l'infrarouge** et entraîne, selon la quantité, une baisse de température ou une augmentation. La température de la stratosphère entraîne des modifications jusque dans la troposphère et de la formation des nuages. Quand l'activité solaire est maximale, l'ozone est plus abandonnant ce qui réchauffe la stratosphère. **La variation de la radiation solaire, de l'UV, de la luminosité, du champ magnétique, du vent solaire et donc des rayons cosmiques, sont une des causes de l'évolution de la température dans l'atmosphère terrestre.**

Les rayons du soleil sont indispensables pour l'homme mais sont également une source bienveillante comme une source dangereuse.

Type	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
		1^{ère} génération		
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
2^{ème} génération				
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
3^{ème} génération				
Cellule organique	5,70%			Au stade de la
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la
Cellules multi-jonctions	39%	25-30%		Au stade de la recherche, production

Tableau III-2 : les différentes technologies photovoltaïques

Energie thermique

L'**énergie thermique** est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. L'énergie thermique est une partie de l'énergie interne d'un corps. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques et jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Ils atteignent un équilibre lorsque la température des corps est égale. L'énergie thermique est l'énergie que possède une substance en raison de l'agitation de ses particules (atomes ou molécules).

Énergie et équilibre thermiques

L'énergie thermique a tendance à se diffuser uniformément dans l'espace. Ce mécanisme naturel d'équilibre est un des mécanismes énoncés dans le principe zéro de la thermodynamique, qui comprend aussi l'équilibre mécanique (des pressions s'équilibrent), et l'équilibre chimique (les fluides se mélangent).

Les mécanismes de répartition de l'énergie thermique se font :

✓ Par contact direct :

- La conduction thermique (transfert de l'énergie cinétique des molécules sans échange de matière) ;
- La convection (échange de matière entre fluides : gaz et liquides).

La dissipation d'énergie thermique par contact se produit de façon dissymétrique par rapport au temps, et se fait toujours du corps le plus chaud (celui dont la température est la plus élevée) vers le corps le plus froid. Ce phénomène est formalisé dans le second principe de la thermodynamique et limite les possibilités de transformer de l'énergie en travail. Il a été découvert lors de la réalisation des premiers moteurs.

- ✓ **Par rayonnement** : au travers du vide ou de milieux transparents aux spectres lumineux et Infrarouge : émission de photons, par le phénomène appelé rayonnement du corps noir.

Énergie thermique et température

Lors de la mise en contact de deux corps, un échange d'énergie thermique se produit. Le point d'équilibre est atteint lorsque les deux corps ont atteint la même température. La notion d'équilibre est une notion transitive. Si un corps A est en équilibre avec B, et que ce corps B est en équilibre avec un corps C, alors A et C sont aussi en équilibre : A, B et C ont la même température. Au début du XX^e siècle, il a été jugé que cette loi, qui semble tenir du simple bon sens, méritait d'être formulée comme le principe zéro de la thermodynamique.

Bien que difficile à définir formellement, la température est une notion utilisée dans la vie courante, car facile à observer. Pour mesurer la température d'un corps, il suffit de le mettre en contact avec un thermomètre (par exemple un thermomètre à alcool), et d'en lire la graduation à l'équilibre thermique.

La capacité thermique massique d'un corps est une valeur définie pour exprimer la quantité d'énergie thermique nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme de ce corps d'un degré Celsius. La capacité thermique massique dépend en général de la composition du corps et de sa température.

Moteur à Combustion

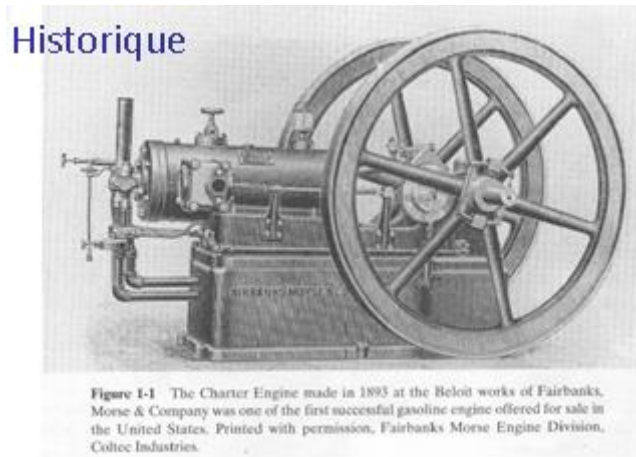
Définition

Le moteur à combustion interne est une machine thermique qui convertit l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, généralement sous forme d'un mouvement rotatif d'un arbre

Historique

- 1700: moteurs à vapeur
- 1860: Moteur de Lenoir (rendement $\eta \sim 5\%$)
- 1862 Beau de Rochas définit le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne
- 1867: Moteur de Otto & Langen: ($\eta \sim 11\%$ et rotation < 90 rpm)
- 1876: Otto invente le moteur à 4 temps à allumage par bougie ($\eta \sim 14\%$ et rotation < 160 rpm)

- 1880: Moteur deux temps
- 1892: Diesel invente le moteur quatre temps à allumage par compression
- 1957: Wankel invente le moteur à piston rotatif

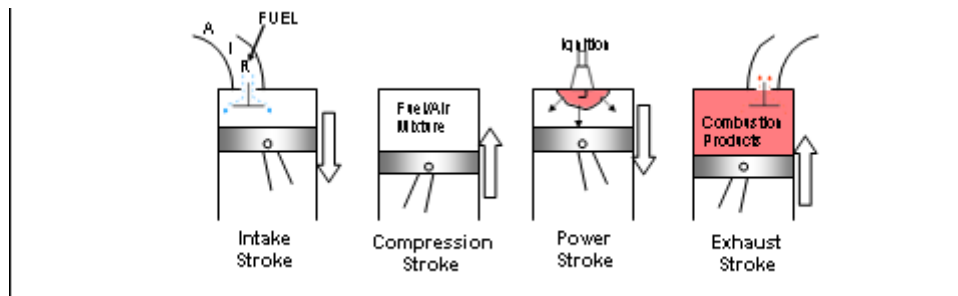


Figure

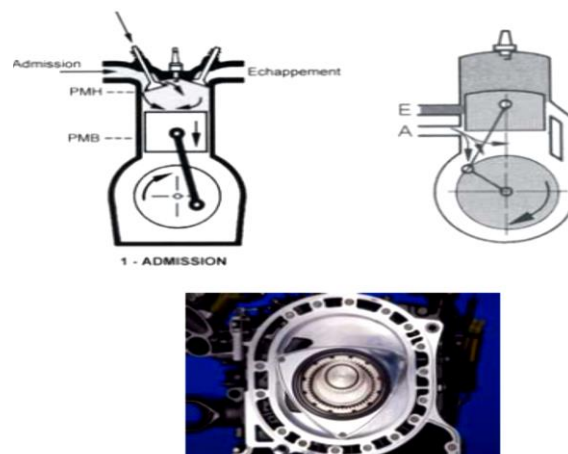
Classification

- Les moteurs à explosion (à essence):
 - La combustion du mélange air / essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie d'allumage
 - Système d'allumage commandé
 - Le mélange air / essence peut s'effectuer par:
 - Carburateur
 - Injection directe d'essence
- Les moteurs à combustion (Diesel)
 - La combustion est déclenchée par l'injection du gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé.
 - Le mélange s'enflamme par auto inflammation, c'est-à-dire spontanément
- Les quatre phases de fonctionnement du moteur ont été définies dès 1862 par Beau de Rochas:
 - Admission: aspiration d'air ou de mélange air / essence
 - Compression de l'air ou du mélange
 - Inflammation rapide et détente du piston

- Echappement des gaz brûlés



- **Les moteurs à quatre temps** réalisent le cycle en quatre courses de piston et deux tours de vilebrequin
- **Les moteurs à deux temps** réalisent le cycle en deux courses de pistons et un tour de vilebrequin
- **Les moteurs rotatifs:** le mouvement alternatif rectiligne est remplacé par la rotation d'un rotor qui réalise le cycle trois fois par tour



Figure

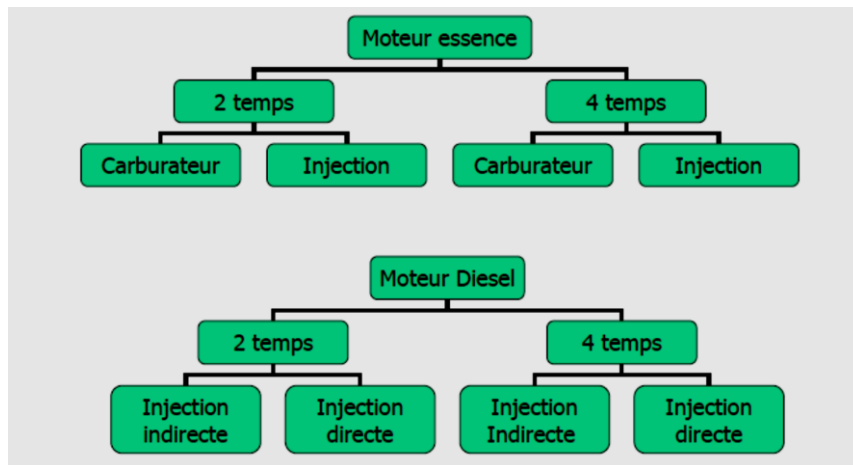


Figure III.

Injection indirecte d'essence: injection d'essence à basse pression en amont de la soupape d'admission au temps d'admission

Injection indirecte de Diesel: injection de gazole à haute pression dans une chambre de précombustion en de compression

Injection directe Diesel: injection de gazole à très haute pression (2000 bars) directement dans le cylindre en fin de compression

Injection d'huile (moteur deux temps): le mélange essence /huile est effectué par injection d'huile spéciale dans le carburant au temps d'admission

Conclusion

De tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, eau, vent, soleil...).

L'énergie est un enjeu majeur, tant au niveau politique, économique, scientifique qu'environnemental...

Dans la chaîne énergétique, les pertes sont présentes à tous niveaux. Un des enjeux essentiels est d'améliorer le rendement. Aussi, plusieurs actions sont possibles :

- Améliorer le taux d'extraction des énergies primaires (aujourd'hui, les cadences de puisage imposées nécessitent une injection massive d'eau dans les gisements, le pétrole ainsi extrait est utilisable à 35% à cause du mélange avec l'eau) ;
- Améliorer l'efficacité des procédés qui utilisent les énergies secondaires (un moteur électrique possède un rendement autour de 90% alors qu'un moteur thermique avoisine les 45%).

Référence:

- 1- M. Lavabre, **Electronique de puissance, conversion de l'énergie**, Editeur: Casteilla 2000
- 2- Jean-Claude Mauclerc et Yves Aubert, Guide du technicien en électrotechnique: **Pour maîtriser les systèmes de conversion d'énergie**, Editeur : Hachette Technique, 2007.
- 3- Michel Lavabre et Fabrice Baudoin, **Exercices et problèmes de conversion d'énergie : Tome 3, Véhicules électriques**, Editeur : Casteilla 2007.
- 4- Michel Pluviose, **Conversion d'énergie par turbomachines éoliennes turbines a gaz Cogénération génie énergétique**, Editeur : Ellipses Marketing, 2009.
- 1- Leonardo da VINCI Transmission de puissance “**transmission et adaptation de l'énergie**” 1ère année STS Maintenance
- 2- Méziane Boudellal, **La pile à combustible**, Dunod, Technique et ingénierie, 2007
- 3- Brice CANONNE et Yoann SAPANEL « **La pile à combustible** » Techno-Science.net -2004
- 4- Fayolle-Baussian Adrien ;Gorce Yoann ; Leroux Justinien « **Le rayonnement solaire** » Première Scientifique TPE 2011-2012
- 5- R. Bosch. « **Automotive Handbook** ». 5th edition. 2002. Society of Automotive Engineers (SAE)
- 6- G.Ciccarelli. “**Applied Combustion** ». Notes de cours. Queens University.
- 7- M. Ehsani Y. Gao, S Gay & A. Emadi. « **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell vehicles. Fundamentals, Theory and Design** ». CRC press. 2005.
- 8- J.B. Heywood. “**Internal Combustion Engine Fundamentals**”, McGraw-Hill, 1988.
- 9- H. Mèmeteau. « **Technologie fonctionnelle de l'automobile. Tome 1 Le moteur et ses auxiliaires** ». 4ème édition. Dunod 2002.
- 10- Hélène HORSIN MOLINARO et Bernard MULTON “**Conversion d'énergie et efficacité énergétique** “ aspects physiques et technologies de la conversion d'énergie. 6^{ème} Ecole Energies et Recherches, Edité le 03/09/2018