

Université Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi
Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature et de la Vie
Département Sciences de la Matière



Polycopié

Energies Renouvelables

Cours L1 Sciences de la Matière

Dr Cheddadi Amel

Sommaire

Préface

Introduction.....1

CHAPITRE I : Généralités sur l'énergie

1) Définition de l'énergie.....	3
2) Histoire de l'énergie.....	3
3) Formes et sources d'énergie.....	4
4) Transformation des formes d'énergie.....	5
5) Grandeurs physiques et notions de thermodynamique.....	6

CHAPITRE II : Les énergies non renouvelables et la situation mondiale

1) Energies fossiles.....	10
2) Energie nucléaire.....	12
3) Les inconvénients des énergies fossiles.....	13
4) Les inconvénients des énergies fissiles.....	17

CHAPITRE III : Les énergies renouvelables dans le monde

1) L'énergie solaire.....	20
2) L'énergie éolienne.....	26
3) l'énergie géothermique.....	28
4) La biomasse.....	29
5) L'énergie des mers ou énergie marine.....	31
6) L'énergie hydraulique.....	31
7) Hydrogène.....	32
8) Le stockage de l'énergie	33

CHAPITRE IV : La pile à combustible

1) Qu'est-ce qu'une pile à combustible	36
2) structure d'une pile à combustible :.....	36
3) types de piles à combustible.....	39

*Références bibliographiques.....*40

Préface

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »

Les causes de la transformation de l'énergie sont essentiellement le besoin et la consommation de plus en plus croissante de l'humanité en ressources énergétiques, surtout depuis l'ère industrielle. A l'échelle mondiale, et en ce début de 21^{ème} siècle, la majeure partie de notre énergie (81 à 86%) provient de sources épuisables : pétrole, gaz naturel, charbon et uranium pour les centrales nucléaires. Le reste (14 à 19%) vient de sources renouvelables : solaire, biomasse, hydraulique, etc....

L'impasse énergétique se présente sous forme d'une série de problèmes dont certains proviennent des sources d'énergie, tandis que d'autres sont relatifs aux filières énergétiques, c'est-à-dire aux séries de transformations de formes d'énergie depuis les sources jusqu'aux l'utilisation finale. Dans les années soixante, l'opinion a commencé par être alertée sur l'épuisement des ressources naturelles (non renouvelables) et sur les diverses dégradations de l'environnement liées à la production et la consommation excessive d'énergie.

Les énergies renouvelables sont une solution alternative à explorer pour remplacer les autres énergies traditionnelles (fossiles et nucléaire). Une énergie renouvelable est une source d'énergie propre et qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme.

Ce présent polycopié est destiné aux étudiants de 1^{ère} année sciences de la matière.

La présentation de ce travail est organisée en quatre chapitres.

- Le premier chapitre s'attachera à représenter des Généralités sur l'énergie, en rappelant les formes d'énergie et les différentes transformations d'une forme à une autre.
- Le second chapitre est consacré à la description des différents types des énergies non renouvelables en passant par leurs inconvénients sur l'environnement.
- Le troisième chapitre regroupe les différents types des énergies renouvelables : solaire, hydraulique, éolienne, biomasse, etc....
- Le quatrième chapitre sera consacré à la description de la pile à combustible : sa structure, son principe de fonctionnement et ses différents types.

Introduction

L'énergie a toujours été un élément majeur dans le développement de l'humanité. Sa consommation a rapidement augmenté depuis la révolution industrielle, particulièrement au cours du XX^e siècle. Selon l'agence internationale de l'énergie, la consommation d'énergie devrait augmenter d'environ 52% d'ici 2030. La majorité de cette énergie est d'origine fossile : charbon, gaz naturel, et surtout pétrole. L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme.

Depuis une vingtaine d'années, tous les pays du monde, surtout ceux fortement dépendants des hydrocarbures ont pris conscience de ces conséquences et surtout de l'épuisement à moyen ou long terme de ces ressources, et cherchent à développer des ressources de substitution à travers les énergies nouvelles ou renouvelables.

Avec la catastrophe nucléaire de Fukushima au Japon, le recours aux énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement apparaît comme une des meilleures alternatives aux énergies fossiles, l'effort de recherche dans ce domaine s'est intensifié, pour que l'énergie de demain soit la plus verte possible.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR L'ENERGIE

L'énergie est, après l'eau et la nourriture, une source indispensable pour l'homme elle a contribué de façon décisive à son développement économique et technique au cours des âges. Celui-ci s'est notablement accéléré aux cours du XXème siècle grâce, notamment, à des sources d'énergie abondantes et peu coûteuses. Pendant très longtemps, l'homme s'est contenté de sa force physique, de celle des animaux, ou encore de l'énergie que l'on peut tirer du bois, du vent ou de l'eau. Les quantités mises en jeu étaient très faibles et ses conditions de vie ont évolué très lentement. L'utilisation massive du charbon a permis un accroissement considérable de son niveau de vie, le pétrole, le gaz, et l'énergie nucléaire ont ensuite amplifié ce phénomène. On a ainsi constaté que l'énergie joue un rôle essentiel dans le développement économique. L'élément le plus spectaculaire du progrès étant sans doute l'augmentation d'un facteur supérieur à deux de l'espérance de vie en 200 ans.

1) Définition de l'énergie :

L'énergie est la capacité d'un corps à fournir un travail : de produire de la lumière, de la chaleur ou un mouvement. Le mot énergie vient du bas-latin «*energia*», qui vient lui-même du grec ancien, qui signifie : force en action.

Dans le système international d'unités, l'énergie s'exprime en Joule. En 1843, James Joule a mesuré et calculé l'équivalence entre l'énergie mécanique d'un objet en mouvement et la chaleur (énergie thermique qu'il produit).

2) Histoire de l'énergie :

L'histoire de l'énergie est passée par une succession de découvertes qui ont progressivement permis d'améliorer la condition humaine.

a) La force humaine :

À l'aube de l'humanité, l'homme ne pouvait compter que sur sa propre énergie corporelle pour survivre. Tous ses déplacements, son travail et sa technologie reposait exclusivement sur sa propre force.

b) Le feu :

Il y a 500 000 ans environ, l'homme a découvert et maîtrisé le feu celui-ci lui a fourni la lumière pour voir la nuit et effrayer les animaux, et la chaleur pour lutter contre le froid, cuire les aliments. Pour alimenter ce feu de manière efficace l'homme a inventé le charbon de bois il y a environ 7000 ans, ce qui lui a permis de développer de nouvelles techniques : poterie, métallurgie du plomb et de cuivre, fabrication du plâtre et de la chaux..., puis il y a environ 3000 ans, il a découvert la métallurgie du fer jusqu'à celle que nous connaissons aujourd'hui.

c) La traction animale :

La domestication des animaux a permis d'exploiter une nouvelle source d'énergie : la traction animale. Contrairement au feu, la traction animale apparaît plus comme une source d'énergie de substitution, de confort : elle facilite les tâches quotidiennes. La traction animale a permis de développer l'agriculture et les applications qui nécessitaient des efforts importants

d) Le vent:

Progressivement, les progrès technologiques ont permis d'exploiter des sources d'énergies nouvelles. L'homme a appris à utiliser le vent pour les transports (voiles des bateaux) et pour un début de mécanisation (moulins à vent.....). Le comportement du vent est aléatoire, et certaines technologies (les moulins à vent à axe horizontal, autrefois très répandus en Europe) y étaient très sensibles.

e) l'eau:

L'énergie hydraulique est exploitée à des fins de mécanisation rudimentaire, notamment par le biais des moulins à l'eau. C'est pour ainsi dire la première source d'énergie quasi- constante sans intervention humaine. En dehors des périodes de crue et d'étiage, les moulins à eau sont capables de fournir de l'énergie mécanique en continu.

f) La chaleur de la terre

Certaines régions de la planète disposent de sources d'eau chaude. Cette chaleur est utilisée pour chauffer des maisons depuis le Moyen-âge.

g) La révolution industrielle:

A partir de la fin du XVIIème siècle, la science commence à faire des progrès considérables, qui vont prendre plus en plus d'importance au cours du siècle suivant. Le développement de la machine à vapeur fait progressivement remplacer le combustible bois par le charbon. La société évolue petit à petit vers un système économique basé sur les sources d'énergie fossiles. Vers le milieu du XIXème siècle, l'utilisation du pétrole fait son apparition dans l'industrie. La révolution industrielle suit son cours, et progressivement au cours du XIXème siècle, se développent les usages du pétrole et du gaz naturel. Charbon, pétrole et gaz continuent à se développer massivement au cours du XXème siècle, pour répondre à une boulimie énergétique et accompagner un développement technologique fulgurant.

3) Formes et sources d'énergie:

Tout ce qui est capable de produire un travail contient de l'énergie. Elle se présente sous plusieurs formes et peut être produite par différentes sources. On qualifie l'énergie selon la source dont on l'extrait ou encore le moyen par lequel elle est acheminée ou véhiculée. Il existe des sources d'énergie naturelles et des sources artificielles, c'est-à-dire créées par l'homme. Les premières sont appelées sources d'énergie primaires si elles produisent directement de l'énergie. Les autres sont appelées énergie secondaires car elles sont issues d'une transformation d'énergie. Ainsi les aliments, l'eau, le vent et le soleil sont des sources primaires tandis que la vapeur et l'électricité sont des sources secondaires. Le tableau (I-1) présente les différentes formes et sources d'énergie.

Formes d'énergie	Sources d'énergie
Energie mécanique (force motrice, mouvement, vitesse)	La gravitation, les muscle, le vent, l'eau, la vapeur (pression), les moteurs thermiques et électrique, les machines.
Energies thermique	Le soleil, la combustion du bois, des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), ou d'autres produits riches en carbone), l'énergie électrique (effet Joule), l'énergie nucléaire (dans les centrales).
Energie électrique	La foudre, l'électricité statique, les piles, les générateurs électriques (dynamos, alternateurs), les centrales hydroélectrique, les centrales nucléaires, les éoliennes.
Energie rayonnante	Le soleil, les lampes, le feu, le gaz.
Energie chimique potentielle	Matière organique (végétale et animale), les aliments, les produits chimiques réactifs, les énergies fossiles: houilles, gaz, pétrole.
Energie nucléaire	L'uranium, Le thorium.

Tableau (I-1): Formes et sources d'énergie

4) Transformation des formes d'énergie:

Une caractéristique fondamentale de toutes les énergies est qu'en général on peut passer de l'une à l'autre par un processus spécifique de transformation. C'est ainsi qu'on produit de l'énergie électrique à partir des énergies mécaniques naturelles. Le tableau (I-2) synthétise les relations entre les différentes énergies.

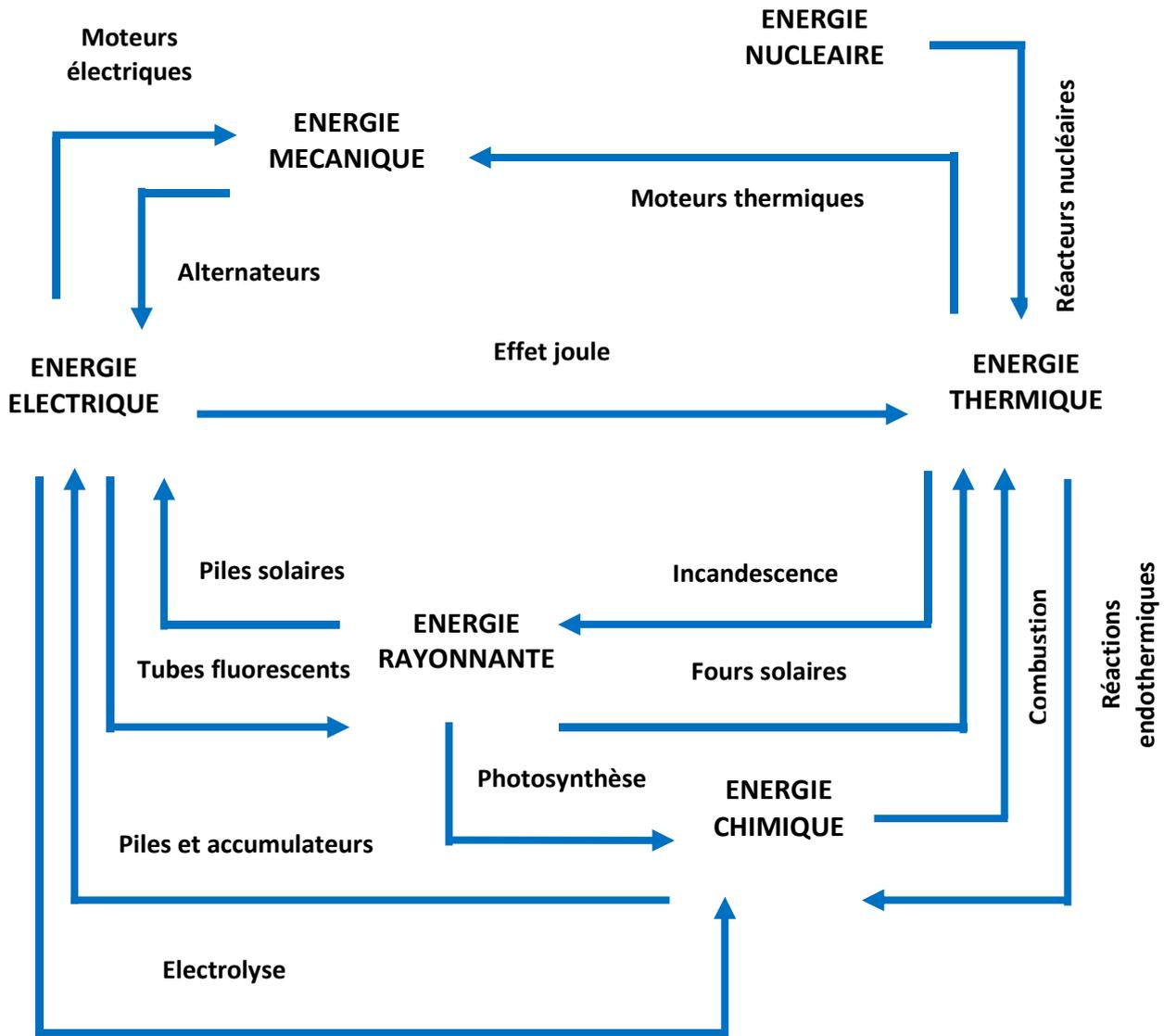


Figure (I-1): principales transformations des Formes d'énergie

5) Grandeurs physiques et notions de thermodynamique:

La thermodynamique est la branche de la physique qui s'intéresse aux évolutions de température et aux échanges thermiques, en particulier ceux qui sont en relation avec la mécanique. La thermodynamique est fondée sur deux principes dégagés par les savants du XIXe siècle, le siècle où triomphe la machine à vapeur: ceux-ci s'interrogeaient sur la nature de la chaleur et sur les lois qui gouvernent la transformation de la chaleur en énergie mécanique (travail).

5.1) le premier principe de la thermodynamique:

Selon le premier principe de la thermodynamique, L'énergie totale d'un système isolé se conserve au cours de ses transformations.

Ce principe postule que la somme algébrique du travail (W) et de la chaleur (Q) échangé par le système avec le milieu extérieur est égale à la variation ($U_2 - U_1$) de son énergie interne qui est une fonction d'état (elle ne dépend pas du chemin suivi), alors que (W et Q) pris séparément ne sont pas en général des fonctions d'état.

L'énergie interne U caractérise l'état du système, qui échange de l'énergie avec le milieu extérieur (ME), sous forme de chaleur (Q) ou de travail W .

- Q = chaleur, correspondant à un échange d'énergie par interaction désordonnée des molécules du système avec les molécules du milieu extérieur.

- W = Travail, correspondant à l'énergie échangé sous l'action de forces extérieurs ordonnées à l'échelle macroscopique.

$$\Delta U = W + Q$$

Cas particulier:

- Dans une transformation cyclique: Etat initial \cong Etat final $\Rightarrow U_2 = U_1 \Rightarrow W + Q = 0$

- dans un système isolé: pas d'échange avec le milieu extérieur:

$$W = 0 \quad \text{et} \quad Q = 0$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$$

\Rightarrow l'énergie interne est constante

5.2) Le 2^{ème} principe de la thermodynamique (principe de carnot):

Ce principe établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques. C'est un principe d'évolution qui fut énoncé pour la première fois par sadi carnot en 1824.

Enoncé de la loi:

Selon le second principe de la thermodynamique, toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie. L'entropie S d'un système est l'intégral de dQ/T Où T est la température du système et dQ est la quantité de chaleur infinitésimale reçue par ce système lors d'une transformation réversible. Si la transformation réelle n'est pas réversible mais irréversible, ce qui est toujours plus ou moins le cas des transformations réelles, l'accroissement d'entropie dS est toujours supérieur à dQ/T , ce que l'on écrit généralement sous la forme:

$$dQ \leq TdS$$

En particulier, pour un système isolé ($dQ = 0$), la variation de dS l'entropie est toujours positive ou nulle: c'est la loi d'accroissement d'entropie. En énergétique, cette loi exprime une dégradation de l'énergie du système: même si en quantité, l'énergie reste constante (premier principe), en qualité elle se détériore (deuxième principe). En pratique, la forme dégradée de l'énergie est la chaleur, on peut toujours transformer l'énergie en chaleur, mais on ne peut transformer qu'une partie de la chaleur en énergie (c'est ce qui exprime le rendement de carnot). Carnot a montré que, quel que soit le processus de transformation adopté et le fluide utilisé, une machine thermique ne peut transformer en travail W qu'une partie de la chaleur fournie par la

source chaude Q_1 le reste Q_2 étant transféré à la source froide, on a donc $W = Q_1 - Q_2$ le rendement en travail η est donc inférieur à 1 :

$$\rho = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

5.3) Unités concernant l'énergie:

L'unité d'énergie dans le système international est le Joule (J). Pour des transformations macroscopiques, elle est très petite alors on utilise le kilojoule (KJ) ou le mégajoule (MJ). Ainsi $1 \text{ KJ} = 1000 \text{ J}$ et $1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$ (tableau I.3). Pour les énergies mises en jeu au niveau des atomes, des molécules ou des noyaux, qui sont des entités constituant la matière, on utilise plutôt l'électronvolt (eV) et ses multiples. On a $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$. les énergies mises en jeu dans les réactions chimiques élémentaires sont de l'ordre de quelque eV, celles dans les réactions nucléaires sont supérieure au MeV, soit plus d'un million de fois plus. Dans le domaine électrique, on utilise aussi comme unité d'énergie le watt-heure (Wh) et ses multiples. Le watt-heure représente une énergie de 1 J/s pendant 1 heure, soit : $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ KJ} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ (tableau I.3). Il ne faut donc pas confondre le KWh, qui est une quantité d'énergie, avec le kW qui est une unité de puissance. Pour comparer différentes sources d'énergies, il est d'usage de les rapporter à l'énergie fournie par le pétrole brut. Pour cela on utilise une unité, le tep (tonne équivalent pétrole), dont la valeur est fixé, par convention, à 10^{10} calories $\simeq 42 \text{ GJ} \simeq 11700 \text{ KWh}$. (1 calorie = 4.18 J). Le charbon a un pouvoir calorifique moins élevé que le pétrole. Typiquement compris entre 0.6 et 0.75 tep selon sa qualité (houille, coke, anthracite, etc.). On définit parfois, par convention le tec (tonne équivalent charbon) dont l'équivalence est $1 \text{ tec} = 0.67 \text{ tep}$. Le gaz naturel a un pouvoir calorifique légèrement supérieur à celui du pétrole puisqu'une tonne de gaz naturel liquide vaut 1.096 tep.

	tec (tonne d'équivalent charbon)	tep (tonne d'équivalent Pétrole)	10⁶ KJ	MWh
tec	1	0.67	27.6	7.8
tep	1.5	1	41.8	11.6
10⁶ KJ	0.036	0.024	1	0.28
MWh	0.13	0.086	3.6	1

Tableau (I-2): Energie exprimée en tonne d'équivalent charbon tec ou en tonne d'équivalent pétrole tep

CHAPITRE II
LES ENERGIES NON
RENOUVELABLES ET LA SITUATION
MONDIALE

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas assez rapidement pour être considéré comme inépuisable à l'échelle de l'homme, ou même qui ne se renouvelle pas du tout par opposition aux énergies renouvelables. On peut classer les énergies non renouvelables en deux grandes familles: énergie fossiles et énergie nucléaire.

1) Energies fossiles:

Les énergies fossiles proviennent, comme leur nom l'indique, de la fossilisation de grandes quantités de matière organique, provenant de la décomposition de végétaux et d'animaux ayant vécu lors de la préhistoire. Selon un processus s'étalant sur plusieurs millions d'années, la fossilisation a créé des gisements de charbon, de pétrole, ou de gaz naturel, qui se sont accumulés dans le sous-sol terrestre, à plus ou moins grande profondeur.

Chimiquement, les énergies fossiles appartiennent à la famille des hydrocarbures (constitués d'hydrogène et de carbone). Le carbone, puisé dans l'atmosphère par les plantes, via la photosynthèse, s'est concentré en grande quantité dans ces énergies fossiles. Les hydrocarbures se sont formés au sein de roches-mère. En fonction de la profondeur, des conditions de température et de pression régnant au sein de la roche, la décomposition de la matière organique a abouti à des hydrocarbures solides (charbon), liquides (pétrole, huile de schiste), ou gazeux (gaz de schiste). Les stocks souterrains, qui ont mis des milliers d'années à se former, ne peuvent donc pas se renouveler à l'échelle humaine. Au contraire, ils s'épuisent à mesure de leur exploitation.

1.1) le charbon:

Le charbon s'est formé à l'époque du carbonifère, période qui va de 345 à 280 millions d'années, à partir des végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants, ils se sont lentement décomposés à l'abri de l'air pour aboutir au minerai de charbon. Une épaisseur de 1000 mètre de végétaux conduit, après une lente transformation, à 50 mètre de charbon. Ce phénomène, qui s'est produit dans certaines régions du globe, s'est répété plusieurs fois, conduisant ainsi à des couches de charbon séparées par des couches de sédiments. Le charbon contient des matières organiques volatiles et du carbone en proportion variables. Plus il est ancien, plus il est riche en carbone.

Les matières volatiles s'enflamment facilement mais dégagent moins de chaleur que le carbone qui, par contre, plus difficile à brûler.

Les qualités du charbon qui se forment dépendent des conditions de températures et de pression, croissantes avec la profondeur, ainsi que de la durée de maturation. Elles conduisent, par carbonisation, à la formation de charbons de plus en plus riches en carbone, au pouvoir calorifique de plus en plus élevé. La tourbe (50% à 55% de carbone) se forme en premier, puis se transforme en lignite, d'un aspect terreux, brun, ne contenant que 55 à 75% de carbone. Au cours des millions d'année qui suivent,

sous l'effet de la température et de la pression, le lignite se transforme en houille (75 à 90% de carbone), puis enfin en anthracite (plus de 95%), plus dure, de couleur noire et brillante. L'anthracite se forme à plus de 10km de profondeur.

1.2) le pétrole:

Le pétrole (du bas latin *petra* et *oleum*, soit «huile de roche») est une huile minérale naturelle utilisée comme source d'énergie. Sa formation résulte de la décomposition extrêmement lente de débris végétaux et animaux (plancton), à l'abri de l'air, il y a des millions d'années.

A raison de quelques mètres par million d'année, la roche-mère contenant la matière sédimentée s'est enfouie progressivement, jusqu'à atteindre des profondeurs de 4000m. Plus elle s'enfonce plus la température et la pression augmentent. Le pétrole et le gaz naturel se sont formés sous l'action de bactéries d'abord, puis sous l'effet de ces températures croissantes. En fonction des conditions géologiques, d'autres composants se mélangent aux hydrocarbures, tels que soufre, azote, oxygène, sous formes solide, liquide ou gazeuse. C'est pour cette raison que l'apparence du pétrole brut (pétrole à l'état naturel) varie d'un liquide clair à un produit quasi solide et noir.

Le pétrole brut contient un grand nombre de composés que l'on sépare par distillation en plusieurs fractions: c'est le raffinage. Les hydrocarbures extraits du pétrole brut sont composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Chaque hydrocarbure possède dans ses molécules un nombre d'atomes qui le déterminent. Le butane (C_4H_{10}), le méthane (CH_4), le propane (C_3H_8), l'essence, le kérosène, le gasoil,.....etc.

1.3) le gaz naturel:

Le gaz naturel est un mélange gazeux d'hydrocarbures naturellement présent dans certaines roches poreuses. En 2015, le gaz naturel est la troisième source d'énergie thermique la plus utilisée au monde avec 21% de l'énergie primaire, après le pétrole (31.7%) et le charbon (28.1%).

1.4) L'exploitation des énergies fossiles:

Les énergies fossiles sont des énergies de stock. Elles représentent un concentré d'énergie stockée sous forme d'énergie chimique. Pour libérer l'énergie, il suffit d'une réaction chimique, la combustion, pour transformer l'énergie chimique en chaleur. Cette énergie thermique pourra être utilisée directement (chauffage), ou convertie en autre forme d'énergie (électricité).

L'extraction de ces combustibles fossiles est plus ou moins aisée. Les hydrocarbures ont eu tendance à migrer, en remontant vers la surface, et se sont accumulés dans des réservoirs, à partir desquels on les exploite aujourd'hui. Ils sont dans ce cas faciles à extraire, et sont dits conventionnels. Cependant, lorsque la roche-mère est peu perméable, ils restent piégés dans la roche des profondeurs importantes. On les appelle alors «hydrocarbures de roche-mère», ce qui désigne:

- Le pétrole ou huile de schiste
- Le gaz de schiste

- Le gaz de houille

Ainsi par exemple, le gaz de schiste, aussi appelé gaz de roche-mère, est piégé dans les porosités de la roche où il s'est formé, le schiste étant à la fois la roche-mère et la roche-réservoir. Cette roche étant poreuse, mais peu perméable, l'extraction de ce gaz est plus difficile: elle nécessite une fissuration artificielle de la roche, pour en augmenter la perméabilité, afin d'augmenter le taux de récupération du gaz.

2) Energie nucléaire:

L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison des constituants du noyau des atomes. Ce noyau est un assemblage de protons, de charge positive, et de neutrons sans charge très fortement liés malgré la répulsion électrique entre protons. Le noyau est extrêmement compact (10^{-12} mm), 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même. Dans les atomes lourds, le noyau contient beaucoup de protons qui se repoussent. Certains de ces noyaux (par exemple d'uranium ou de thorium) peuvent devenir instable et se rompre en libérant une partie de leur énergie de liaison, c'est la fission de l'atome. Dans les atomes très légers, au contraire, deux noyaux peuvent se fondre pour former un atome plus lourd mais plus stable en dégageant une énergie considérable. C'est la fusion, par exemple deux noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. Alors Il existe deux types de réactions nucléaires libératrices d'énergie: la fission et la fusion.

2.1) la fission:

La fission est la cassure des noyaux lourds, comme ceux de l'uranium 235 ou plutonium 239, sous l'effet de l'impact d'un neutron. Elle transforme chaque noyau en deux autres noyaux environ deux fois plus petit. C'est l'énergie libérée par cette réaction qui est utilisée dans les réacteurs électronucléaires figure (I.1).

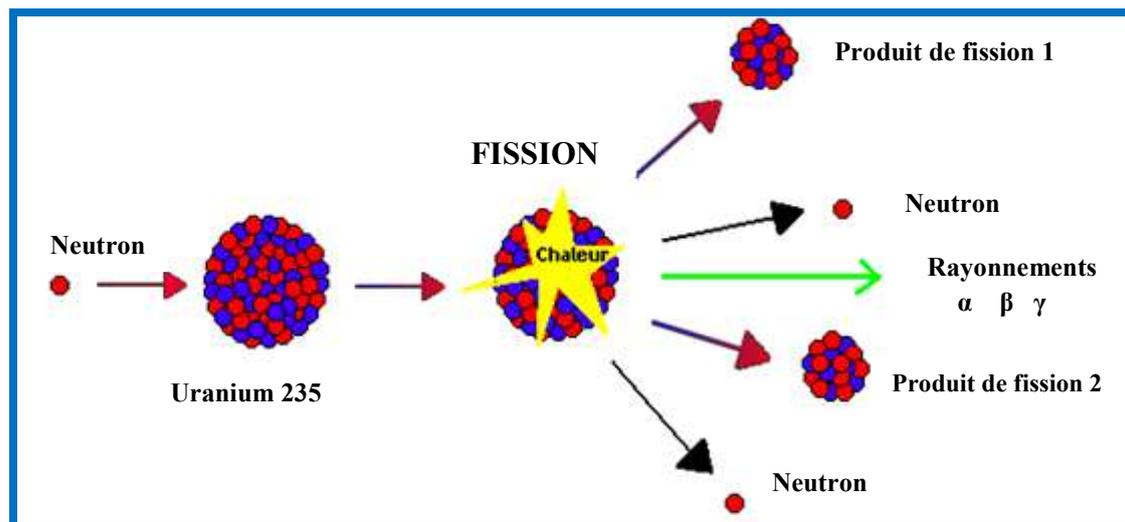


Figure (I.1) : Schéma d'ensemble de la réaction de fission nucléaire

2.2) la fusion:

La fusion nucléaire est un processus mettant en scène deux noyaux légers, fusionnant en un noyau plus lourd. La fusion nucléaire se produit à des températures extrêmement élevées, car il faut suffisamment d'énergie aux noyaux pour qu'ils puissent se heurter et fusionner. Ce genre de réaction nucléaire se trouve dans la nature: au cœur des étoiles, deux noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau de deutérium, puis deux noyaux de deutérium fusionnent pour donner de l'hélium (en réalité la réaction est un peu plus compliquée). La fusion nucléaire libère énormément d'énergie. Figure (II.2).

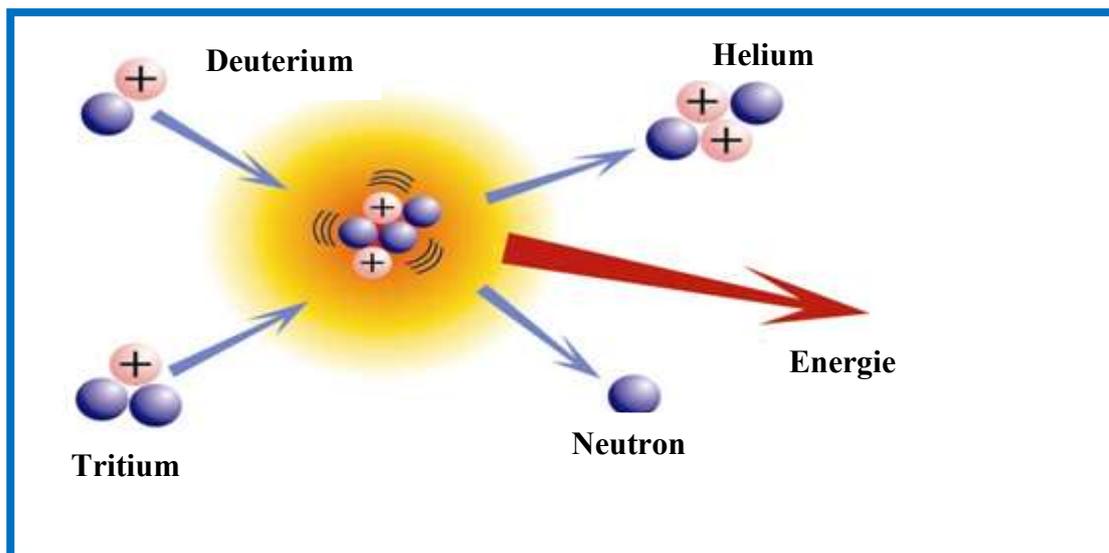


Figure (II.2) : Schéma du processus de fusion.

Les premières applications de l'énergie nucléaire ont été militaires, qu'il s'agisse de l'exploitation de la fission (Hiroshima: 1945) ou de la fusion (bombe à hydrogène: 1952).

Les applications civiles de la fission contrôlée ont démarré dès 1950 aux Etats-Unis pour la production d'électricité. L'énergie nucléaire a aussi donné lieu à d'autres applications majeures pour l'humanité, en particulier en médecine, en radiothérapie et en imagerie médicale, et dans le spatial pour la propulsion des satellites.

Enjeux par rapport à l'énergie:

- Une exceptionnelle densité (1 gramme d'uranium 235 produit la même quantité d'électricité que 2 tonnes de fioul ou 3 tonnes de charbon).
- Un fonctionnement sans émission de dioxyde de carbone.

3) Les inconvénients des énergies fossiles:

L'extraction et la consommation du pétrole et du charbon sont écologiquement

polluantes. Aussi, ces carburants sont régulièrement la source de conflits internationaux (en particulier le pétrole). D'un autre côté le gaz naturel entraîne des risques d'explosion aussi bien au niveau industriel que domestique.

La formation des gisements fossiles a nécessité des dizaines de millions d'années mais, à leur rythme d'exploitation actuel, les réserves mondiales aujourd'hui connues seront épuisées dans quelque dizaines d'années (quelques centaines pour le charbon). Ce ne sont donc pas des énergies sur lesquelles nous pourrions compter indéfiniment.

3.1) Les réserves de combustibles fossiles :

Le simple calcul du ratio R/P (réserves prouvées / consommation constatée) conduit à un chiffre qui caractérise la durée de vie des réserves. Il ne faut pas donner à ce chiffre - exprimé en années – une signification absolue car les deux termes du ratio comportent des incertitudes :

1) d'une part les progrès dans la recherche et l'exploitation des gisements ont tendance à augmenter le taux de récupération et donc, par là même, le volume des réserves prouvées et la « durée » de ces réserves.

2) d'autre part, la croissance de la demande dans les prochaines décennies conduit au doublement de la consommation annuelle ce qui a évidemment l'effet inverse sur la « durée » des réserves. Le tableau 3 résume la situation en ce qui concerne le pétrole, le gaz naturel et les minéraux solides (charbon, bitumineux et lignite).

	Réserves mondiales prouvées	R/P (au rythme actuel de la consommation) (années)
Pétrole (GTep)	235.8	52.9
Gaz naturel (trillion m³)	187.3	55.7
Minéraux solides (milliards tones)	861	109

Tableau (II.1) – Réserves d'énergies primaires fossiles (base 2012)

Source : Mémento sur l'énergie – édition 2013

3.2) Energie fossile et environnement:

3.2.1) La pollution atmosphérique:

90% de la pollution atmosphérique sont dus aux activités humaines (procédés industriels, circulation automobile, centrales thermiques, chauffage domestique, incinération des ordures ménagères.....). Les 10% restant ont des origines naturelles (volcanisme, orages, activités des micro-organismes,.....).

Les principaux polluants atmosphériques et leurs effets sur la santé sont représentés sur le tableau (II.2).

NOM	CAUSES	EFFETS
Gaz carbonique CO₂	Combustion, respiration	Effet de serre
Monoxyde de carbone CO	Chaudière mal réglée, moteurs à essence et à gazole	Maladie cardiovasculaire, intoxication mortelle si aération insuffisante.
Oxyde d'azote NO_x	Secteur de transport, centrales thermiques à flamme (3% des émissions de NO _x): combustion du charbon et du fioul	Effet de serre, pluies acides Pollution photochimique (ozone)
Dioxyde de soufre SO₂	Secteur du transport, industriel, agricole, résidentiel. Centrales thermiques à flamme (7% des émissions SO ₂): combustion du charbon et du fioul	Pluies acides, irritation respiratoire

Tableau (II.2): les principaux polluants atmosphériques et leurs effets sur la santé

3.2.2) L'effet de serre

L'effet de serre est le processus selon lequel le rayonnement solaire qui atteint la terre et qui est réfléchi par celle-ci partiellement conservé dans l'atmosphère par suite de son absorption par des molécules de certains gaz contenus dans l'air. La principale

source d'émission de gaz à effet de serre est la combustion des énergies fossiles pour la production d'électricité, le fonctionnement des usines et dans l'usage domestique. La seconde cause est la déforestation car en temps normal les forêts assurent une modulation naturelle de l'effet de serre en absorbant une partie de dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère.

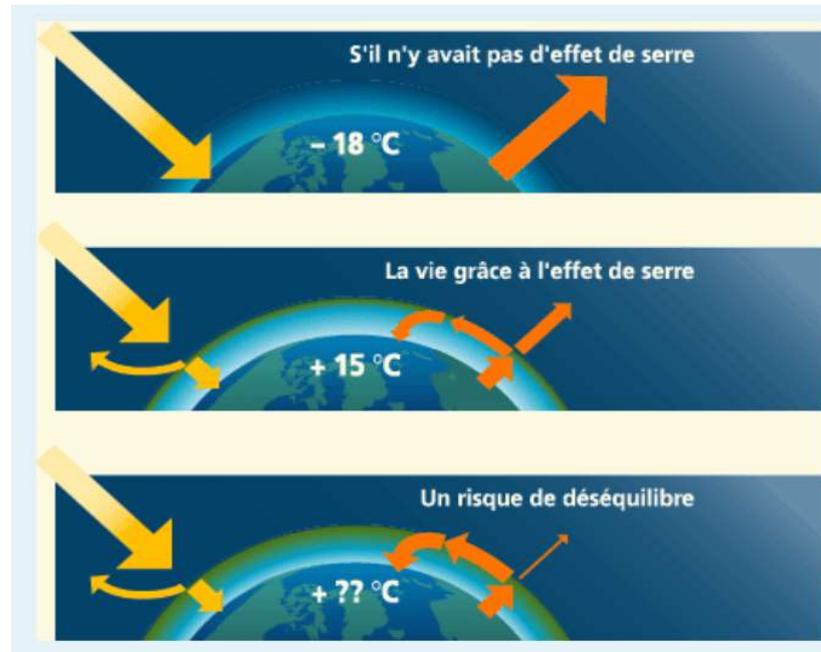


Figure (II.3) : l'effet de serre

3.2.3) Le réchauffement climatique:

Le réchauffement climatique est l'augmentation de la température moyenne à la surface de la planète. Il est dû aux gaz à effet de serre rejetés par les activités humaines (industrie, transports, agriculture...) et retenus dans l'atmosphère. Au cours du XX^{ème} siècle, la température a augmenté de $0,6^{\circ}\text{C}$ en moyenne. Le réchauffement moyen pourrait atteindre de $1,4^{\circ}\text{C}$ à $5,8^{\circ}\text{C}$ de plus d'ici la fin du XXI^{ème} siècle.

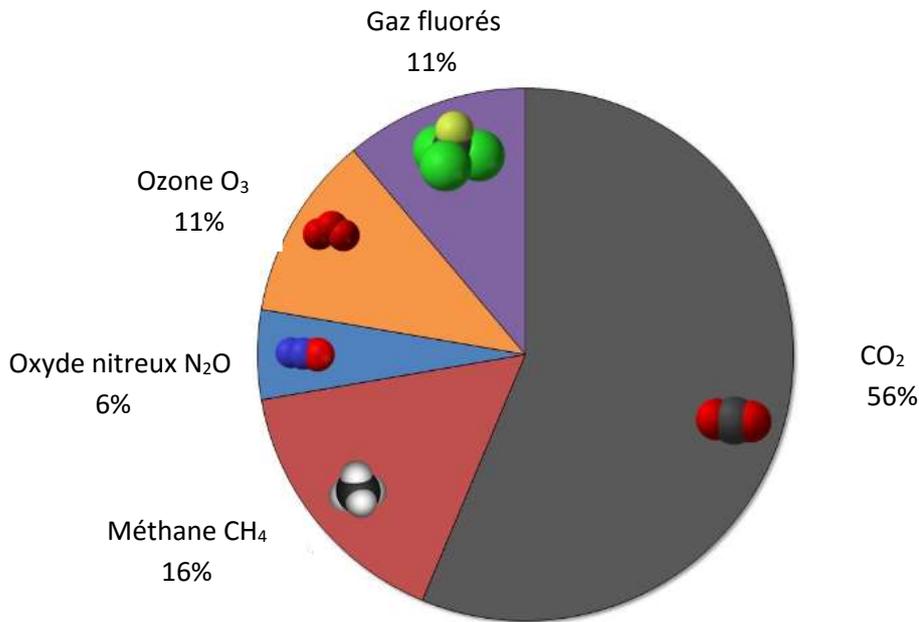


Figure (II.4): Contributions de différents gaz à effet de serre au réchauffement global d'origine humaine en 2010 (en%) (Source CDIAC)
(CDIAC : Carbon Dioxide Information Analysis Center)

3.2.4) Les pluies acides:

Les pluies acides sont des pluies dont le pH est inférieur à 5,6. Elles sont dues à la transformation chimique, dans l'atmosphère, d'oxyde d'azote (NO et NO₂) et de soufre (SO₂) en acide nitrique (HNO₃) et sulfurique (H₂SO₄). Les pluies acides contribuent au dépérissement des forêts. Elles mettent aussi en danger la vie dans les lacs. En effet, lorsque le pH devient inférieur à 4.3 le lac meurt: il n'y a pas ni faune, ni flore. Elles dégradent aussi les pierres (surtout celles contenant du calcaire) des statues et des monuments ainsi que d'autres matériaux de construction.

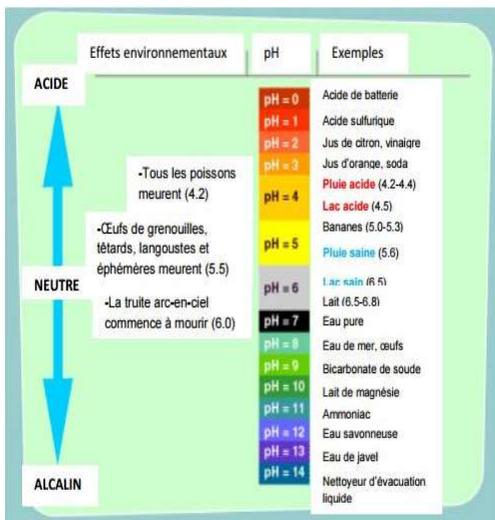


Figure (II.5) : Echelle du PH

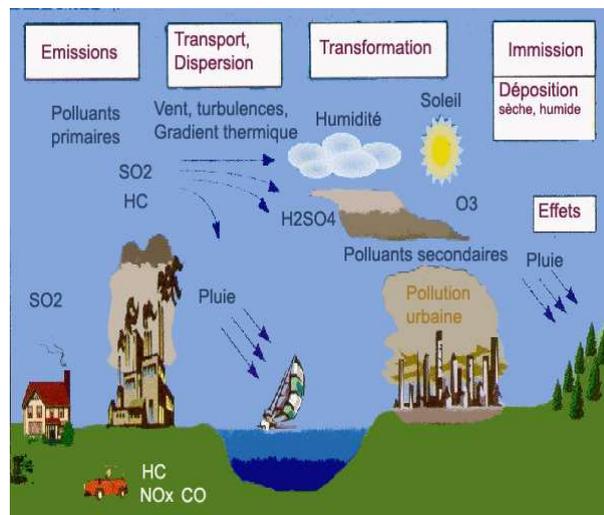


Figure (II.6) : Les pluies acides et la pollution

4) Les inconvénients des énergies fissiles:

Les énergies fissiles ont des ressources limitées bien que l'uranium (par exemple) utilisé dans les centrales nucléaires soit plus présent sur terre que les énergies fossiles et qu'on peut produire énormément d'énergie avec moins d'uranium que d'énergie fossile. Cette source d'énergie ne sera un jour plus disponible. Le défaut majeur de cette source et le danger qu'elle peut provoquer chez l'homme si on ne parvient pas à contrôler l'énergie. De grandes catastrophes pourraient s'abattre avec notamment des radiations qui amèneraient de graves maladies comme des cancers. Ces radiations seraient des catastrophes pour l'humanité puisque les personnes atteintes pourraient garder des anomalies pendant toutes leurs vies et pourraient même les transmettre à leurs enfants.

Des cancers pourraient développer. Les catastrophes écologiques seraient multiples.

CHAPITRE III

LES ENERGIES RENOUVELABLES DANS LE MONDE

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres.

Les sources d'énergie renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

1) L'énergie solaire:

Le flux lumineux en provenance du soleil a une puissance énergétique de 1368 W/m^2 , mais cette énergie dépend de l'endroit où on se trouve, de l'inclinaison de la surface du sol par rapport aux rayons (la latitude) et des conditions atmosphériques. Ainsi, dans les meilleures conditions on peut atteindre au sol une énergie de 1000 W/m^2 . Sur une année, environ 20% en moyenne de flux lumineux solaire arrive au sol. Dans les déserts on peut obtenir une énergie de l'ordre de $6 \text{ KWh/m}^2/\text{jour}$, alors qu'elle sera de $1 \text{ KWh/m}^2/\text{jour}$ dans les zones polaires (2 à 4 KWh en Europe). Il existe aujourd'hui deux technologies permettant de transformer l'énergie solaire pour les besoins humains: le solaire photovoltaïque pour la production d'électricité et le solaire thermique pour la production de chaleur.

1.1) L'énergie solaire photovoltaïque:

Découvert par Antoine Becquerel, à la fin du XIX^{ème} siècle, l'effet photovoltaïque transforme directement la lumière solaire en énergie électrique grâce à une cellule photovoltaïque.

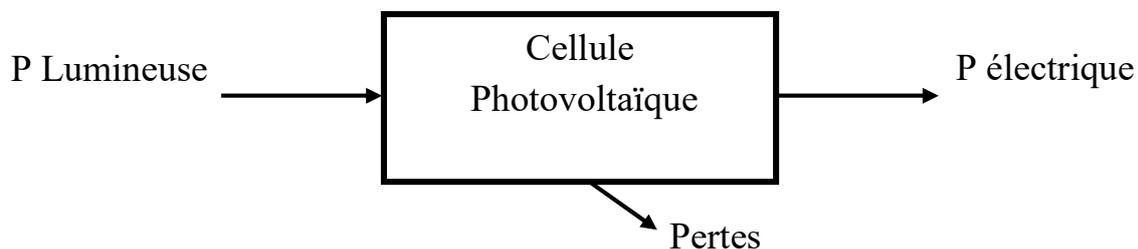


Figure (III.1): effet photovoltaïque

1.1.1) Cellules, panneaux et champs photovoltaïques:

La cellule photovoltaïque est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques, parfois les panneaux sont appelés modules photovoltaïques

Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur même site, on obtient un champ photovoltaïque.

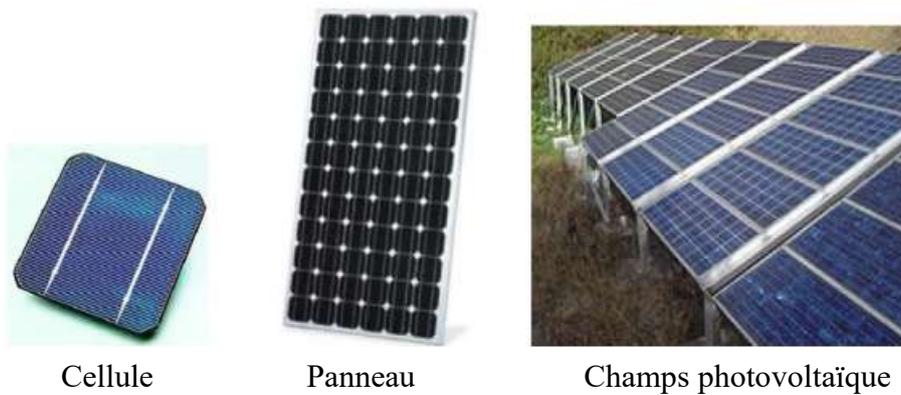


Figure (III.2): Cellules, panneaux et champs photovoltaïques

1.1.2) principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui génère de l'électricité. Elle peut être utilisée seule (calculatrice, montre...) mais, la plupart du temps, les cellules sont regroupées dans des modules ou panneaux photovoltaïques. Lorsqu'un matériau (semi conducteur) est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons auront l'énergie nécessaire pour franchir le GAP: les électrons sont décrochés des couches de valence pour se retrouver dans la couche de conduction. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque (figure III.3).

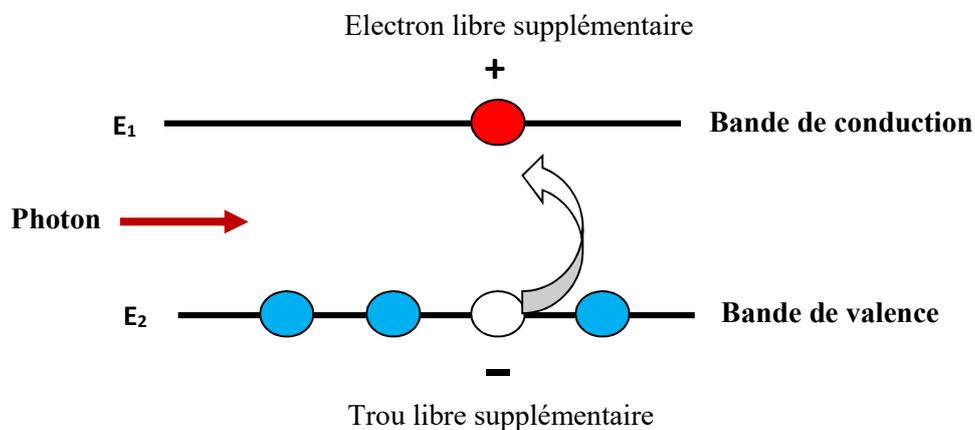


Figure (III.3): le photon incident crée un pair électron / trou

Dopage N ou P:

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -). Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +) (figure III.4).

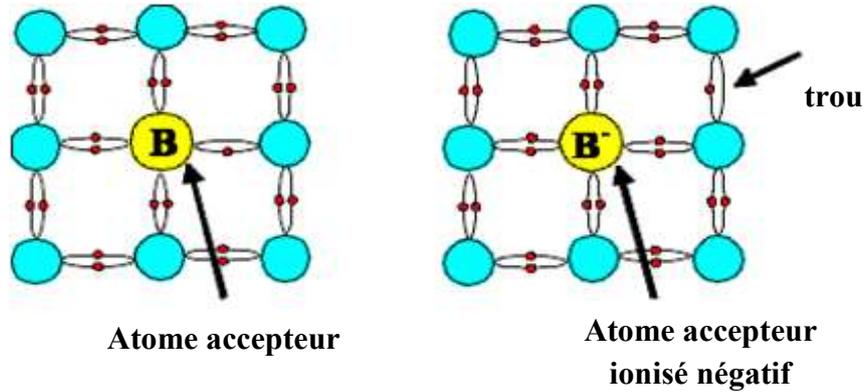


Figure (III.4) : Semi conducteur dopé p

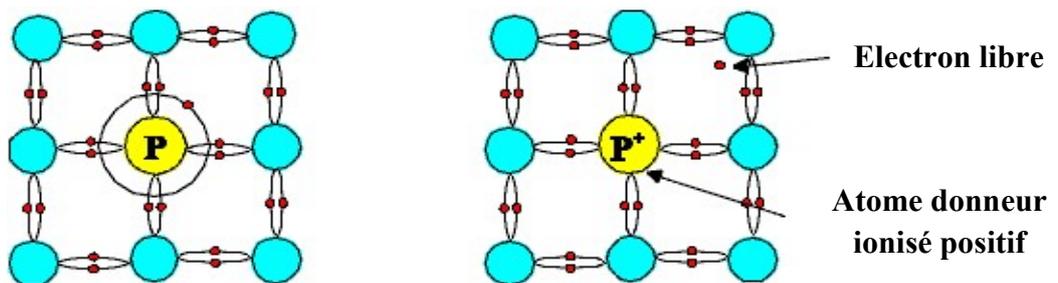


Figure (III.5) : Semi conducteur dopé n

La jonction PN:

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique (Figure III.5).

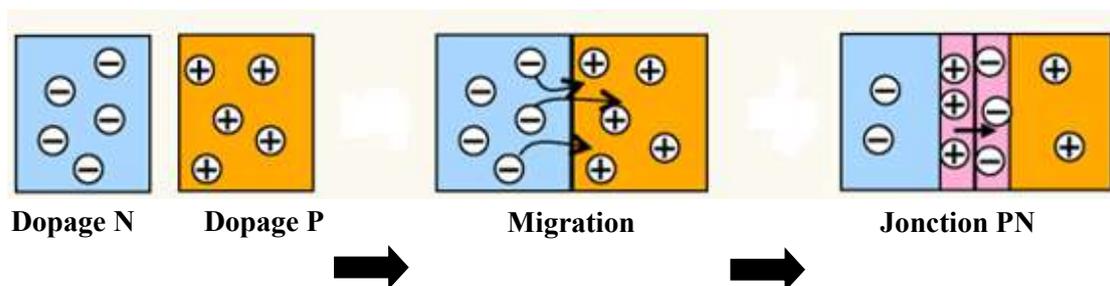


Figure (III.6): La jonction PN

L'effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif) (jonction p-n (ou n-p)). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. Une cellule photovoltaïque de 1 m² délivre une puissance d'environ 100 à 200 w.

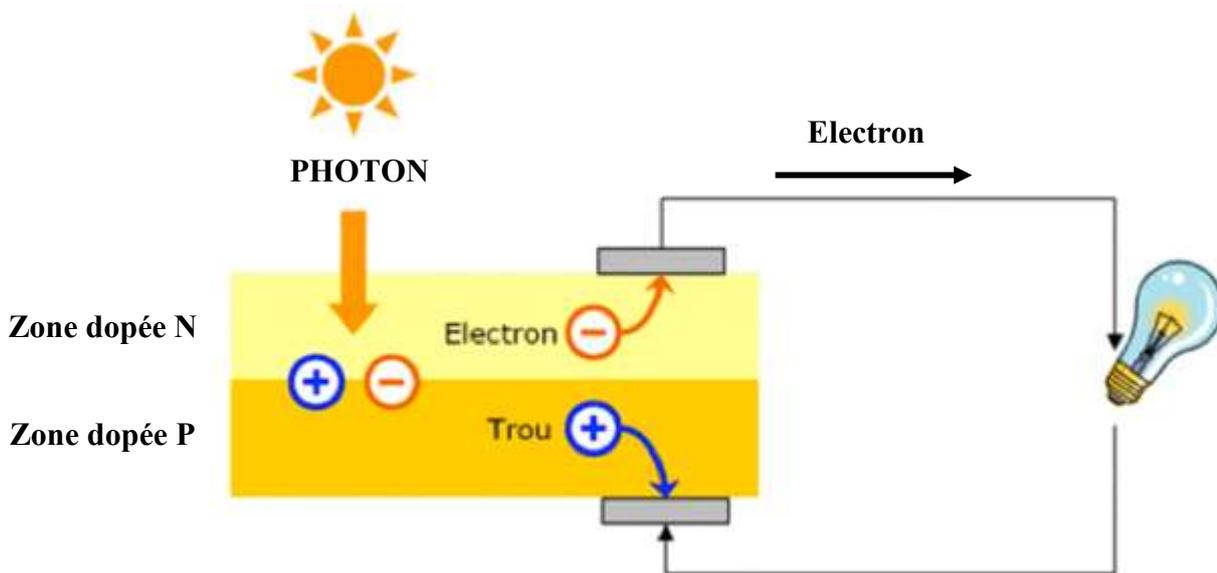


Figure (III.7): principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.1.3) Différents type de technologies de cellules photovoltaïques:

Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus répandues sur le marché sont les cellules en silicium cristallin et les cellules en couches minces. D'autres en sont au stade de la Recherche et Développement.

a) Les cellules en silicium cristallin:

Ce type de cellule est constitué de fines plaques de silicium, un élément chimique très abondant et qui s'extrait notamment du sable ou du quartz. Le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal ou de plusieurs cristaux : on parle alors de cellules monocristallines ou poly cristallines. Les cellules en silicium cristallin sont d'un bon rendement (de 14 à 15 % pour le poly cristallin et de près de 16 à 19 % pour le monocristallin). Elles représentent un peu moins de 90 % du marché actuel.

b) Cellules solaires amorphes:

En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par ex. le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à env. 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est plus nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8%.

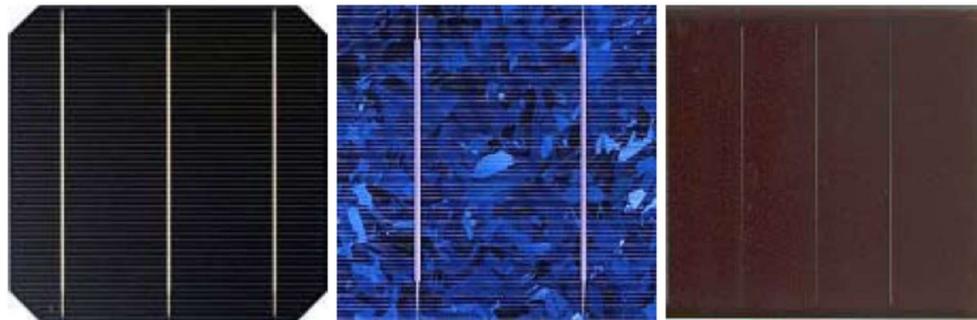


Figure (III.8): cellules solaires monocristallines, poly cristallines, amorphes

c) Les cellules en couches minces:

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique, d'acier... Cette technologie permet de diminuer le coût de fabrication, mais son rendement est inférieur à celui des cellules en silicium cristallin (il est de l'ordre de 5 à 13 %). Les cellules en couches minces les plus répandues sont en silicium amorphe, composées de silicium projeté sur un matériel souple. La technologie des cellules en couches minces connaît actuellement un fort développement, sa part de marché étant passée de 2 %, il y a quelques années, à plus de 10 % aujourd'hui.

d) Les cellules organiques :

Composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat de plastique ou de verre, ces cellules, encore au stade expérimental, offrent un rendement moyennement élevé (de l'ordre de 5 à 10 %) mais présentent des perspectives intéressantes de réduction de coûts.

1.1.4) Puissance lumineuse et éclairement:

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m^2 , 25 °C), on parle alors de *watts-crête* (Wc) ou de *puissance-crête*. Le rendement d'un photogénérateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photogénérateur :

$$\eta = P_m / E.S$$

Où S est la surface du photogénérateur. On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête :

$$\eta = P_c / 1000.S$$

Exemple de calcul:

Prenons un panneau en silicium poly cristallin de 40 Wc (2,35 A/17 V) d'une surface de 360cm² :

$$\eta = \frac{40}{0.36 \times 1000} = \frac{2.35 \times 1.7}{0.36 \times 1000} = 0,11$$

Ce panneau a un rendement (surface totale) de 11 % sous 1 000 W/m².

1.1.5) Avantages et inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville - L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite. - Sur les sites isolés l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût. - Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans. - Les systèmes photovoltaïques sont fiables: aucune pièce employée n'est en mouvement. - Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes. - La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire. -Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> -Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé. -Le rendement réel de conversion d'un module est faible. -Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente -Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante -Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans)

1.2) L'énergie solaire thermique:

Le soleil constitue une source d'énergie gratuite et non polluante, Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. L'homme utilise l'énergie solaire thermique depuis l'antiquité. Archimède aurait fait brûler les navires romains assiégeant Syracuse en focalisant les rayons du Soleil sur leurs voiles à l'aide de 70 miroirs.

On peut obtenir directement de la chaleur à partir de l'énergie solaire ; il suffit d'exposer au rayonnement solaire un corps qui chauffe et qui peut échanger de la chaleur avec un système adapté. Ainsi, on peut chauffer des maisons et l'eau destinée à des usages sanitaires (chauffe eau solaire). Pour cela, on utilise deux dispositifs :

- 1) un dispositif de capteurs plans situé sur le toit (chauffe l'eau et/ou la maison)
- 2) un mur Trombe-Michel (chauffe uniquement la maison).

Dans ces deux dispositifs, le principe de base est le même. Il consiste à chauffer un fluide (air

ou eau) grâce à l'énergie solaire recueillie. Ce fluide, une fois chauffé, va céder sa chaleur à l'eau sanitaire, à l'eau du circuit de chauffage ou à l'air de la maison.

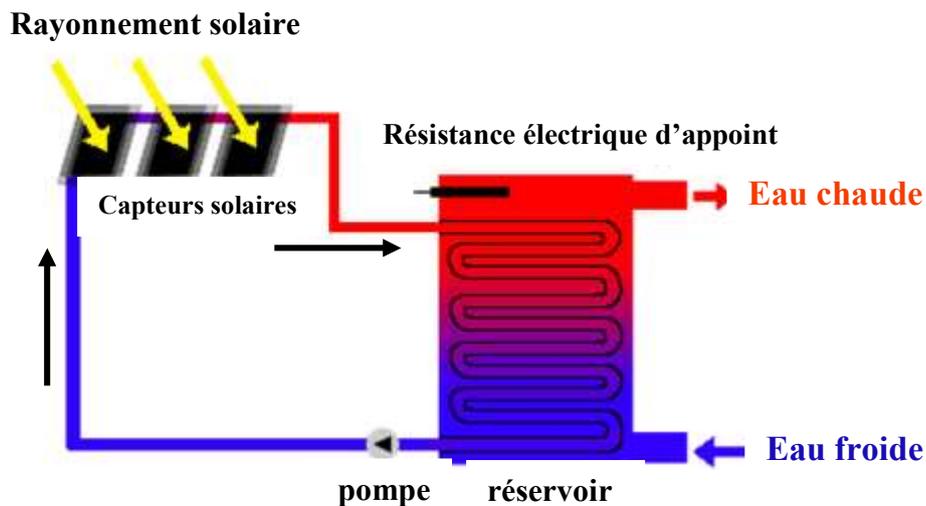


Figure (III.9): Energie solaire thermique

2) L'énergie éolienne:

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux

atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise les ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements. Enfin, le démantèlement des installations et la gestion des déchets générés pourront se faire sans difficultés majeures et les sites d'implantation pourront être réutilisés pour d'autres usages.

2.1) les composants d'une éolienne:

Les éoliennes utilisent la force du vent pour la transformer en électricité. La machine se compose des principaux éléments suivants:

- a) **Le mât** dont la hauteur va de 20 à plus de 100m.
- b) **La nacelle** qui contient le moteur et les différents composants mécaniques.
- c) **Le rotor** comprenant le nez et les pales d'un diamètre de 3 à 90m. on compte généralement 3 pales sur les éoliennes modernes.

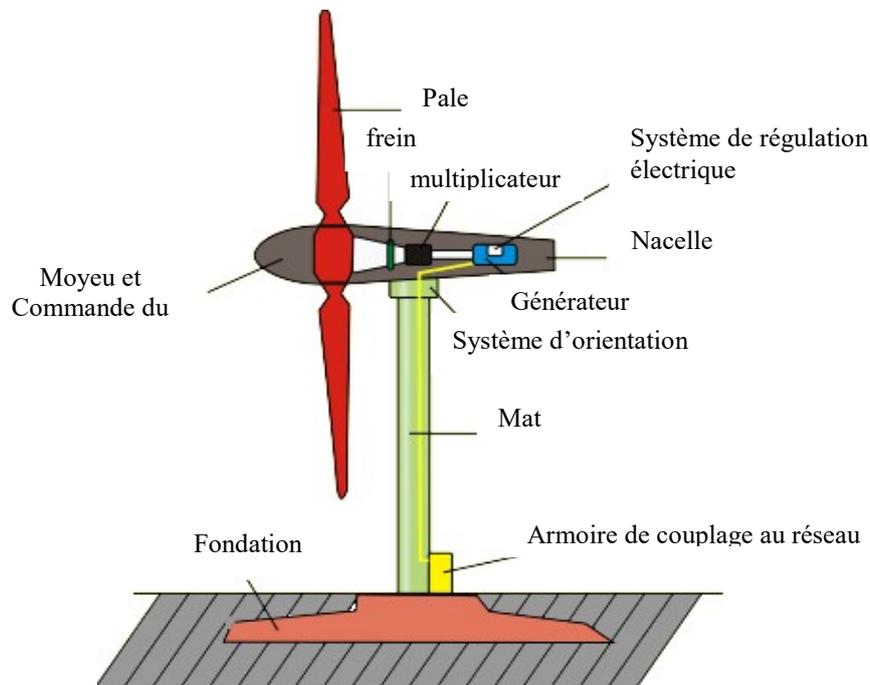


Figure (III.10): schéma d'une éolienne

2.2) le fonctionnement d'une éolienne:

1. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui elles-mêmes font tourner le générateur.
2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique. C'est le même principe que pour une dynamo ou un alternateur de voiture.
3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou des batteries de stockage.

Grace à un multiplicateur, la vitesse de rotation des pales (entre 15 et 30 tours par minute) est multiplié afin de faire tourner le générateur entre 1000 et 2000 tours par minutes.

Pour obtenir un rendement optimal, la vitesse du vent doit être d'environ 50km/h. Au-delà de 90 km/h, les éoliennes ne peuvent plus tourner car cela endommagerait trop vite les mécanismes.

Pour fonctionner, une éolienne a besoin d'un vent d'au moins 10 km/h.

L'implantation des éoliennes doit donc tenir compte de la vitesse moyenne du vent autant que de sa direction afin d'avoir le meilleur rendement possible.

La capacité d'une éolienne à produire de l'énergie s'appelle la puissance et s'exprime en watts. La puissance des éoliennes varie également suivant leur taille. Il existe des petites éoliennes permettant de générer 400 w et des grosses éoliennes industrielles pouvant avoir une puissance jusqu'à 5 MW.

3) l'énergie géothermique:

L'énergie géothermique (du grec: géo = la terre et thermie = la chaleur) désigne l'énergie provenant de la chaleur naturelle présente dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre. On distingue trois types de géothermie :

- 1) la géothermie peu profonde à très basse température (inférieure à 50°C)
- 2) la géothermie profonde (jusqu'à 2000 m) à basse énergie (50 à 100°C), moyenne (100 à 150°C) ou haute énergie (contexte volcanique, supérieure à 150°C)
- 3) la géothermie très profonde (de 5000 à 10000 m) à très haute température (jusqu'à 300°C)

La géothermie de basse et très basse énergie est utilisée pour alimenter les réseaux de chaleur (chauffage urbain).

La géothermie moyenne et haute énergie permet la production d'électricité.

3.1) principe d'une centrale géothermique :

Le principe d'une centrale géothermique est d'extraire la chaleur contenue dans le sol, soit pour l'utiliser sous forme de chauffage (réseau de chaleur), soit pour la transformer en électricité, ou les deux à la fois.

En haute et très haute énergie, la vapeur jaillit avec assez de pression pour faire tourner une turbine, afin de produire l'électricité.

En moyenne énergie, la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire : on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre, que l'on chauffe avec l'eau géothermale. Ce fluide se charge en énergie thermique, entre en ébullition et se vaporise, faisant tourner une turbine dont le mouvement, transmis à l'alternateur, produit de l'électricité.

Une centrale géothermique est donc une centrale thermique.

3.2) Puissance produite:

Sur un site idéal, la géothermie profonde haute température permet des puissances installées de 5 MW. La cogénération permet de coupler la centrale électrique à un réseau de chaleur, et de produire un bonus de 10 à 15 MWth de chaleur.

3.3) Ressources:

La géothermie est une énergie renouvelable, dont les ressources sont considérables. Les réserves ne s'épuisent pas au fur et à mesure que l'on s'en sert. La chaleur est stockée dans la roche (les gisements de roches chaudes et sèches représentent la majeure partie du potentiel géothermique mondial). L'eau, qui permet de capter la chaleur et de la remonter en surface, se renouvelle soit naturellement, par ruissellement des eaux de surface, soit grâce à la technologie, par injection artificielle.

3.4) Les applications de la géothermie:

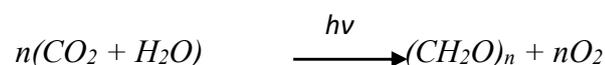
Nous pouvons distinguer deux types d'applications:

L'utilisation directe de la chaleur : le fluide caloporteur peut être sous forme liquide ou sous forme de vapeur. Ces applications directes de la chaleur sont utilisées pour le chauffage urbains, le chauffage des serres mais aussi pour tout un ensemble de procédés industriels.

La production d'électricité : le fluide caloporteur doit avoir une température supérieure à sa température d'ébullition pour être en présence de vapeur. Il est utilisé pour actionner une turbine qui permet de produire de l'électricité comme dans une centrale électrique thermique classique. Dans le cas où le fluide caloporteur n'est pas sous forme de vapeur, on utilise son énergie pour vaporiser un autre fluide (le fluide dit moteur) qui a une température d'évaporation plus basse que celle de l'eau. Ce sont les vapeurs de ce fluide qui sont détendues dans la turbine.

4) La biomasse:

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Les végétaux accumulent, lors de leur croissance, de l'énergie dans des liaisons chimiques carbone-hydrogène par le processus de photosynthèse que l'on peut représenter sous la forme simplifiée suivante:



La biomasse Comprend trois familles principales:

- Les bois énergie ou biomasse solide
- Le biogaz ou La méthanisation

- Les biocarburants

4.1) Les bois énergie ou biomasse solide:

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt.

1mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh.

4.2) Le biogaz ou La méthanisation:

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène: on parle de «digestion anaérobie».

Matières premières:

- Déchets organiques des communes: les poubelles des ménages
- Déchets organiques industriels: agro-alimentaire, abattoirs...
- Déchets agricoles: lisier, fumier et les résidus de récolte...
- Sous-produits de processus industriels: glycérine...

1 tonne de ↓	m ³ de biogaz	Equivalent en litre de fioul	KWh électrique
Lisier	16	11	30
Fumier	60	35	100
Paille	220	120	350
Graisse	450	350	1000

4.3) Les biocarburants:

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques Les deux principales catégories sont :

- Huile végétale carburant
- Bioéthanol

a) Huile vegetal carburant:

Dès 1891, Rudolph Diesel, convaincu que l'huile végétale (huile de palme, huile de tournesol, huile de colza etc) est utilisable au même titre que le pétrole et le charbon.

Le recyclage des huiles de friture et d'autres résidus gras Peut être mélangé avec le diesel.

b) Bioéthanol:

Fabriquer à partir du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs...) par fermentation.

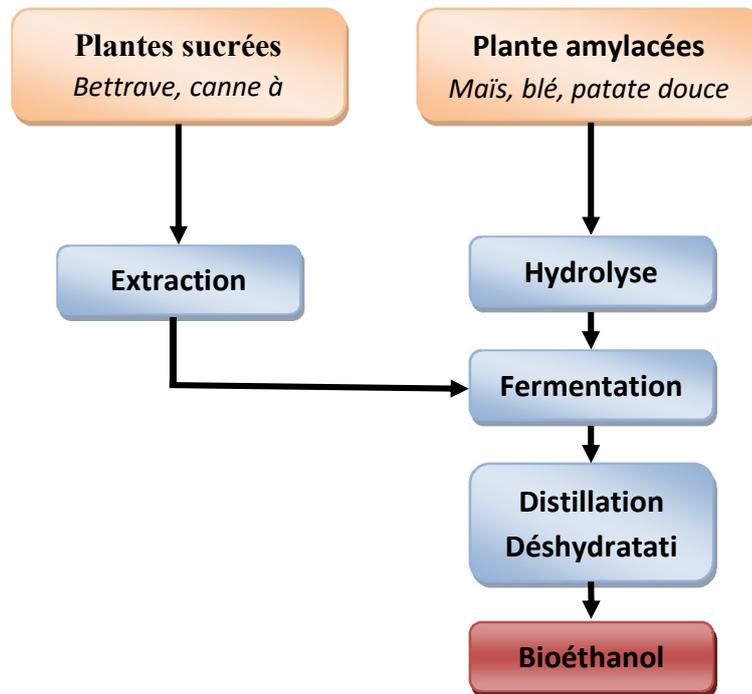


Figure III.10: fabrication du bioéthanol

5) L'énergie des mers ou énergie marine:

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.

6) L'énergie hydraulique:

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité.

L'énergie hydraulique Comprend trois familles principales:

6.1) Hydrolienne:

Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles, une hydrolienne est une turbine hydraulique (sous-marine ou à flots) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur.

6.2) Marémotrice:

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées et causés par l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil. Elle est utilisée soit sous forme d'énergie potentielle (l'élévation du niveau de la mer), soit sous forme d'énergie cinétique (les courants de marée).

6.3) Barrages hydrauliques:

Une centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à une chute d'eau, entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

Les différents types de centrales:

- a) **Les centrales de basse chute** : moins de 40 m avec un débit important. Elles produisent sans interruption.
- b) **Les centrales de moyenne chute** : 30 à 300 m, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes.
- c) **Les centrales de haute chute** : chutes supérieures à 300 m Leur rapidité de démarrage permet de répondre aux consommations.

L'énergie hydraulique a plusieurs avantages, notamment celui commun aux énergies renouvelables de ne pas dégager de gaz à effet de serre pendant leur utilisation.

7) Hydrogène:

Il s'agit en fait de l'utilisation de l'hydrogène en tant que combustible pouvant ainsi remplacer un combustible conventionnel pour produire de l'énergie. Composé d'un proton et d'un électron, l'hydrogène est le composant chimique le plus répandu sur la surface de la terre ou dans les mers. L'usage de l'hydrogène repose actuellement surtout sur le principe de la pile à combustible qui est l'objet de nombreux travaux de recherche

actuellement parce qu'il pourrait constituer à l'avenir une solution devant l'épuisement des énergies non renouvelables. Le procédé consiste à combiner de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité alimentant un moteur électrique avec un rendement d'environ 50 %. Dans un véhicule 75 litres d'hydrogène liquide ou 25 litres comprimés équivalent à 40 litres d'essence pour 500 Km d'autonomie. Les contraintes majeures qui le caractérisent sont:

- Sa production actuelle qui nécessite autant d'énergie (hydrolyse, craquage des hydrocarbures, ...etc.) qu'il en produit.
- Son stockage et son exploitation extrêmement risqués (inflammable et explosif).
- Son prix de revient très élevé pour le moment.
- Le prix de revient de la pile à combustible très élevé: 100 fois le moteur traditionnel.

8) Le stockage de l'énergie:

Principales formes d'énergie renouvelables (sauf géothermie et marémotrice) sont stockées:

- A court terme : énergie hydraulique et éolienne
- A moyen terme : biomasse
- A long terme : combustibles fossiles

8-1) Nécessité de stocker l'énergie dans le contexte actuel

- Développement des énergies intermittentes
- Fluctuations des consommations
- Augmentation des productions décentralisées
- Nouvelles technologies de communication

8.2) Le stockage de l'énergie mécanique

- Stockage sous forme d'énergie potentielle:

- Barrage hydraulique et pompage de l'eau vers un barrage pendant les heures creuses. Rendement 90%. Permet le stockage de l'électricité
- Compression de l'air et stockage de l'air comprimé dans un dispositif géologique. Récupération par détente dans une turbine de l'air comprimé. (Rendement 40% qui peut être augmenté par récupération de la chaleur de compression ou en effectuant des compressions isothermes par l'intermédiaire d'un liquide).

- Stockage sous forme d'énergie cinétique:

Stockage par volant d'inertie (disque lourd) Pour accumuler l'énergie un moteur accélère le disque. L'énergie est récupérée en ralentissant le disque avec un frein/générateur d'électricité. Très utilisé pour régulariser la fourniture d'énergie dans les moteurs thermiques. Développement en cours dans les transports urbains « électriques ».

8.3) Le stockage chimique et biologique

- Accumulateurs électrochimiques (batteries, piles). Utilisés à faible échelle. Ils sont chers, à durée de vie limitée et posent des problèmes de pollution en fin de vie.
- Supercondensateurs : condensateurs avec électrolyte conducteur ionique qui permet une haute densité d'énergie stockée et une restitution à haute puissance. En développement.
- Carburants dont hydrogène sous forme gaz (grande diffusion à travers les matériaux), liquide (basses températures) ou solide (adsorption). Le vecteur hydrogène peut servir à stocker de l'électricité. Electrolyse pendant la phase de charge et pile à combustible pendant la phase de décharge
- Photosynthèse : Biomasse, biocarburants, huiles, graisses...

8.4) Le stockage thermique:

- Stockage par chaleur sensible: Dans ce cas l'énergie stockée dépend essentiellement de la capacité thermique du matériau et de l'élévation de température. L'eau est un très bon matériau « stockeur »
- Stockage par chaleur latente: C'est le changement de phase du matériau qui permet le stockage de la chaleur latente. Le principal avantage est que les transformations se font à température quasi-constante (corps purs et mélanges). Le plus souvent on utilise la transition solide-liquide.

CHAPITRE IV

**L'HYDROGENE ET LE STOCKAGE DE
L'ENERGIE**

1-Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?

Une pile à combustible est un système où l'énergie chimique d'un composé - stocké de façon indépendante et renouvelable – est convertie directement en énergie électrique (figure IV-1). Ce composé, ne fait pas partie du système.



Figure IV-1 : Schéma de principe de conversion directe en électricité

Comme la pile classique (dite Volta) dont la fonction est de produire de l'électricité à la demande on a par analogie aussi appelé le système pile.

Cependant, contrairement à la pile de Volta où la production d'électricité est basée sur les réactions chimiques irréversibles qui consomment certains réactifs présents, la pile à combustible, elle, produit de l'électricité sans limite, tant qu'elle est alimentée en réactifs chimiques.

2- structure d'une pile à combustible :

Une pile à combustible se compose d'un électrolyte (corps ou un composé permettant le passage d'ions mais pas celui d'électron) pris en sandwich entre deux électrodes poreuses (figure IV-2). Ces électrodes poreuses permettent le passage des deux gaz (hydrogène et oxygène). Le courant produit est recueilli aux électrodes et alimente une charge (moteur électrique, éclairage, instruments, etc...).

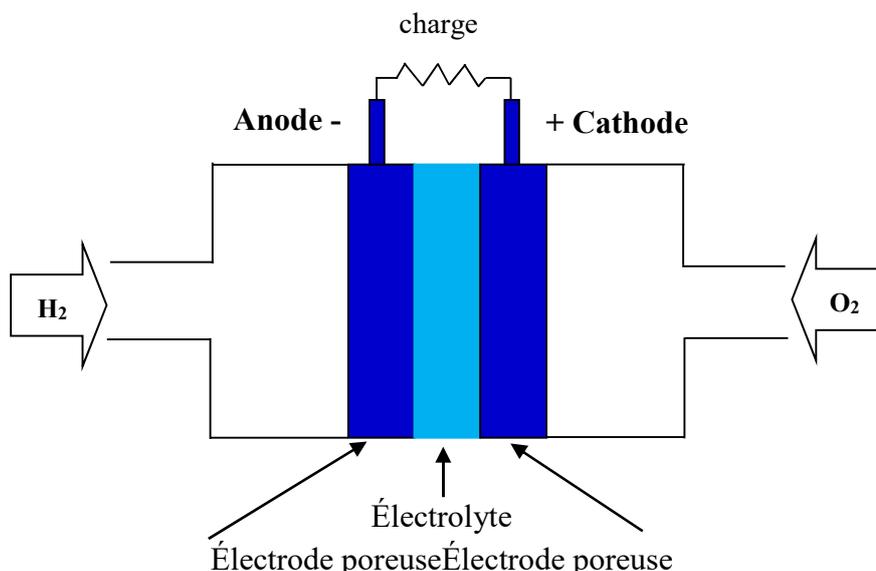


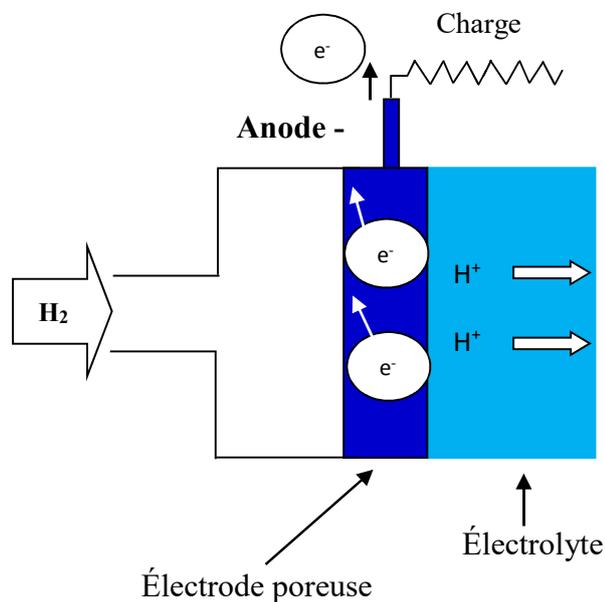
Figure IV-2 : Structure schématique d'une pile à combustible

Afin de mieux comprendre le mécanisme de fonctionnement, les deux demi-réactions sont d'abord traitées séparément.

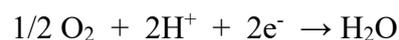
L'hydrogène traverse l'électrode poreuse et arrive en contact avec l'électrolyte (Figure IV-3). Au contact de l'anode, l'hydrogène se décompose selon la demi-réaction (HOR, *hydrogen oxidation reaction*) :



Il y a libération de deux électrons qui vont circuler dans l'électrode vers la charge extérieure. Les ions hydrogène H^+ (ou protons) vont migrer vers la cathode à travers l'électrolyte.

**Figure (IV-3) :** Décomposition de l'hydrogène à l'anode.

Les électrons passent encore par le circuit extérieur et arrivent à la cathode (figure IV-4). Ils réagissent au niveau de l'interface triple électrolyte/électrode/gaz avec l'oxygène et les ions H^+ qui ont traversé l'électrolyte selon la demi-réaction (ORR, *oxygen reduction reaction*) :



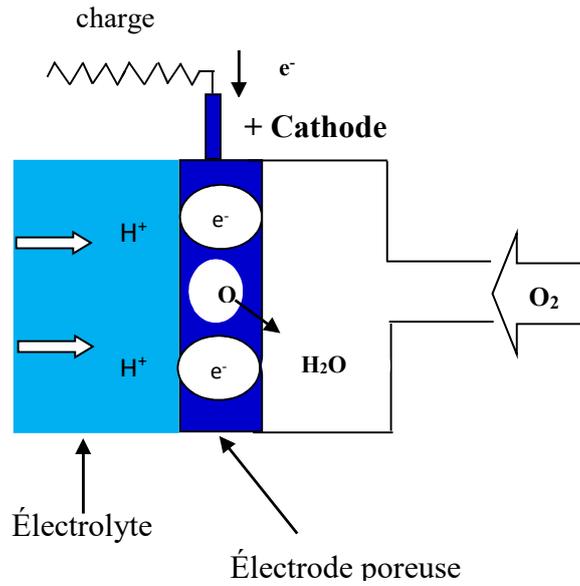
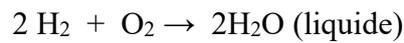


Figure (IV-4) : Décomposition de l’oxygène

Le bilan global de la réaction se produisant dans une pile à combustible est :



L’eau formée est liquide dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm) la figure IV.5 montre les différentes réactions ayant lieu dans une pile à combustible.

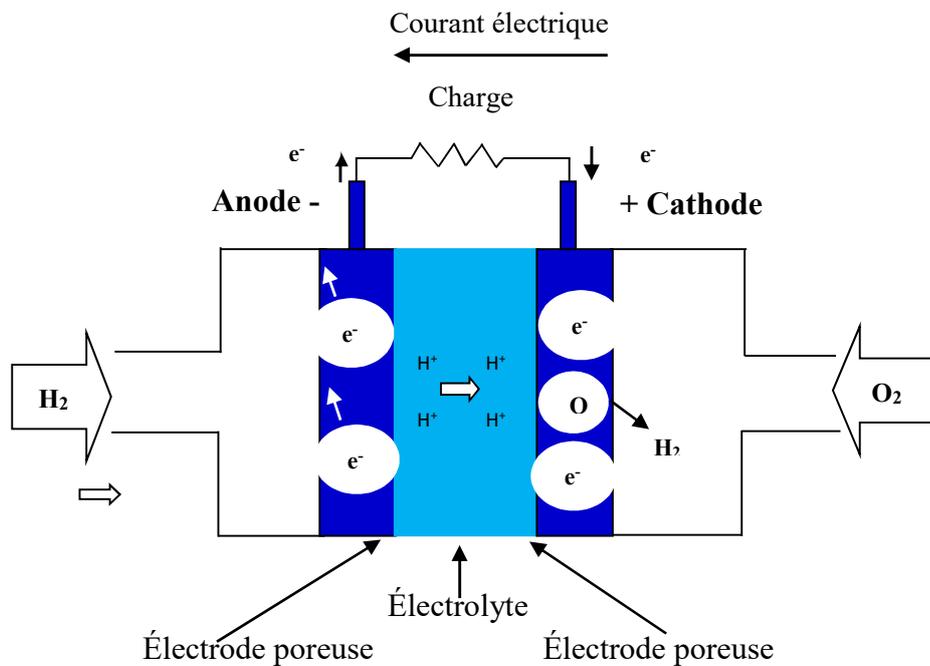


Figure (IV-5) : Schéma global de fonctionnement

3) types de piles à combustible :

La classification la plus commune est celle basée sur le type d'électrolyte. On utilise les acronymes anglais pour les différents types de pile à combustible.

On distingue six types de piles à combustible (parfois la pile au méthanol est considérée Comme une variante de la pile de type PEMFC) listés dans le tableau suivant :

Type	Electrolyte	
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell	Pile à combustible à membrane polymère ou à membrane échangeuse de protons.
DMFC DEFC	Direct methanol fuel cell Direct ethanol fuel cell	Pile à combustible au méthanol (direct) Pile à combustible à l'éthanol (direct)
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	Pile à combustible à acide phosphorique
AFC	Alkaline fuel cell	Pile à combustible alcaline
MCFC	Molten carbonate fuel cell	Pile à combustible à carbonate fondu
SOFC	Solid oxide fuel cell	Pile à combustible à oxyde solide

Références Bibliographiques

- [1] Guide de l'énergie dans l'industrie- centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie : ENERCOM (Energie et communication), CEREN 1984
- [2] Christian Ngô, L'énergie Ressources Technologies et environnement. Dunod 2008
- [3] Marek Walisiewicz, les énergies renouvelables, Focus Sciences, France
- [4] Gilbert Naudet et Paul Reuss Energie, Electricité et nucléaire, Génie atomique, EDP science 2008
- [5] Cour thermochimie, Université du Maine-Faculté des sciences.
- [6] Situation mondiale de l'énergie, Mémento de l'Hydrogène, Fiche 2.1, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible.
- [7] Pierre Merlin, Energie et environnement, La documentation française, paris 2008
- [8] Alain Bidart et Laurent Dubois, les énergies fossiles et renouvelables, Fondation polaire internationale. Mai 2003.
- [9] David WILGENBUS, Les énergies fossiles, Société française de physique.
- [10] Abderrezak bilal. Energies renouvelables. Université Djilali Bounaama, Khemiss miliana.
- [11] Ivan. Gillet ; relever le défi de l'énergie une imerieuse necessité.
- [12]Méziane Boudellal ; la pile à combustible : structure, fonctionnement, applications. DUNOD ; 2007
- [13]www.astrolabium.be/IMG/pdf/dossier_pe_da_e_nergies.pdf
- [14]<http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/phys/sc520.htm>
- [15]<http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/phys/sc530.htm>