

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed**  
**Boudiaf – USTOMB**



**Faculté de Génie Electrique**  
**Département d'Electrotechnique**

**Polycopié de Cours :**



**Dr BAHLOULI Fatna**

**Année universitaire 2020-2021**

# Table de matière

---

## **PRÉFACE**

### **Chapitre 1 NOTIONS SUR L'ÉNERGIE**

1.1	Introduction	2
1.2	Principe de la conservation de l'énergie	3
1.3	Situation énergétique mondiale	3
1.4	Energie et développement	4
1.5	Energie et démographie	5
1.6	Energie & l'avenir	7
1.7	Sources d'énergie primaire	7

### **Chapitre 2 LES ÉNERGIES FOSSILES**

2.1	Introduction	11
2.2	Le charbon	11
	a- Avantages	14
	b- Inconvénients	14
	c- Utilisation	15
2.3	Le gaz naturel	15
	a- Avantages	17
	b- Inconvénients	17
	c- Utilisation	17
2.4	Le pétrole	18
	a- Avantages	21
	b- Inconvénients	21
	c- Utilisation	21
2.5	Production des énergies non renouvelables	21

### **Chapitre 3 LES ÉNERGIES NUCLÉAIRES**

3.1	Introduction	24
3.2	Qu'est-ce que l'uranium	24
	3.2.1 La production d'uranium	24
3.3	La fission nucléaire	25
	a- Avantages	26
	b- Inconvénients	27
	c- Utilisation	27
3.4	La fusion thermonucléaire	28
	a- Avantages	29
	b- Inconvénients	29
	c- Utilisation	30
3.5	L'utilisation de l'uranium	30

3.6	Les réacteurs nucléaires	32
3.6.1	Les différents types de réacteurs	32
3.6.2	La protection du réacteur	32
3.7	Les accidents nucléaires	32
3.8	Ressources mondiales En Uranium	33
3.9	Qu'est-ce que l'effet de serre ?	34
3.10	Quelles sont les principales sources de gaz à effet de serre ?	34
3.11	Protocole de Kyoto	35
3.11.1	L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005)	36

## **Chapitre 4            LES ÉNERGIES RENOUVELABLES**

4.1	Introduction	38
4.1.1	L'énergie solaire : conversion photovoltaïque	38
4.1.1.1	Rendement du photovoltaïque	40
	a- Avantages	41
	b- Inconvénients	41
	c- Utilisation	41
4.1.1.2	L'énergie solaire thermique	42
	a- Avantages	42
	b- Inconvénients	43
	c- Utilisation	43
4.1.2	L'énergie éolienne	43
	a- Avantages	44
	b- Inconvénients	44
	c- Utilisation	44
4.1.3	L'énergie hydraulique	44
	a- Avantages	47
	b- Inconvénients	47
	c- Utilisation	47
4.1.4	La géothermie	48
	a- Avantages	50
	b- Inconvénients	50
	c- Utilisation	50
4.1.5	La biomasse	50
4.1.5.1	La biomasse par combustion	52
4.1.5.2	La biomasse par méthanisation	52
4.1.5.1.1	Le bois énergie	52
	a- Avantages	53
	b- Inconvénients	53
	c- Utilisation	53
4.1.5.1.2	Les agro-carburants	53
	a) Les huiles végétales brutes	53
	b) Les esters	54
	c) Les alcools	54

	a- Avantages	54
	b- Inconvénients	54
	4.1.5.1.3 Le biogaz	54
	a- Avantages	55
	b- Inconvénients	55
	c- Utilisation	55
4.1.6	L'énergie des marées	55
	a- Avantages	57
	b- Inconvénients	57
	c- Utilisation	58
4.2	Les énergies renouvelables en Algérie	58
	4.2.1 Enjeux Politico-Economiques et Environnementaux en Algérie	58
	4.2.2 Programme de l'Efficacité Energétique	59
	4.2.3 Parc de Production National : Sociétés de production Electrique (SPE) et Production des Tiers	59
	4.2.4 L'énergie solaire en Algérie	60
	4.2.4.1 Projets Solaires Photovoltaïques en Algérie	61
	4.2.4.2 Projets Solaires Thermiques en Algérie	63
	4.2.5 Energie hydraulique en Algérie	63
	4.2.6 Energie éolienne en Algérie	64
	4.2.6.1 Installations Fermes Eoliennes en Algérie	64
	4.2.7 Energie de la biomasse en Algérie	65
	4.2.8 Energie géothermique en Algérie	65

## **Chapitre 5 STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

5.1	Introduction	68
5.2	Les différentes technologies	68
5.3	Mode de stockage mécanique	69
	5.3.1 Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)	69
	5.3.2. Stockage par air comprimé classique (CAES, Compressed Air Energy Storage)	70
	5.3.2.1 CAES classique	70
	5.3.2.2 Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)	71
5.4	Stockage inertiel	71
5.5	Mode de stockage électrochimique et électrostatique	72
	5.5.1 Batteries à flux	73
	5.5.2 Batteries Zn-Br	73
	5.5.3 Batteries Vanadium-Redox Flow (VBR)	73
5.6	Mode de stockage thermique	74
5.7	Mode de stockage chimique : l'hydrogène	75

## **Chapitre 6 LES DIFFÉRENTS TYPES DE POLLUTION**

6.1	Introduction	80
6.2	Pollution de l'eau	80
6.2.1	Les ressources en eau	80
6.2.2	Les différentes pollutions	81
6.2.2.1	Les pollutions organiques	82
	Cas particuliers : Les hydrocarbures	82
6.2.2.2	Les pollutions chimiques	82
6.2.2.3	Les pollutions biologiques	83
6.2.3	L'utilisation de l'eau	83
6.3	Pollution de l'air	83
6.3.1	Généralités	83
6.3.2	Les différents niveaux de pollution	84
6.3.2.1	L'échelle planétaire ou continentale	84
	1) La couche d'ozone	84
	2) L'effet de serre	85
6.3.2.2	L'échelle régionale	85
6.3.2.3	L'échelle locale	86
6.4	Pollution des sols	86
6.4.1	Généralités	86
6.4.2	La phase liquide du sol	86
6.4.3	La phase gazeuse du sol	87
6.4.4	Le rôle du sol dans le cycle de l'eau	87
6.4.5	Le rôle du sol dans le cycle de la matière organique	87
6.4.6	Classification des types de pollution	87
6.4.7	Propagation de la pollution	87
6.4.8	Conséquences des pollutions des sols	88

## **RÉFÉRENCES**

# PREFACE

---

Énergie et environnement sont les deux partenaires d'un couple infernal. La perspective d'une pénurie de ressources et la menace d'un changement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serre, d'origine anthropique poussent à entamer une transition énergétique difficile à définir car ses objectifs diffèrent suivant les interlocuteurs.

L'énergie est un enjeu vital au niveau mondial. Inégalement répartie et inégalement consommée, avec des réserves naturelles qui ne sont pas inépuisables, on peut s'interroger sur l'avenir de la demande énergétique au niveau mondial. Comment a évolué la consommation mondiale depuis vingt ans ? Quelles sont les tendances à l'horizon 2030 ? Quels facteurs expliquent ces changements.

Aujourd'hui, plus que jamais, les besoins en énergie de l'humanité sont colossaux et en constante augmentation. Ainsi, la consommation d'énergie primaire a fait un bond de 49 % en vingt-cinq ans (1980-2005). Cette progression, un temps ralentie par les difficultés économiques des années 1990, reprend de plus belle depuis le début du siècle. L'énergie primaire consommée chaque jour dans le monde provient en grande partie de matières premières que l'on extrait du sous-sol (pétrole, gaz, charbon, uranium).

Dans le contexte actuel de développement des énergies renouvelables, le stockage de l'énergie améliore l'efficacité énergétique et favorise l'insertion des énergies renouvelables variables.

Enjeu majeur du XXI siècle, la pollution est un phénomène mondial qui ne cesse d'évoluer au fil des années. Problématique connue depuis un certain temps et pas forcément prise en compte, les conséquences liées à la pollution de ces 20 dernières années sont désormais de plus en plus visibles. Réchauffement climatique, fonte de la banquise dans le cercle polaire, émission des particules fines, maladies ou décès, autant d'effets néfastes qui se multiplient de jour en jour.

Dans ce contexte, ce présent manuscrit de la matière « **Energie et Environnement** » s'adresse aux étudiants de 2<sup>ème</sup> année Licences en électrotechnique. Il constitue une source de renseignements à ceux désirant et également destiné à tous ceux qui désirent apprendre, améliorer leur connaissance dans cette matière.

Tel qu'organisé, le manuscrit est bien structuré, bien rédigé et cohérent. Le texte est présenté de telle sorte à faciliter la lecture. L'ensemble de ce manuscrit se décompose en cinq chapitres qui recouvrent à la fois les notions de base sur l'énergie en général, les énergies fossiles et énergies renouvelables en particulier et celles existantes en Algérie. Nous aborderons dans ce manuscrit les modes de stockage de l'énergie électrique et les différents types de pollution.

Ce support de cours couvre l'étendue du programme en vigueur de la matière découverte en deuxième année génie électrique. Il est conforme au canevas officiel de notre tutelle, ce qui permet d'en faciliter la compréhension. Il s'agit d'un support utile et un outil de travail intéressant pour cette communauté d'étudiants.



### 1.1 Introduction

L'énergie est, de manière générale, la capacité de faire un travail, c'est-à-dire d'agir. Ce terme recouvre plusieurs réalités qui se recoupent partiellement :

– l'énergie au sens de la science physique est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur ;

– au sens de l'écologie et de l'économie, on appelle énergie une ressource énergétique naturelle (énergie éolienne, énergie nucléaire, énergie solaire, gaz naturel, pétrole) ou son produit (électricité), lorsqu'ils sont consommés par les sociétés humaines pour divers usages industriels et domestiques (transport, chauffage...).

Le soleil, le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, les matériaux nucléaires, les réserves d'eau, le vent ... sont des sources d'énergie primaires.

Quels que soient l'état ou la forme sous lesquels se présente l'énergie, elle est toujours susceptible de se transformer en travail. L'énergie et le travail peuvent donc s'exprimer par la même unité, soit le joule.

L'énergie se présente sous plusieurs formes, dont voici les plus familières:

L'eau d'une chute, en tombant, peut faire tourner une turbine et produire de

***L'énergie mécanique.***

- a) La chaleur qui, transmise à l'eau d'un récipient, fait soulever le couvercle de ce récipient n'est qu'une autre forme d'énergie, ***L'énergie thermique***.
- b) L'explosion de la dynamite qui ébranle des blocs de granit est une manifestation de ***L'énergie chimique***.
- c) L'électricité produite par les génératrices et qui fait briller des lampes à incandescence n'est qu'une autre forme d'énergie, ***L'énergie électrique***.
- d) La chaleur libérée dans un réacteur atomique provient de ***L'énergie atomique***.

Toutes ces formes d'énergie - mécanique, électrique, chimique, atomique et thermique - sont exprimées par la même unité SI, le joule (J).

L'énergie présente sous une forme quelconque peut être transformée en une autre forme à l'aide de machines. On voit comment (Fig. 1-1) l'énergie chimique du charbon et de l'air se transforme, par combustion, en chaleur (énergie thermique) en utilisant une chaudière. Cette chaleur fait tourner la turbine à vapeur et se transforme en énergie mécanique. Enfin, la turbine peut

entraîner une génératrice et produire de l'énergie électrique. Dans cet exemple, la chaudière, la turbine et la génératrice sont les machines qui effectuent la transformation d'énergie.

L'énergie électrique à son tour, peut servir à des fins multiples. Par exemple, elle peut faire tourner les moteurs d'une usine (énergie mécanique), chauffer les maisons (énergie thermique), décomposer certains minerais pour libérer l'aluminium pur (énergie chimique).

Chaque fois que l'énergie passe d'une forme à une autre, on constate que la quantité d'énergie totale après la transformation demeure la même. L'énergie se transforme tout simplement; elle ne peut être ni créée, ni détruite.

Cependant, quand on passe d'une forme d'énergie à une autre, au moyen d'une machine quelconque, toute l'énergie recueillie n'est pas toujours utilisable pratiquement. Par exemple, l'énergie thermique produite dans un moteur d'automobile servira en grande partie à chauffer inutilement les fumées d'échappement évacuées dans l'atmosphère. De plus, une partie de l'énergie mécanique développée par le moteur est dépensée pour vaincre la résistance de l'air et les frottements des engrenages, paliers, etc. A cause de ces pertes, l'énergie utile est inférieure à l'énergie fournie.

- S'il est un sujet de préoccupation actuel, mêlant enjeux politiques, économiques, technologiques et environnementaux, c'est bien celui de l'Energie «1/1000 de l'énergie solaire = 3 fois la consommation mondiale en énergie». «Le 1/10ème de notre Sahara permet d'alimenter l'Europe entière en énergie solaire».
- L'énergie est, après l'eau et la nourriture, une ressource indispensable pour l'humanité. Elle a contribué d'une façon décisive au développement économique et technique, d'un pays, au cours des âges. Celui-ci c'est notablement accéléré au cours du vingtième siècle grâce, notamment, à des sources d'énergie, concentrées, abondantes et peu coûteuses. L'apparition de l'électricité, vecteur énergétique très commode, a révolutionné l'usage de l'énergie dont les énergies renouvelables et aborde actuellement le sujet de l'hydrogène, vecteur énergétique du future.
- Par définition c'est la capacité de travailler qu'est capable de libérer un corps. On la mesure par le travail mécanique que ce corps, ou ce système,

est susceptible d'effectuer. D'une manière pragmatique, un système ou un corps possède de l'énergie s'il peut fournir du travail ou de la chaleur. Selon cette définition l'essence ou le gaz possède de l'énergie puisque nous pouvons l'utiliser pour propulser un véhicule et en brûlant, peut fournir de la chaleur.

- L'énergie est présente partout; les sources actuelles d'énergie sont la houille, le charbon, le pétrole, le gaz, le nucléaire, le soleil, l'eau, le vent, la biomasse traditionnelle et nouvelle, géothermie, l'hydrogène...

### **1.2 Principe de la conservation de l'énergie**

Chaque fois que l'énergie passe d'une forme à une autre, on constate que la quantité d'énergie totale après la transformation demeure la même. L'énergie se transforme tout simplement; elle ne peut être ni créée, ni détruite.

Cependant, quand on passe d'une forme d'énergie à une autre, au moyen d'une machine quelconque, toute l'énergie recueillie n'est pas toujours utilisable pratiquement. Par exemple, l'énergie thermique produite dans un moteur d'automobile servira en grande partie à chauffer inutilement les fumées d'échappement évacuées dans l'atmosphère. De plus, une partie de l'énergie mécanique développée par le moteur est dépensée pour vaincre la résistance de l'air et les frottements des engrenages, paliers, etc. A cause de ces pertes, l'énergie utile est inférieure à l'énergie fournie.

### **1.3 Situation énergétique mondiale**

- 81% des réserves mondiales en hydrocarbures brutes sont en possession de huit pays;
  - Six pays ont 70 % des réserves du gaz naturel;
  - Huit pays ont 89% de toutes les réserves du charbon;
  - La demande mondiale en énergie augmente exponentiellement, en 2020 la demande sera 50-80% de plus que les niveaux de 1990 (WEC);
    - La demande mondiale en énergie primaire, en 2050, augmentera de 1.5-3 fois plus que les niveaux de 1998 (WEC);
    - La dépendance en énergie à partir des combustibles fossiles atteint ses limites: la déplétion des réserves en pétrole, gaz naturel et charbon est pour quelques dizaines d'années seulement !

### 1.4 Energie et développement

• L'énergie est un élément majeur dans le développement de l'humanité. Rappelons-en brièvement les étapes de ce développement ;

• Première consommation énergétique est la nourriture. Elle lui permet de vivre et d'assurer ainsi sa descendance ;

• Il y a 500 000 ans environs, l'homme a découvert le feu. Celui-ci lui a fourni de la lumière pour voir la nuit, la chaleur pour lutter contre le froid et faire cuire les aliments.

• Il y a 7000 ans environs, l'homme a inventé le charbon de bois, ce qu'il lui permet de développer de nouvelles techniques: poterie, métallurgie du plomb et du cuivre, fabrication du plâtre et de la chaux...

• Il y a environs 3000 ans, l'homme a découvert la métallurgie du fer;

• Les premiers transports se sont fait à dos d'homme et d'animal, puis la voile, utilisant l'énergie du vent dans le transport maritime. Le charbon a permis d'utiliser les locomotives à vapeur et l'essence les voitures; La consommation énergétique a rapidement augmenté depuis l'ère industrielle, particulièrement au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Le développement énergétique que nous vivons actuellement est singulièrement accéléré comparé à celui qu'ont vécu nos ancêtres lors des dernières millénaires. L'histoire de l'énergie est passée par une succession de découvertes qui ont progressivement permis d'améliorer la condition humaine jusqu'à celle que nous connaissons aujourd'hui;

• 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 supérieure à deux de l'espérance de vie en 200 ans;

• Deux facteurs concourent à une demande énergétique plus forte dans l'avenir: ce sont l'accroissement de la population mondiale et le fait que les pays en voie de développement souhaitent accroître leur niveau de vie.

Année	Production*		Consommation*	
	1980	2004	1980	2004
Algérie	2,8	12,08	0,8	9,31
Région arabe	46,82	79,57	6,27	39,59

\* Quadrillion ( $10^{15}$ ) British thermal unit (1055, 54 J)

Tableau 1.1 Energie, l'Algérie & région arabe.

### 1.5 Energie et démographie

- On estime qu'il y avait 250 millions d'habitants sur terre en l'an un. Le premier milliard d'habitants a été atteint en 1820;
- La population double et atteinne, en 1925, les 2 milliards d'habitants; 3 milliards d'habitants en 1961 et 4 milliards en 1976;
- Les 6 milliards d'habitants ont été atteints en l'an 2000. Un taux moyen de croissance d'environ 2%.
- L'industrialisation a généré une amélioration des conditions de vie, ce qui a entraîné une augmentation de la consommation d'énergie;
- Depuis 1970 la consommation annuelle d'énergie primaire a pratiquement doublé pour passer de 5000 Mtep à 10500 Mtep (tonne équivalent pétrole) , et qu'il est prévu qu'elle atteinne 15000 Mtep en 2030 et jusqu'à 45000 Mtep, suivant les scénarios, en 2100.
- En 2000, la consommation mondiale d'énergie a été de 8,8 Gtep et 15000 TWh en électricité.

$$1 \text{ tep} = 10^{10} \text{ calories} \cong 42 \text{ GJ}, 1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}, 1 \text{ tep} = 11700 \text{ kWh}.$$

Population	Année		Accroissement	Pourcentage
	1990	2020		
Amérique du nord	276	326	50	1.8%
Amérique latine	448	716	268	9.6%
Europe OCDE	454	489	35	1.3%
Europe centrale	100	111	11	0.4%
Afrique du nord et moyen orient	271	543	272	9.7%
Afrique subsaharienne	502	1195	693	24.8%
Japon, Australie, Nouvelle Zélande	150	163	13	0.5%
Asie du sud	1146	1938	792	28.3%
Asie du Sud Est	1657	2265	608	21.7%
<b>Total</b>	<b>5293</b>	<b>8090</b>	<b>2797</b>	<b>100%</b>

Tableau 1.2 Croissance de la population mondiale

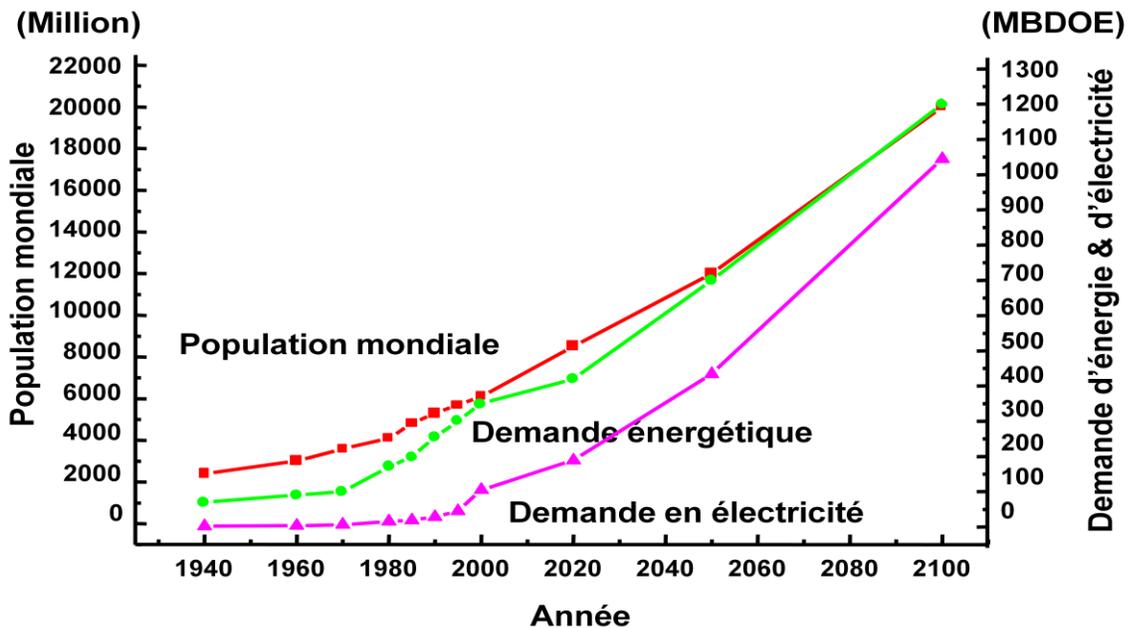


Figure 1.1 Energie et démographie

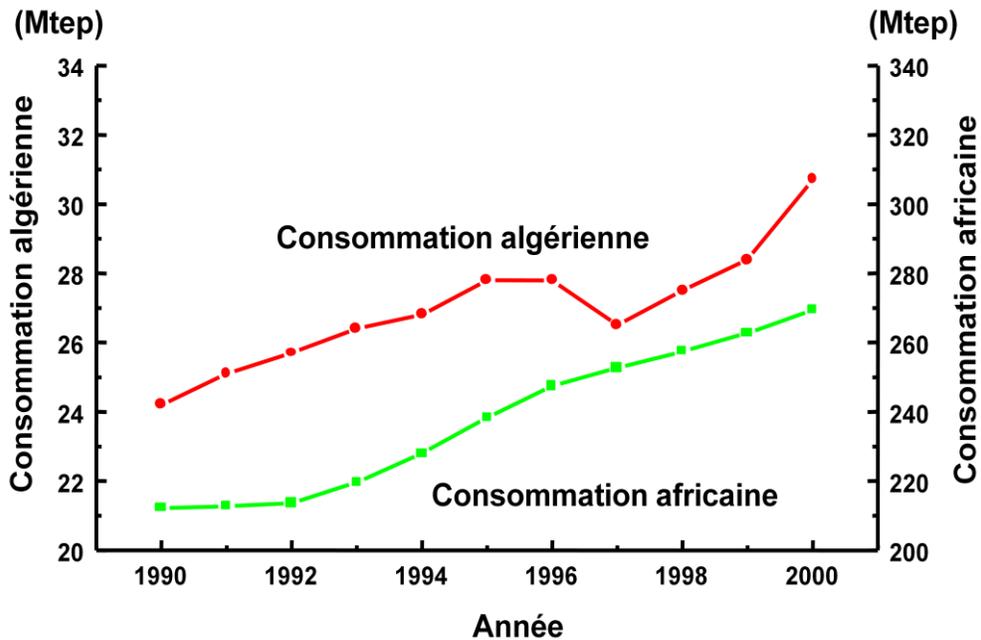


Figure 1.2 Energie, l'Algérie & l'Afrique.

### 1.6 Energie & l'avenir

- 250,000 enfants naissent chaque jour sur terre. Les démographes prévoient, s'il n'y a pas de catastrophe, que la population de la terre sera de 8 milliards vers 2020-2025 et de 12-20 milliards en 2100;
- Cette augmentation de la population va accroître la demande énergétique;
- En prenant une croissance énergétique de 2% par an, cela revient à doubler la consommation énergétique de la planète à l'horizon 2030.

### 1.7 Sources d'énergie primaire

Pour subvenir à nos besoins, nous avons recours à plusieurs sources d'énergie primaire. La plus grande provient de l'énergie chimique contenue dans le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Lorsque ces matériaux brûlent, ils libèrent de grandes quantités d'énergie thermique

que l'on peut transformer en d'autres formes suivant les besoins.

- L'eau derrière les barrages est une importante source d'énergie primaire mécanique mais, au niveau mondial, elle représente moins de 1 % des sources d'énergie chimique. Le vent est une source d'énergie mécanique qui n'est presque pas exploitée à l'heure actuelle.

- Comme source d'énergie primaire électrique, on pourrait penser aux éclairs. Cependant, même si l'on pouvait domestiquer cette source d'énergie, ce qui est peu probable, l'énergie disponible ne pourrait jamais subvenir à nos besoins.

- L'énergie atomique pourra sans doute pourvoir à tous nos besoins dans l'avenir; il reste à résoudre, en particulier, le problème de l'élimination des déchets radioactifs.

- L'origine de toute notre énergie (sauf l'énergie atomique) est le soleil; c'est grâce à lui que nous disposons aujourd'hui des combustibles fossiles qui sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Le soleil est une source d'énergie thermique sans pareil; chaque jour il inonde la terre d'une énergie des milliers de fois supérieure à celle que nous utilisons pour alimenter nos avions, nos trains, nos voitures, nos industries et nos maisons. Si l'on pouvait un jour domestiquer cette source d'énergie de façon économique, le soleil pourrait subvenir à nos besoins pour des millénaires.

Le tableau 1.3 nous donne une idée de l'énergie thermique libérée par les produits chimiques tandis que le tableau 1.4 établit une comparaison avec les autres sources d'énergie.

<b>Combustible</b>	<b>Energie libérée kJ/kg</b>
nitroglycérine	7000
TNT	15000
bois de pin sec	18000
charbon	31400
mazout	44000
gaz naturel	49000
propane, kérosène	50000
huile légère, essence	50000
hydrogène	140000

Tableau 1.3 Énergie de combustibles.

<b>Source d'énergie</b>	<b>Energie débitée (GJ)</b>	<b>Durée du débit</b>
100 tonnes de charbon	3100	
bombe atomique de 1 kilotonne	4200	100 $\mu$ s
génératrice électrique de 1500 mégawatts une des plus grosses	5400	1 heure
éclair de forte intensité	10	150 $\mu$ s
soleil irradiant une superficie de 1 km <sup>2</sup>	2200	1 heure
1 gramme de matière converti entièrement en énergie, d'après $E = mc^2$	90 000	
énergie électrique moyenne consommée par une ville moderne de 1 000 000 habitants	4000	1 heure

Tableau 1.4 Énergie associée à quelques sources.



## 2.1 Introduction

Quelles sont les différentes sources d'énergies fossiles ?

- Les sources d'énergies fossiles sont celles qui sont issues de la *fossilisation* de matière organique dans le sous-sol terrestre. Le mot "fossile" est plus souvent rattaché à des animaux ou des plantes qui ont laissé leur empreinte dans la roche ou sont eux-mêmes devenus pierre. La fossilisation est un processus lent qui a progressivement minéralisé ces squelettes, ces coquillages ou ces fougères qui vivaient au temps des dinosaures (et même avant). Mais ces processus géologiques lents se sont aussi appliqués aux fonds marins où des forêts entières avaient été englouties. Ils ont mené à la formation de ce que nous connaissons aujourd'hui sous les noms de **charbon**, **gaz naturel** et **pétrole**.
- Ces substances sont du concentré d'énergie chimique, c'est pourquoi ils sont tant exploités à notre époque. Chimiquement, il s'agit de substances de la famille des hydrocarbures, c'est-à-dire composés à la fois d'hydrogène et de carbone. Pour extraire leur énergie il suffit de les brûler : l'énergie chimique se transforme alors en chaleur, tandis que l'hydrocarbure se transforme en eau et en gaz carbonique (le fameux CO<sub>2</sub>, appelé aussi dioxyde de carbone).

## 2.2 Le Charbon

Le charbon est l'énergie fossile la plus disponible et la mieux répartie sur terre. Il est constitué d'une accumulation de débris de végétaux. Les premiers morceaux de charbons se sont créés sous la forêt hercynienne (en Allemagne) il y a environ 300 millions d'années.

Hélas le charbon produit de fortes émissions de CO<sub>2</sub> et existe seulement en quantité limitée.



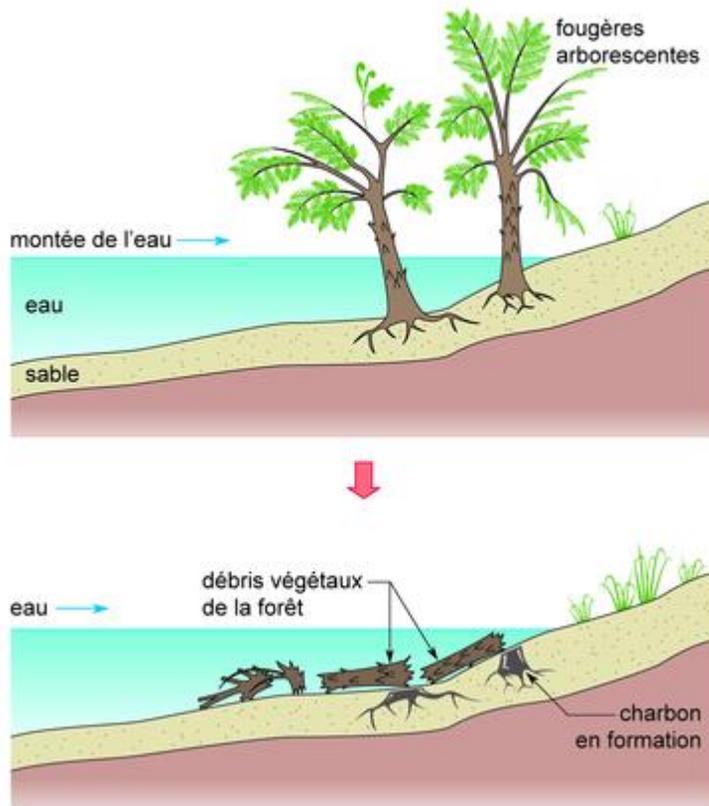


Figure 2.1 Formation du charbon

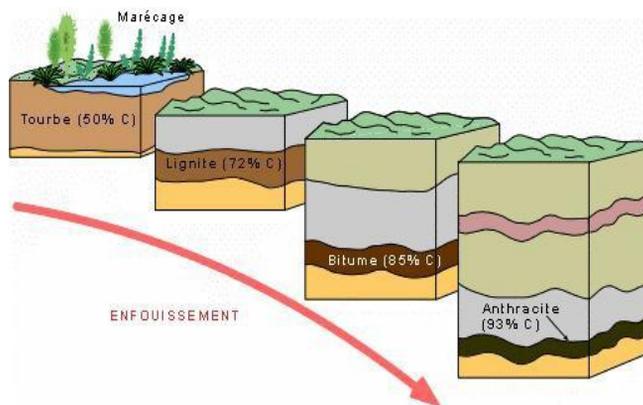


Figure 1.2 Les types de charbon.

Forme	Pouvoir calorifique (en kJ/kg)	Teneur en carbone (en %)
La tourbe	12 500	moins de 50
Le lignite	25 000	entre 50 et 60
La houille	32 000 à 36 000	entre 70 et 93
L'anhracite	33 500 à 34 900	entre 93 et 97

Tableau 2.1 Forme, pouvoir calorifique et teneur en carbone du charbon.

Seules houille et anthracite sont exploitées industriellement à grande échelle dans des mines souterraines ou à ciel ouvert. En général, le charbon natif subit, lui aussi, un traitement thermo-chimique la **cokéfaction** qui le transforme en **gaz de houille** (divers gaz tels que l'hydrogène, le méthane, l'azote, etc.) et en **coke** (résidu solide).

Historiquement, le charbon est à l'origine de la Révolution Industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle. Il servait alors à la sidérurgie, au chauffage, au transport (locomotives à vapeur) et à l'éclairage public (gaz de ville). Aujourd'hui il est encore largement utilisé, notamment pour la sidérurgie et pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques.

Pays	Consommation
Chine	2062
Inde	478
États Unis	1107
Allemagne	280
Russie	258
Japon	204
Afrique du sud	195
Pologne	153
Australie	150
Corée du sud	91

Grèce	80
Royaume-Uni	67
Turquie	70
Ukraine	78
Kazakhstan	73
Taiwan	63
République Tchèque	63

Tableau 2.2 Consommation en millions de tonnes du charbon.

<b>Pays producteurs de charbon</b>	<b>Production annuelle (millions de tep)</b>
Chine	1685,7
Etats-Unis	364,8
Australie	288,5
Inde	299,3
Indonésie	255,7

\*tep : Tonne d'équivalent pétrole

Tableau 2.3 Les principaux pays producteurs de charbon dans le monde (2016).

**a- Avantages**

- Seule forme d'énergie fossile sous forme solide.
- Disponible dans de nombreux pays.
- Les gisements connus sont très importants.
- Permet de produire du gaz de houille et un grand nombre de produits chimiques carbonés ou hydrogénés.

**b- Inconvénients**

- Energie non-renouvelable volumineuse et coûteuse à extraire et à transporter.
- Les impuretés du charbon sont une importante source de pollution lors de sa combustion (souffre notamment). Des systèmes de filtrage des gaz produits sont nécessaires.
- Comme pour tout carburant fossile, sa combustion libère du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, phénomène à l'origine de **l'accroissement de l'effet de serre atmosphérique**.

### c- Utilisation

Le charbon est aujourd'hui utilisé pour la production d'énergie thermique par combustion, soit pour un usage thermique direct (sidérurgie), soit pour la production d'électricité dans une **centrale thermique**.

### 2.3 Le gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures trouvés naturellement sous forme gazeuse. C'est la deuxième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole et son usage se développe rapidement.

Plusieurs formes de gaz existent : le gaz associé, biogénique, de charbon, de schiste et les hydrates.

Composé en grande majorité de méthane ( $\text{CH}_4$ ), le gaz naturel libère son énergie chimique par combustion en émettant relativement peu de substances polluantes. Ses gisements sont souvent liés à ceux du pétrole et l'exploitation de champs pétrolifères amène généralement à une production simultanée de pétrole et de gaz naturel. Cependant, ce gaz a longtemps été *torché*, c'est-à-dire brûlé sur place. Pourquoi ? Simplement, parce que capter et transporter ce gaz vers des zones de consommation était techniquement et surtout économiquement peu intéressant par rapport au pétrole.

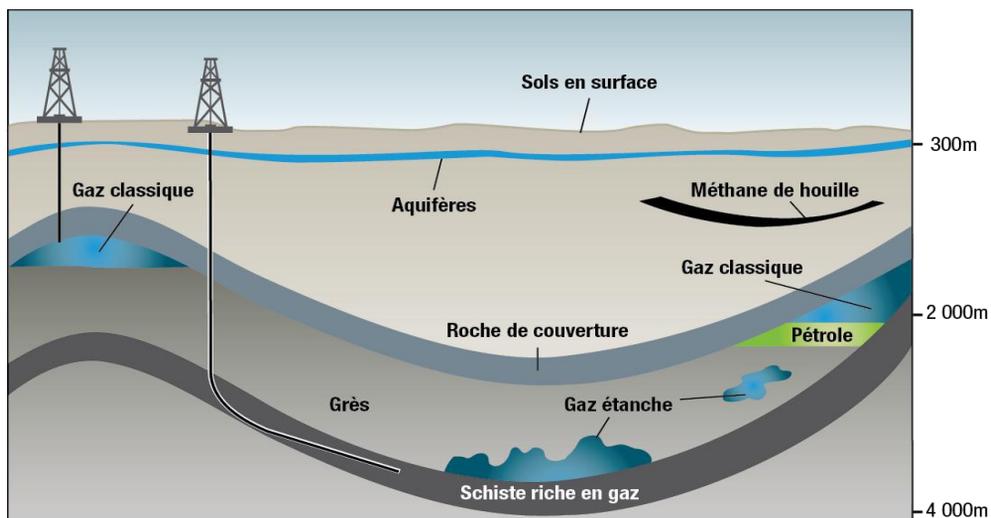


Figure 2.3 Formation du gaz naturel.



Figure 2.4 Les réserves mondiales de gaz naturel en 2020.

<b>Pays</b>	<b>Production en Gm<sup>3</sup></b>
Russie	598
États-unis	525
Canada	185
Algérie	88
Royaume-Uni	88
Iran	87
Norvège	85
Indonésie	76
Arabie Saoudite	70
Pays-Bas	62
Malaisie	60
Turkménistan	59
Ouzbékistan	56
Chine	50
Émirats	47
Argentine	46
<b>Production Mondiale</b>	<b>4641</b>

Tableau 2.4 Production de gaz dans le monde.

### a- Avantages

- Energie disponible sur tous les continents.
- L'extraction nécessite peu d'énergie en raison de la forme gazeuse du gaz naturel.
- Le gaz naturel nécessite peu de filtrage : il est quasiment utilisable sous sa forme native. Seul le soufre, présent parfois, est réellement indésirable car polluant.
- Combustible fossile le moins polluant et le moins émetteur de dioxyde de carbone.
- Le transport de gaz est facilement réalisé par des canalisations appelées *gazoducs*. Les *méthaniers* (bateaux transportant le gaz naturel sous forme liquide) servent aux transports intercontinentaux.
- En cas de rupture de canalisation, le gaz naturel se détend puis, plus léger que l'air, se disperse dans l'atmosphère. Ainsi les risques d'explosion liés à une forte concentration de gaz (poche de gaz) sont le plus souvent évités.

### b- Inconvénients

- Le gaz naturel peut devenir explosif lorsque certaines conditions de concentration et de température sont remplies. Cependant, il n'y a généralement pas de risque.
- Le gaz naturel est incolore et inodore. Il est donc indétectable par les sens humains. C'est la raison pour laquelle il faut impérativement l'odoriser. Le *mercaptan* ou le *tetrahydrothiophène* (THT) sont les substances généralement employées à cet effet.
- Le gaz est, par nature, un état peu dense de la matière. C'est pourquoi pour une même quantité énergétique, le gaz est beaucoup plus volumineux que le pétrole ou le charbon. Il doit donc être maintenu comprimé durant tout son transport. Cette compression nécessite bien entendu des compresseurs qui consomment de l'énergie...

### c- Utilisation

- Chauffage domestique et industriel, cuisson.
- Production d'électricité dans des centrales thermiques à gaz.

### 2.4 Lepétrole

Le pétrole, désigne un liquide bitumeux composé principalement de molécules d'hydrocarbures.

Le pétrole est un liquide visqueux qui tire son nom du latin *petra - oleum* : l'huile de roche. Sa couleur lui vaut le surnom d'or noir. Connu depuis la nuit des temps, il a d'abord été utilisé pour le *calfatage*



(révision) des embarcations puis comme lubrifiant (graisse) et comme carburant d'éclairage (lampes à pétrole, torches). Ce n'est qu'à partir des années 1860 environ que l'on commence à rechercher le pétrole, en Allemagne et surtout aux États-Unis d'Amérique. Le développement de l'exploitation des différents gisements pétroliers et de la pétrochimie ont progressivement permis l'avènement de l'ère de l'automobile et de l'aviation, bref du moteur thermique, mais aussi l'ère des matières plastiques.

Le seul problème de cette énergie est qu'elle est très polluante et qu'elle n'existe que en réserve très limitée.

On trouve le pétrole en grandes quantités sous la surface de la terre ; il est utilisé comme carburant et comme matière première dans l'industrie chimique. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés dans la production de médicaments et d'engrais, de produits alimentaires, de plastiques, de matériaux de construction, de peintures et de vêtements, ainsi que dans la production électrique.

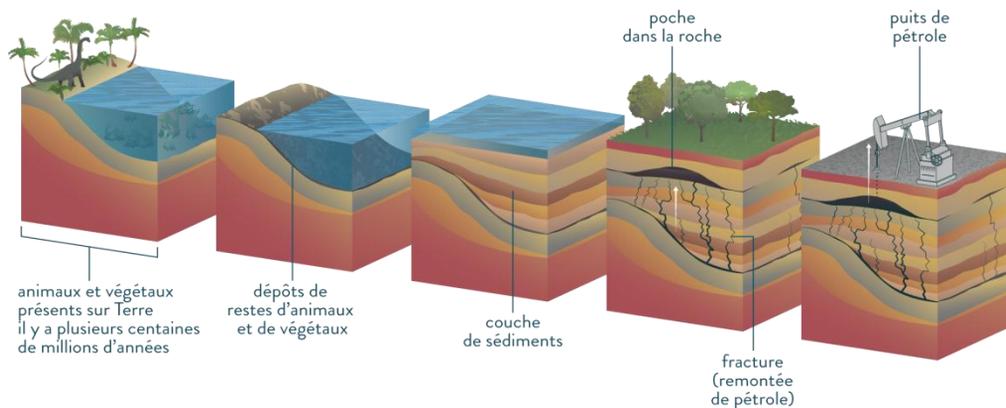
Pays producteurs de pétrole	Production annuelle (millions de tonnes)
États-Unis	669,4
Arabie Saoudite	578,3
Russie	563,3
Canada	255,5
Iran	235,9

Tableau 2.5 Les principaux pays producteurs de pétrole dans le monde (2018).

Les États-Unis sont les premiers producteurs et les premiers consommateurs de pétrole au monde mais leurs réserves ne sont pas aussi importantes que d'autres pays comme l'Arabie Saoudite. En effet, l'Arabie Saoudite est membre de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) et l'exploitation et

l'exportation du pétrole ont participé au développement de l'activité économique de la côte nord-est du pays. Néanmoins, les différents chocs pétroliers, variations du marché du pétrole et le développement des énergies renouvelables à l'échelle mondiale ont fait baisser la part des exportations de pétrole brut dans le PIB du pays. À ce rythme, le Fonds Monétaire International (FMI) a estimé une faillite de l'Arabie Saoudite dès 2020.

L'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole compte également l'Iran (5ème pays producteur de pétrole) et le Venezuela, sixième place au palmarès des producteurs de l'OPEP pendant la décennie 2010. Sa production de pétrole était de 2,3 millions de barils par jour au cours de l'année 2016 et ses réserves prouvées de pétrole atteignaient 296,50 milliards de barils en 2011, raflant la première place mondiale à l'Arabie Saoudite.



.Figure 2.5 Formation du pétrole.

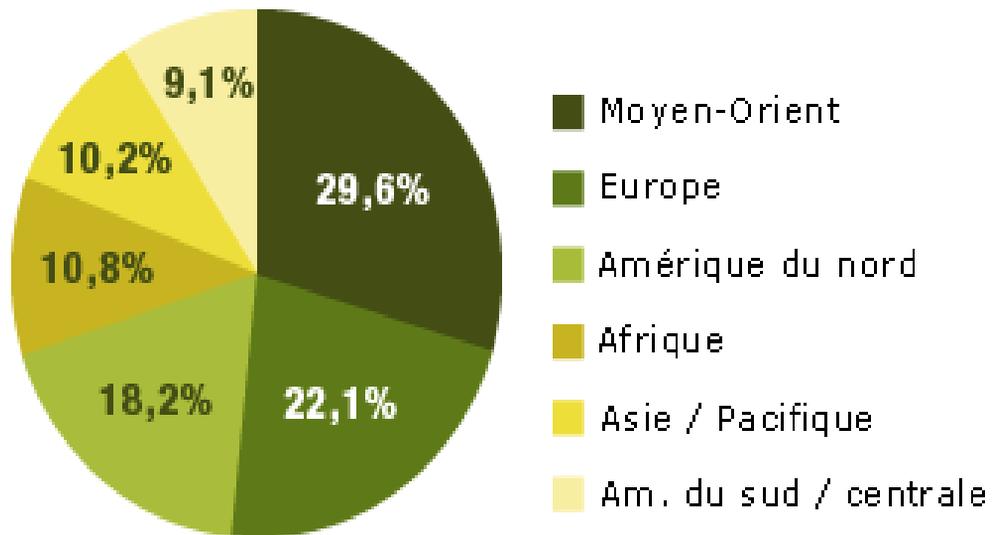


Figure 2.6 Part des régions du monde dans la production mondiale de pétrole.

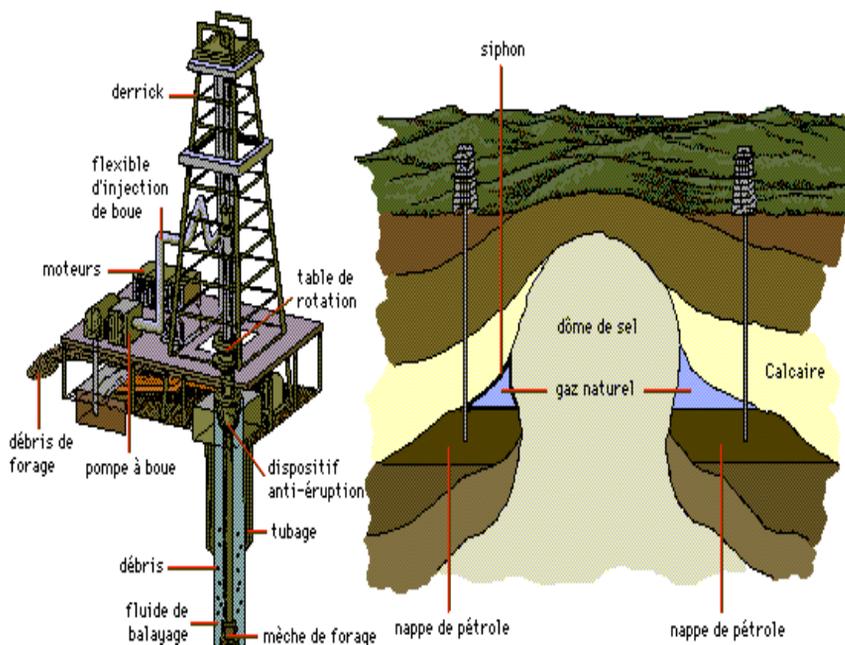


Figure 2.7 Extraction pétrolière.

**a- Avantages**

- Énergie disponible un peu sur tous les continents.
- Transport facile et peu onéreux par bateau (pétroliers) et surtout par oléoducs (grosses canalisations)
- La chimie du pétrole est d'une richesse extrême. À partir du pétrole, on tire des gaz (méthane, propane, butane, etc.), des carburants (essence, kérosène, gazole, fioul), des composés aromatiques, des lubrifiants, du goudron, etc.
- C'est la forme d'énergie liquide la plus concentrée disponible actuellement.

**b- Inconvénients**

- La recherche d'un nouveau gisement pétrolier est une activité de plus en plus difficile, nécessitant des moyens techniques et financiers toujours plus importants.
- Le transport du pétrole est à l'origine de nombreuses pollutions, en particulier des "**marées noires**" mais aussi d'incendies.
- Comme pour le charbon, sa combustion produit du dioxyde de carbone qui, libéré dans l'atmosphère, participe à l'**accroissement de l'effet de serre**.

**c- Utilisation**

- Cette forme d'énergie est la plus facile à transporter, c'est pour cela qu'elle est essentiellement utilisée sous forme de carburant liquide (ou gazeux) par tous les véhicules automobiles.
- Utilisable pour le chauffage sous la forme de fioul
- Utilisable aussi pour la production d'électricité de masse dans des centrales thermiques.

**2.5 Production des énergies non renouvelables**

<b>Energie</b>	<b>Production en 2018 (Mtep)</b>	<b>Part en 2018 (%)</b>
Pétrole	4474	32,1
Charbon	3917	28,1
Gaz naturel	3326	23,9
Nucléaire	611	4,4

Tableau 2.6 Production des énergies non renouvelables en 2018.

<b>Energie</b>	<b>Réserves mondiales en 2018 (%)</b>	<b>Production annuelle (Gtep)*</b>	<b>Nombres d'années d'exploitation restantes avec ce rythme</b>
Pétrole	21	4,5	50
Charbon	53	3,9	132
Gaz naturel	16	3,3	51

\*Gtep : Milliards de tonnes équivalent pétrole.

Tableau 2.7 Production, réserves mondiales et nombres d'années des énergies fossiles en 2018.



### 3.1 Introduction

- Les sources d'énergies nucléaires, contrairement aux sources d'énergies fossiles, ne sont pas connues depuis la nuit des temps. Bien au contraire, ce n'est que très récemment par rapport à l'âge de l'humanité que les physiciens ont découvert leur existence.
- Tout à commencé à la fin du XIXème siècle, en 1896 précisément, lorsque Henri Becquerel (1852-1908) découvrit que qu'un minerai, appelé pechblende, émettait spontanément un rayonnement invisible pouvant traverser la matière et impressionner une plaque photographique placée derrière une plaque métallique. Il venait de découvrir ce qui allait être appelé rapidement la **radioactivité**.
- À la suite de cette découverte, Pierre et Marie Curie ont découvert plusieurs autres substances radioactives telles que la polonium ou le radium.
- 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 instables 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 de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium.

### 3.2 Qu'est-ce que l'uranium

L'uranium est une source d'énergie construite d'atomes. L'atome est constitué d'une région centrale, le noyau atomique, autour de laquelle se déplacent les électrons soumis à l'action des forces électromagnétiques. Le noyau a une dimension 10 000 fois plus faible que celle de l'atome.

#### 3.2.1 La production d'uranium

Après son extraction du sol, le minerai d'uranium est transformé pastille d'oxyde d'uranium. Ce combustible provoque des réactions nucléaires mais il ne brûle pas. Chaque pastille ne pèse que sept grammes et vaut pourtant une

tonne de charbon. Dans chaque réacteur d'une centrale, il y a plus de treize millions de ces pastilles, qui permettent le fonctionnement du réacteur pendant trois ans.



Figure 3.1 Les 12 pays ayant le plus de centrales nucléaires en projet.

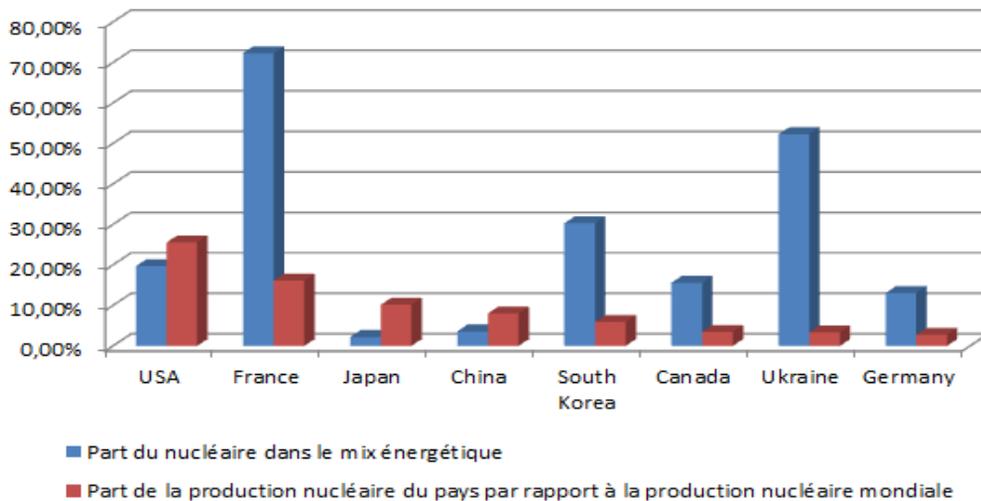


Figure 3.2 Production nucléaire mondiale.

### 3.3 La fission nucléaire

La fission apparaît lorsque le noyau d'un atome lourd (noyau qui contient beaucoup de nucléons et qui est dit fissible) est fractionné en plusieurs éléments beaucoup moins lourd, la plupart du temps deux particules.

Cette réaction dite nucléaire est traduite par le dégagement de neutrons (donc le

nombre varie) et un dégagement d'énergie d'une forte intensité, de l'ordre du MeV (à comparer aux réactions chimiques qui sont de l'ordre du eV).

Il existe 2 types de fission, la fission spontanée et la fission induite.

- On parle de fission nucléaire naturelle lorsque le noyau se désintègre en plusieurs autres morceaux sans qu'il est préalablement absorbé une particule (comme un neutron). Cette fission n'est possible que pour des noyaux extrêmement lourds, car l'énergie de liaison par nucléon est alors plus petite que pour les noyaux moyennement lourds nouvellement formés.
- La fission synthétique a lieu lorsqu'un noyau lourd intègre une particule (généralement un neutron) le noyau alors composé en plus de la particule se désintègre en plusieurs fragments. Sous l'effet de la collision avec un neutron, le noyau de certains gros atomes (dits fissiles) a la propriété de se casser en deux. Cette rupture s'accompagne en général de l'émission d'un ou de plusieurs neutrons rapides (2 ou 3). Ceux-ci réagissent avec les noyaux qu'ils rencontrent et sont soit diffusés, c'est-à-dire renvoyés dans une direction différente, soit absorbés. Il s'agit de la « réaction en chaîne » qui est maîtrisée grâce à la mise en place de barres de contrôles absorbants ainsi les neutrons supplémentaires. Ce système permet de maintenir un taux de fission constant.
- Au niveau du combustible, les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel (plutonium : de temps en temps le noyau ne se brise pas au contact d'un neutron et le neutron s'ajoute au noyau, il y a formation de plutonium).
- Le combustible le plus utilisé dans les centrales nucléaires de type fission est donc l'uranium 235 qui est transformé en oxyde d'uranium et qui est réduit sous la forme de pastille d'environ un centimètre de hauteur sur un centimètre de diamètre. Ces pastilles sont insérées dans le cœur du réacteur et permet la réaction nucléaire. Le chargement d'un réacteur nucléaire de 900 mégawatts (millions de watts) nécessite en tout 11 millions de pastilles.

### **a- Avantages**

- C'est la forme d'énergie exploitable la plus concentrée. À partir de peu d'uranium, on peut extraire beaucoup d'énergie.
- La fission nucléaire n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre.

### **b- Inconvénients**

- Les gisements d'uranium sont peu nombreux et donc très recherchés.
- Une partie des déchets produits (plutonium) sont nécessaires à la production des bombes atomiques. C'est ce que l'on appelle la prolifération nucléaire. C'est pourquoi combustible et déchets doivent être étroitement surveillés.
- Les installations nucléaires présentent des risques d'emballement qui peuvent amener des conséquences extrêmement graves en cas d'explosion (dispersion de matière radioactive dans l'environnement, pollution irréversible des sols qui deviennent impropres à l'agriculture et à la vie humaine). Elles nécessitent une surveillance extrême. L'accident de la centrale de Tchernobyl de 1986 est dans toutes les mémoires. Certaines catastrophes naturelles peuvent entraîner la destruction partielle ou totale d'un réacteur nucléaire, comme ce fut le cas à Fukushima au Japon en 2011. Et la liste des accidents nucléaires est déjà bien longue.
- Le rendement de la transformation de la chaleur libérée par la matière radioactive en énergie électrique ne dépasse pas 33 % environ, ce qui signifie qu'une grande partie de l'énergie libérée est définitivement gaspillée.
- La radioactivité se "transmet" d'un matériau radioactif à un autre qui ne l'est pas initialement. C'est le phénomène d'activation. Ainsi, si au départ, seul le combustible de la centrale est radioactif, à la fin de la vie de la centrale, une grande partie de ses éléments (murs, canalisations, etc.) est devenue radioactive.
- Les déchets produits par l'industrie de l'uranium et les centrales nucléaires forment la majeure partie des déchets radioactifs terrestres. Ces déchets sont radioactifs et par conséquent dangereux pour les êtres vivants qui peuvent se trouver en contact ou à proximité d'eux. Une très grande partie de ces déchets est faiblement radioactive (donc pas trop dangereuse) et une très petite partie de ces déchets est extrêmement radioactive (donc extrêmement dangereuse). Ces déchets perdent peu à peu leur radioactivité mais très lentement. Ils sont donc nocifs et impossibles à recycler ce qui pose un problème majeur de gestion (Où faut-il les mettre ? Comment éviter qu'ils ne se dispersent dans l'environnement ?).

### **c- Utilisation**

L'énergie de fission nucléaire est utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales nucléaires, installations imposantes très massives. Ce mode de production, très centralisé peut alimenter une région à elle seule. La puissance

électrique de ces installations peut varier entre 900 et jusqu'à 1450 MWe (*e* pour électrique), mais il faut savoir qu'en général, plusieurs centrales nucléaires sont regroupées sur un même site (jusqu'à six en France, à Gravelines).

L'énergie de fission nucléaire est utilisée à des fins militaires : ce sont les fameuses bombes atomiques. Elle sert aussi à propulser des navires et sous-marins de guerre.

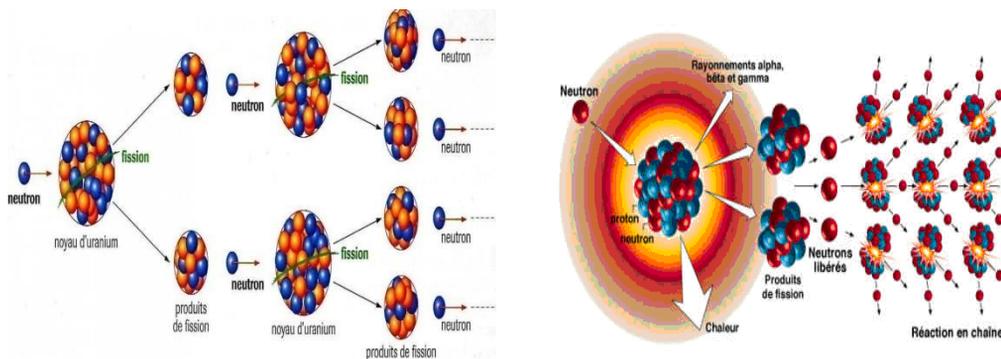


Figure 3.3 Réaction en chaîne de la fission nucléaire.

### 3.4 La fusion thermonucléaire

- La fusion thermonucléaire correspond à un autre type de réaction nucléaire : celle où deux noyaux atomiques se collent pour ne former plus qu'un seul noyau. Il s'agit de la réaction inverse de la réaction de fission. Celle-ci ne produit de l'énergie que si les noyaux initiaux sont très petits, ceux de l'hydrogène par exemple.
- Il s'agit de l'énergie primaire la plus utile à l'humanité puisque ce sont les réactions de fusion thermonucléaire qui sont à l'origine de la chaleur et de la lumière émises par... le soleil, et plus généralement par toutes les étoiles. Grâce à elles, le soleil brille et apporte l'énergie nécessaire à la vie à la surface de la Terre. Au cœur des étoiles, ces réactions produisent les métaux et éléments qui forment l'ensemble de la matière présente dans l'Univers. Bref, cette réaction est à l'origine de tout.

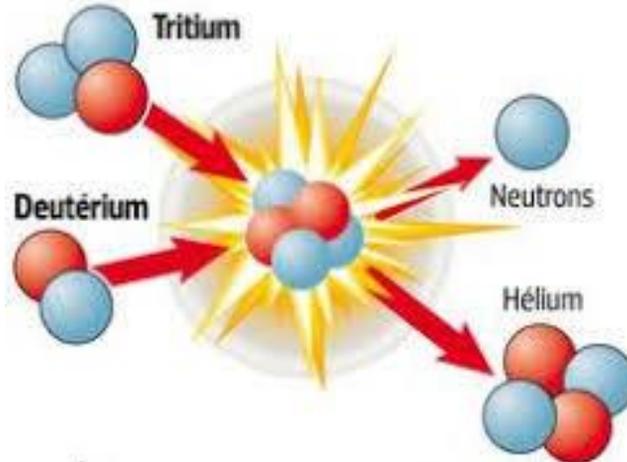


Figure 3.4 Fusion nucléaire contrôlée.

#### a- Avantages

- L'un des combustibles, le deutérium, est très abondant, puisqu'on le trouve dans l'eau de mer.
- La fusion thermonucléaire n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre.
- La fusion thermonucléaire ne devrait pas entraîner de risque d'explosion des réacteurs.

#### b- Inconvénients

- L'autre combustible, le tritium, n'existe quasiment pas dans la nature. Il faudrait le produire à l'aide d'une autre réaction nucléaire à partir de lithium, un matériaux difficile à produire.
- Si jamais une centrale est finalement opérationnelle un jour, elle devra être immense afin de maintenir plus facilement les conditions nécessaire à l'entretien de la réaction. C'est donc une énergie dont la production sera hypercentralisée.
- Les coûts de recherche puis de construction des centrales sont et seront colossaux.
- Comme pour toute réaction nucléaire, l'exploitation de ces centrales produira des déchets (forte dégradation des matériaux de la centrale notamment).
- Le rendement de la transformation de l'énergie nucléaire en énergie électrique ne dépassera pas non plus 33% en raison du passage inévitable de l'énergie sous

forme de chaleur.

### c- Utilisation

- L'énergie de fusion thermonucléaire n'a encore jamais été exploitée à des fins civiles. Un projet international, du nom d'ITER a pour vocation la réalisation d'un réacteur de fusion thermonucléaire. Le site qui a été choisi est celui de Cadarache, en Provence (France). L'objectif est de vérifier qu'un tel réacteur peut fonctionner de manière durable. Il permettra de tester les matériaux afin de trouver les plus résistants. À long terme, ce projet pourrait déboucher sur la réalisation d'un réacteur de démonstration puis d'un prototype industriel de production d'énergie électrique mais pas avant 50 ans.
- Par contre, l'énergie de fission thermonucléaire est utilisée à des fins militaires : ce sont les fameuses bombes H (ou bombes à hydrogène) et elles marchent très bien !

### 3.5 L'utilisation de l'uranium

La fission dégage de l'énergie sous forme de chaleur. C'est cette énergie que l'on utilise pour produire de l'électricité. Le phénomène de fission dégage également des rayonnements alpha, bêta ou gamma et libère des neutrons qui viennent alimenter la réaction de fission et bombarder les nouveaux noyaux. C'est pourquoi on parle de réaction en chaîne. Au contact des milliers de crayons de combustible nucléaire, l'eau récupère la chaleur produite par la fission des atomes d'uranium. L'eau de la cuve s'échauffe à leur contact à plus de 300°C. Un pressuriseur maintient la pression à environ cent cinquante cinq bars, ce qui l'empêche de bouillir. Elle circule dans un circuit fermé. Le générateur de vapeur, la pompe, la cuve et le pressuriseur constituent le circuit primaire. Seul ce circuit contient de la radioactivité. L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire.

L'échange de chaleur s'effectue dans un générateur de vapeur, un grand échangeur de chaleur cylindrique composé de milliers de tubes. La chaleur transforme l'eau du circuit secondaire en vapeur. Un alternateur, couplé à la turbine, convertit finalement l'énergie cinétique en électricité, laquelle alimente le réseau haute tension. Au contact de milliers de tubes dans lesquels circulent de l'eau froide, la vapeur se condense, redevient de l'eau liquide et est renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. La turbine, le condenseur, la pompe

et le générateur de vapeur constituent le circuit secondaire de la centrale. Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est pourquoi il y a un troisième circuit indépendant des deux autres qui est le circuit de refroidissement. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine. Pour cela est aménagé un condenseur, appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure : rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense pour se transformer en eau. Quant à l'eau du condenseur, elle est rejetée, légèrement échauffée, c'est-à-dire à environ trois degrés de plus que de la source d'où elle provient. Si le débit de la rivière est trop faible, ou si l'on veut limiter son échauffement, on utilise des tours de refroidissement appelées aéroréfrigérants. L'eau échauffée provenant du condenseur tombe sous forme de pluie (précipitation). Elle est récupérée au pied de l'aéroréfrigérant et entraînée par une pompe, l'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur. Cette pluie est refroidie par un grand courant d'air (convection naturelle) par la forme particulièrement aspirante de l'aéroréfrigérant. Dans cette dernière, l'air en refroidissant la pluie se charge en humidité et se transforme en nuage de vapeur d'eau. 1,5 % de cette eau s'évapore dans l'atmosphère, ce qui provoque de grands panaches blancs que l'on voit sortir de la grande cheminée.

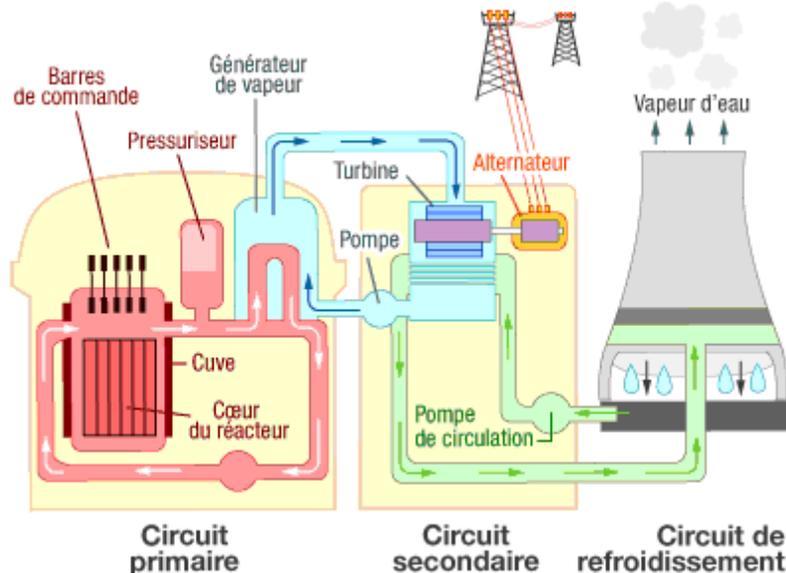


Figure 3.5 Schéma de principe d'un réacteur à eau pressurisée.

### 3.6 Les réacteurs nucléaires

#### 3.6.1 Les différents types de réacteurs

Selon la nature du combustible, du modérateur et du réfrigérant utilisés, on distingue différents types de réacteur :

✓ Les réacteurs graphite-gaz qui emploient de l'uranium naturel comme combustible, du graphite comme modérateur et du gaz carbonique sous pression comme caloporteur.

✓ Les réacteurs à eau ordinaire utilisent de l'uranium enrichi à 3%. La réaction est modérée et refroidie à l'eau ordinaire.

✓ Les réacteurs à eau lourde consomment de l'uranium naturel, emploient de l'eau lourde comme modérateur et celle-ci sous pression comme caloporteur.

✓ Les réacteurs à haute température refroidis au gaz utilisent de l'uranium hautement enrichi, du graphite comme modérateur, de l'hélium comme caloporteur.

#### 3.6.2 La protection du réacteur

La protection des produits radioactifs est assurée par des barrières entre le combustible et l'extérieur de la centrale nucléaire.

La première barrière est constituée par les gaines qui contiennent les pastilles d'uranium. La deuxième barrière est constituée par l'enveloppe du circuit primaire (voir : la centrale nucléaire), renfermant un réfrigérant toujours contaminé. La troisième barrière est l'enceinte de confinement construite pour retenir les neutrons et les produits radioactifs.

Les réacteurs sont munis de sécurités qui leur imposent des limites très strictes. Si les seuils imposés ne sont pas respectés, des barres de sécurité arrêtent automatiquement la réaction.

### 3.7 Les accidents nucléaires

De nombreux incidents se produisent chaque année dans les centrales nucléaires, mais ils sont très rares. L'un d'eux survint le 18 mars 1979 dans la centrale à eau de Three Miles Island, en Pennsylvanie. La circulation du réfrigérant fut rétablie à temps et évita la fusion du combustible, qui aurait pu traverser la cuve du réacteur et s'enfoncer dans le sol.

L'accident le plus grave eut lieu le 26 Avril 1986, dans la centrale de Tchernobyl, en Ukraine. Cette centrale emploie de l'uranium enrichi, du graphite comme modérateur et de l'eau ordinaire bouillante comme réfrigérant. L'accident a été favorisé par le fait que les réacteurs de ce type sont instables. Par suites d' une

séries d'erreurs humaines, une explosion se produisit , détruisant une partie du réacteur et provoquant un incendie .La gravité de l'accident tient surtout sur le fait que le réacteur fonctionnait sans enceinte de confinement (voir la centrale nucléaire). L'incendie libéra a peu près 5000 fois plus de radioactivité que ce que rejette en un an une centrale en ordre de marche. Un nuage radioactif s'étendit sur toute l'Europe et fit plusieurs fois le tour de la terre .Plus de 600 000 personnes furent plus ou moins contaminées en Ukraine. Douze ans après, la chape de béton abritant le réacteur menaçait de s'effondrer, faute de travaux.

### 3.8 Ressources mondiales En Uranium

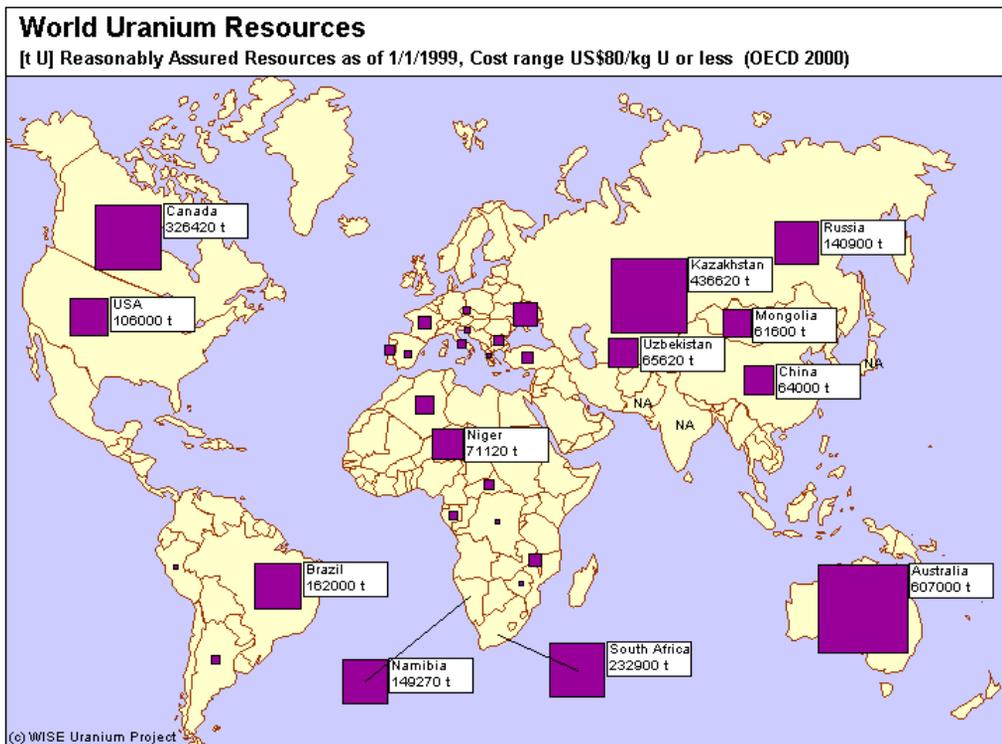


Figure 3.6 Ressources mondiales en Uranium

Les scientifiques s'accordent aujourd'hui pour affirmer la prépondérance du rôle des activités humaines dans le changement climatique et pour voir dans l'effet de serre le principal mécanisme conduisant au réchauffement de la planète.

### 3.9 Qu'est-ce que l'effet de serre ?

- « La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.
- La répartition de la température au niveau du sol dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère. Sans eux, la température moyenne serait de - 18°C et la terre serait inhabitable. Leur présence amène cette température à 15°C.
- Les gaz responsables de l'effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>), les CFC et les HCFC, gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone, ainsi que les substituts des CFC : HFC, PFC et SF<sub>6</sub>.
- Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée : ainsi, la concentration en CO<sub>2</sub>, principal GES, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle.
- Les effets combinés de tous les GES équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO<sub>2</sub> depuis cette période. »

### 3.10 Quelles sont les principales sources de gaz à effet de serre ?

- « Lorsque nous utilisons des énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz, nous brûlons du carbone, ajoutant ainsi du CO<sub>2</sub> à l'air : environ 20 milliards de tonnes par an dans le monde. Les océans, les forêts et dans une bien moindre mesure, les autres plantes, éliminent à peu près la moitié de cet excédent de gaz carbonique. Cependant, sa concentration ne cesse de croître : de l'ordre de 0,028 % il y a cent cinquante ans, elle est aujourd'hui de 0,036 %.
- Un autre gaz à effet de serre est le méthane (CH<sub>4</sub>), dont la concentration a doublé depuis la révolution industrielle. Les sources "humaines" sont les rizières, les décharges d'ordures, les élevages bovins, les fuites sur les réseaux de gaz et l'exploitation charbonnière. L'oxyde nitreux, ou protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est un autre gaz à effet de serre, qui provient de certaines industries et des excès d'épandages d'engrais.
- Il faut compter également avec l'ozone de la basse atmosphère, qui se forme à la

suite des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (N<sub>2</sub>O) et de composés organiques volatils (COV). Il y a enfin les gaz fluorés : CFC, HCFC, HFC, PFC et HF6. »

- Les deux principaux gaz à effet de serre sont le gaz carbonique, qui contribue à l'effet de serre à une hauteur de 60 % et le méthane. Cependant, tandis que le méthane n'a qu'une faible durée de vie dans l'atmosphère, le gaz carbonique y demeure pendant plus d'un siècle.
- C'est pourquoi l'attention se focalise aujourd'hui sur la réduction des émissions de gaz carbonique.

Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale

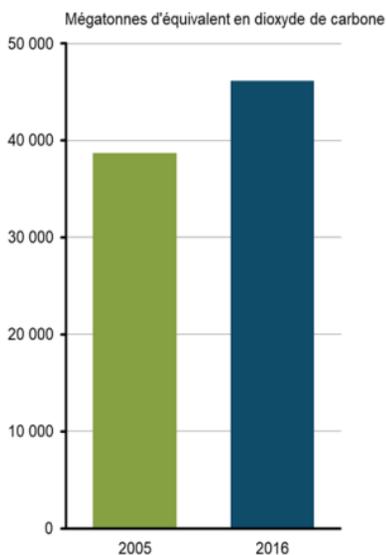


Figure 3.7.1 Emission de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale.

Émissions de gaz à effet de serre du Canada et des 10 plus grandes régions émettrices



Figure 3.7.2 Emission de gaz à effet de serre du Canada et des plus grandes régions émettrices.

### 3.11 Protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto, qui fixe des objectifs de réduction de gaz à effet de serre à une quarantaine de pays industrialisés, fait suite à la convention sur le climat de 1992. Ouvert aux Etats parties à la convention, il a été ratifié par 190 pays [octobre 2010]. Il ne comporte toutefois d'engagement que pour 38 pays industrialisés, avec un objectif de réduction moyenne de 5,2 % par rapport aux émissions de 1992 des émissions de six gaz à effet de serre entre 2008 et 2012.

Le protocole de Kyoto expirant fin 2012, une nouvelle négociation s'est ouverte à Bali en 2007 dans le but de conclure un accord international sur l'après-Kyoto. Une

étape a été marquée, en décembre 2011, lors de la conférence de Durban, en Afrique du Sud, vers la conclusion en 2015 d'un nouveau pacte mondial sur le climat. La feuille de route de Durban prévoit également la possibilité d'une prolongation du protocole de Kyoto, pour une deuxième période dont la durée (5 ou 8 ans) doit encore être débattue.

### **3.11.1 L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto (2005)**

Le succès de la négociation de Bonn finalisée à Marrakech en novembre 2001 a permis la ratification du protocole par de nombreux pays en 2002 : l'Union européenne et ses 15 Etats membres le 31 mai 2002, le Japon le 4 juin. Enfin, la ratification du Protocole par la Russie le 22 octobre 2004 a ouvert la voie à l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto le 16 février 2005. Il devait, en effet, pour entrer en vigueur, être ratifié par au moins 55 pays représentant 55 % des émissions de CO<sub>2</sub>. Les pays en développement, y compris le Brésil, la Chine, l'Inde et l'Indonésie, sont également Parties au protocole mais ne sont pas concernés par la réduction d'émissions. Les Etats-Unis n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto. Signé sous la présidence Clinton en 1997, celui-ci n'a pas été ratifié par le Sénat américain. Et le 13 mars 2001, le Président George W. Bush a dénoncé le protocole, annonçant qu'il privilégiait de nouvelles approches pour combattre les gaz à effet de serre. Bien que les Etats-Unis soient le principal pays émetteur de gaz à effet de serre dans le monde, les autres Etats parties au protocole de Kyoto n'ont toutefois pas renoncé à poursuivre les négociations. L'Australie, suite à l'arrivée au pouvoir des travaillistes, l'a, pour sa part, ratifié le 12 décembre 2007.



## 4.1 Introduction

Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de **deux grandes sources naturelles** : le **Soleil** (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) **et la Terre** (qui dégage de la chaleur).

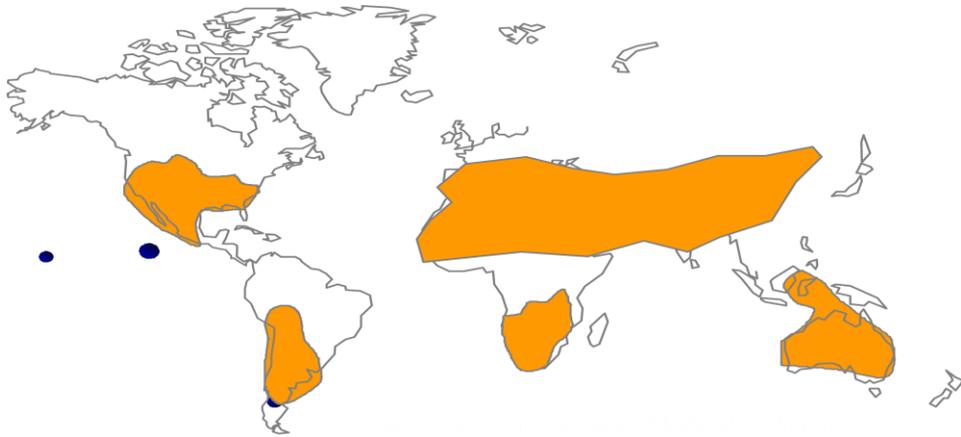
Surnommées "énergies propres" ou "énergies vertes", **leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes** mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

### 4.1.1 L'énergie solaire : conversion photovoltaïque



À l'aide de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, il est possible de réaliser des dispositifs qui transforment le rayonnement solaire en électricité : c'est ce que l'on appelle des **photopiles** ou cellules photovoltaïques. En disposant une photopile au soleil, une tension électrique apparaît à ses bornes : c'est un convertisseur d'énergie solaire en énergie électrique. La photopile permet donc de capter l'énergie solaire du moins une partie. Actuellement, les meilleures photopiles ont un rendement d'environ 15%, ce qui signifie que 85% de l'énergie qui arrive sur la surface de la photopile n'est pas transformée en électricité. Effectivement, cela fait beaucoup de pertes, mais 15% ce n'est déjà pas si mal et c'est surtout mieux que rien, quand on pense que cette énergie nous "tombe" du ciel durant toute la journée (par beau temps).

Figure 4.1 Installation de PV sur toitures de maison.



Radiation directe  $\geq 5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$

Figure 4.2 Détermination des sites adaptés pour les installations solaires.

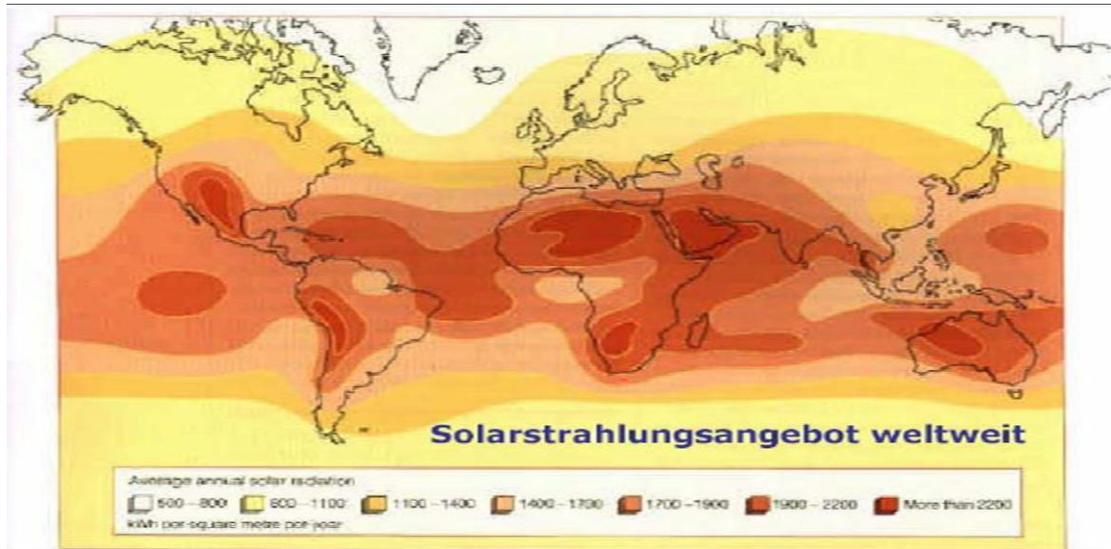


Figure 4.3 Les régions où l'on observe le potentiel solaire le plus intéressant.

Il est clair que le monde arabe est l'endroit idéal puisqu'il se positionne au milieu du monde. En Algérie, on a un ensoleillement au Sahara de plus de 2200 kWh/m<sup>2</sup>/an.

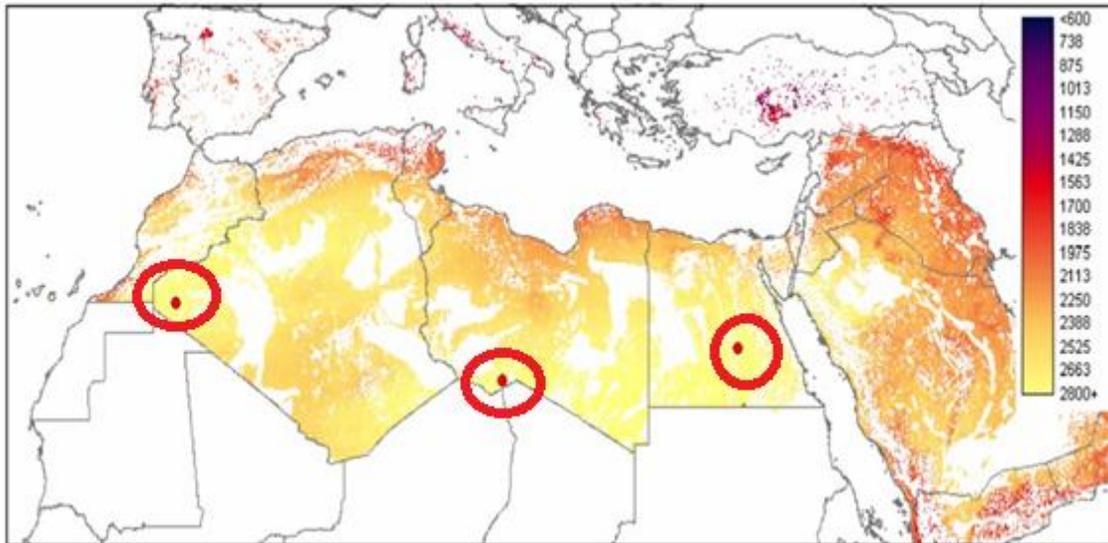


Figure 4.3 Trois sites Potentiel pour l'électricité solaire en Afrique du nord..

Sélectionnés pour leur irradiance maximale, autres critères sont aussi possible. Direct Normal Irradiance (DNI) en kWh/m<sup>2</sup>/an. Sites exclus sont en blanc.

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou-bien artificielle (une ampoule).

L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m<sup>2</sup> et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- Les modules solaires poly cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

#### 4.1.1.1 Photovoltaïque, rendement

La cellule solaire délivre une tension électrique continue de moins d'un volt et une puissance de l'ordre de 1 à 3 W. Les tensions utilisées sont habituellement du 12, 24 et

48 V, ce qui nécessite la mise en série de plusieurs cellules. Pour obtenir une puissance supérieure, on associe ces séries de cellules en parallèle. Ceci permet d'obtenir des panneaux solaires ayant une puissance de plusieurs dizaines de watts crête (Wc). Il faut noter que la puissance délivrée chute lorsque la température augmente.

Le rendement des panneaux solaires fabriqués industriellement varie de 13 à 18% pour le silicium cristallin, de 7 à 10% pour le silicium amorphe et jusqu'à 25% pour le GaAs. L'équivalent de la durée journalière à pleine puissance est de l'ordre de 3 à 4 heures par jour, soit environs 1000 à 15000 h/an. Ceci nous donne, pour un rendement de 10% et une puissance d'ensoleillement de 1 kW/m<sup>2</sup>, une production journalière de 300 à 400 Wh/m<sup>2</sup>/jour ou 100 et 150 kWh/m<sup>2</sup>/an. Un panneau de 1 Wc fournit généralement 1 kWh/an.

Actuellement le rendement des panneaux solaires fabriqués industriellement varie de 13 à 18% pour le silicium cristallin, 22 à 24% pour le GaAs, 16,4% pour le CdTe à couches minces et de 7 à 8% pour le silicium amorphe.

#### **a. Avantages**

- Ressource disponible partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones tempérées, tropicales et équatoriales.
- Les panneaux photovoltaïques s'intègrent particulièrement bien aux toitures et peuvent ainsi produire une partie de l'électricité nécessaire à une habitation sans occuper inutilement l'espace.

#### **b. Inconvénients**

- Énergie renouvelable non-stockable dépendante du temps qu'il fait. La production électrique est donc aléatoire.
- Panneaux photovoltaïques encore chers.
- Le niveau de production maximal dépend de la surface de capteur exposée au soleil, d'où une grande emprise au sol (ou sur le toit ou la façade) dès que l'on a besoin d'une puissance assez conséquente.

#### **c. Utilisation**

- Bien adapté à l'électrification de sites isolés tels que refuges montagnards, relais hertziens, bergeries, maisons isolées non-raccordée à un réseau électrique.
- Adapté à l'alimentation d'appareils peu consommateurs et/ou mobiles (calculatrices, satellites, horodateurs, équipement de voiliers,...).
- Utilisable pour l'alimentation de systèmes frigorifiques ou de climatisation (notamment dans les pays très ensoleillés et donc très chauds !).
- Inadapté à des usages tels que : production de chaleur, propulsion (même si cela reste possible, voir par exemple cet avion solaire).
- Pour la production de chaleur ou de froid, l'énergie solaire thermique est

largement préférable (elle évite de passer par la forme électrique de l'énergie, ce qui réduit d'autant les pertes de conversion).

- Les panneaux photovoltaïques peuvent aussi être raccordés sur le réseau électrique. Leur propriétaire devient alors producteur d'électricité pour les autres lorsque sa production dépasse sa propre consommation.
- Le PV est essentiellement utilisé dans les satellites, engins spatiaux, dans les balises de navigation ou émetteurs de radio et télévision, la télécommunication, dans les systèmes électroniques, génération de l'électricité dans les sites isolés etc.

#### 4.1.1.2 L'énergie solaire thermique



Le Soleil nous réchauffe naturellement, mais il est possible de capter cette chaleur afin de l'utiliser à des fins particulières. Pour ce faire, on utilise différents types de capteurs. Cela va de la bâche pour piscine d'extérieur (composée de bulles plastiques de couleur sombre) jusqu'au capteur vitré pour chauffe-eau solaire, en passant par la serre ou le châssis du jardinier, ou la simple véranda. Dans tous ces cas, le capteur (la vitre) crée un "effet de serre" en laissant entrer le rayonnement solaire et en piégeant la chaleur à l'intérieur de l'espace qu'il délimite.

Figure 4.4 Energie solaire thermique.

Mais l'énergie solaire peut aussi produire du froid si l'on utilise un dispositif frigorifique de type "absorption". Dans ce cas, comme dans le cas où l'on souhaite transporter cette chaleur, on place derrière le capteur un tube métallique dans lequel circule un fluide *caloporteur* c'est-à-dire qui va "porter la chaleur". En général on choisit un fluide peu onéreux, très abondant et non polluant : de l'eau ! Enfin, on peut aussi ajouter au capteur un système qui concentre les rayons du soleil afin d'atteindre des températures plus élevées.

##### a. Avantages

- Energie disponible partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones tempérées, tropicales et équatoriales.
- Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés aux toitures ou aux façades.

### b. Inconvénients

- Energie renouvelable toujours dépendante du temps qu'il fait, de la saison et du lieu où l'on se trouve. Il faut donc prévoir un système de chauffage non-intermittent pour prendre le relais les jours sans soleil.

### c. Utilisation

- Bien adapté au chauffage de l'eau sanitaire voire au chauffage d'une habitation (en moyenne saison).
- Utilisable pour la climatisation avec les systèmes à absorption (notamment dans les pays très ensoleillés et donc très chauds !)
- Utilisable aussi pour la production d'électricité de masse dans des centrales solaires à concentrateur.
- Notez qu'on peut aussi utiliser ce principe en "four solaire" (utilisé pour la cuisine).

## 4.1.2 L'énergie éolienne



Figure 4.5 Schéma d'une éolienne.

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie connue et c'est l'énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique.

L'énergie éolienne, dont la production ne cesse d'augmenter et ne s'accompagne pas d'émission de gaz à effet de serre, est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles.

Les aérogénérateurs produisant l'électricité sont parfois regroupés, notamment au USA, en Allemagne ou l'Espagne, où des groupes d'éoliennes peuvent produire jusqu'à 1 200 MW.

Les coûts de production de ces aérogénérateurs sont largement compétitifs par rapport à d'autres générateurs.

Des voiliers ont été utilisés dès l'Antiquité, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance ce sont faits grâce à la force du vent. Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile. Les moulins des Pays-Bas actionnent directement des pompes dont le but est d'assécher ou de maintenir secs les polders du pays. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains.

Au Ve siècle avant Jésus on trouve, en Grèce, les premières éolienne à axe verticale comme source d'énergie mécanique.

Vers la même époque, on utilise des moulins à vent à axe horizontal en Égypte.

Développement en Europe à partir du VII siècle et leur technologie s'est peu à peu sophistiquée pour culminer avec les moulins hollandais;  
L 'idée de fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie du vent date de 1802 (lord Kelvin).

Le vent est aussi une énergie renouvelable. Il peut faire tourner les pales d'une éolienne qui entraînent à leur tour un multiplicateur (système d'engrenage) et ensuite l'alternateur transforme cette énergie en énergie électrique.

Une éolienne est composée de 4 parties :

- Le mât;
- L'hélice;
- La nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité;
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau).

#### **a - Avantages**

- Energie disponible un peu partout à la surface de notre planète, surtout dans les zones côtières, les plaines et les zones de collines.
- Nécessite une faible emprise au sol.

#### **b- Inconvénients**

- Energie renouvelable toujours dépendante du vent. En utilisation isolée, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent.
- Les grandes éoliennes sont immenses et ne passent pas inaperçu dans le paysage.
- Les éoliennes sont des systèmes mécaniques mobiles qui demandent un certain entretien (graissage, nettoyage des pales), sans quoi elles perdent leurs qualités.

#### **c- Utilisation**

- Propulsion des bateaux, pompage, production électrique.
- Exploitable à grande échelle par des fermes éoliennes.

### 4.1.3 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.



Figure 4.6 Schéma d'un barrage.

Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

C'est l'énergie issue et produite par la force de l'eau. Le quart de l'énergie qui provient du soleil est absorbée par le cycle de l'eau; au cours de celui-ci, une infime partie de l'eau des océans est évaporée puis revient sur terre sous forme de précipitation (pluie ou neige).

Le terrain, les petits ruisseaux, les torrents et les rivières sont autant de moyens naturels pour concentrer la pluie venant du ciel dans des lacs de retenue qui permettent de stocker l'énergie.

L'exploitation de l'énergie hydraulique utilise la variation d'énergie potentielle de l'eau en fonction de la hauteur. Un corps de masse  $m$  situé à une hauteur  $h$  a, dans le champ de pesanteur terrestre dont l'accélération est  $g$ , une énergie potentielle «  $mgh$  ». S'il passe de la hauteur  $h_1$  à  $h_2 < h_1$ , son énergie diminue de  $mg(h_1 - h_2)$ . On peut récupérer une partie de cette énergie lorsque l'on fait passer l'eau dans une turbine.

L'exploitation de l'énergie hydraulique c'est à dire la puissance que l'on peut extraire d'une chute d'eau est proportionnelle à son débit et à sa hauteur. Ceci varie selon les régions. Le potentiel théorique mondiale de l'hydraulique est de 36000 TWh mais seulement 14000 TWh seraient exploitables. On utilise actuellement moins de 20% de ce potentiel.

L'hydraulique est la source d'énergie renouvelable commerciale la plus utilisée. 35000 MW d'électricité est produite à travers le monde soit environ 19% du globale électrique. 95% de la production d'électricité en Amérique du nord est de source hydraulique. 90% en UE et 2-3% dans les pays Arabes.

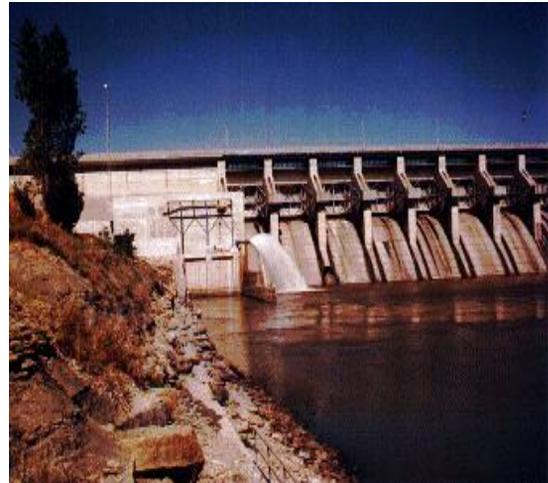
Région	Énergie installée (650,000 MW)	En projet (135,000 MW)	Capacité non développée (> 15,000,000 MW)

Europe	25	17	5
Amérique du nord	24	1	6
Amérique latine	16	18	25
Afrique	3	2	17
Chine	8	39	21
Reste de l'Asie	24	23	26

Tableau 4.1 Pourcentage de production d'électricité.



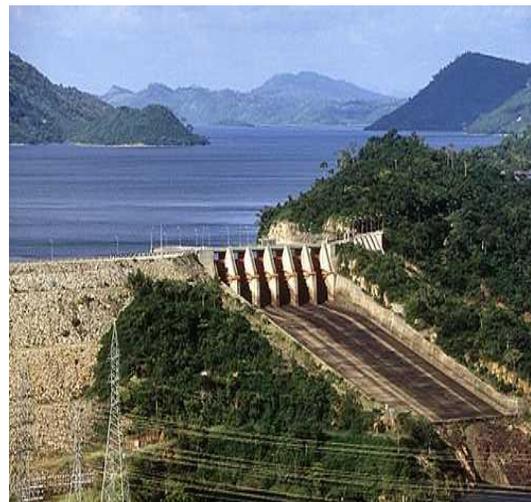
La très petite hydraulique: 100 KW-1 MW



La grande hydraulique: > 10 MW



La pico hydraulique: <100 KW



La petite hydraulique: 1-10 MW

Figure 4.7 Schémas des différentes formes de barrage.

L'énergie hydraulique est coûteuse en investissement mais économique en fonctionnement.

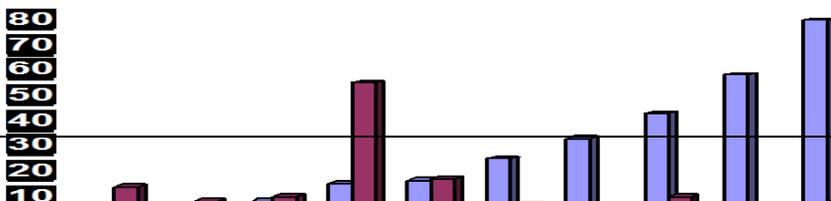


Figure 4.8 Prix de l'énergie hydraulique.

1>Biomasse 2>Océan 3>Géothermal 4>Photovoltaïques 5>Solaire Thermal  
6>Eolienne 7>Nucléaire 8>Charbon 9>Gaz 10>Hydraulique

L'exploitation de l'énergie hydraulique, dans les pays arabes, est très limitée à cause du manque d'eau le taux de production est très faible soit 2-3%. Notons qu'en Algérie, la quantité d'électricité produite par l'hydraulique représente seulement 0,2% de la production totale.

#### a- Avantages

- Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est donc une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).

#### b- Inconvénients

- Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones d'habitation (déplacement de population). Ils peuvent mettre en péril les écosystèmes locaux (faune et flore).
- Les barrages peuvent s'ensaver car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés (transportés) par les cours d'eau.
- Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peuvent provoquer des dégâts considérables en aval du barrage (raz-de-marée).

#### Utilisation

- Au fil de l'eau : pas de barrage mais simplement une chaussée. Seule une partie de l'eau du cours d'eau est utilisée et la hauteur de chute est faible. La production est continue.
- En retenue : un barrage bloque toute l'eau et l'énergie n'est libérée et convertie que sur commande.
- Au XXIème siècle, c'est surtout la génération électrique qui est privilégiée (hydroélectricité). Les barrages peuvent aussi servir de stockage d'énergie (Station de Transfert d'Énergie par Pompage ou STEP) et sont utilisés pour équilibrer les réseaux électriques.

#### 4.1.4 La géothermie

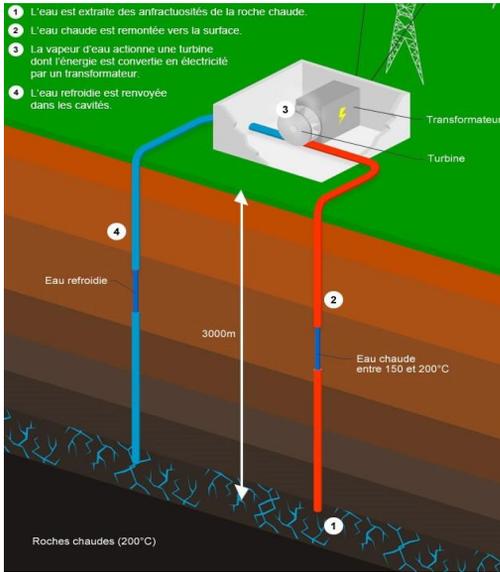


Figure 4.9 Principe de la géothermie.

Le mot géothermie vient des mots grec géo(terre) et therme (chaleur). La géothermie est une science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule de l'énergie, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. Ces eaux sont collectées puis distribuées pour alimenter des réseaux de chauffage urbains. En France, 160 000 logements (Ile-de-France et Aquitaine) sont chauffés grâce à cette forme d'énergie.

D'autres utilisations sont possibles. En Guadeloupe, une centrale de production d'électricité géothermique a été construite et permet d'alimenter le réseau électrique guadeloupéen.

Les sources chaudes sont utilisées depuis l'Antiquité pour leurs vertus thérapeutiques. En 1827, François Larderel, Français émigré en Italie, remplaça le bois de chauffage par la vapeur naturelle. Larderel entreprit en 1833 le premier forage géothermique pour obtenir davantage de vapeur à une température supérieure. Les travaux de Larderel furent poursuivis par le prince Pierro Conti en Toscane : en 1904, il alluma cinq ampoules électriques au moyen d'une dynamo entraînée par une turbine à vapeur géothermique.

La production d'électricité nécessite une profondeur de 2-3 Km où la température atteint facilement les 350 °C. La production mondiale en électricité est de 9600 MW (2006).

L'énergie géothermique dépend de la chaleur de la Terre. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre.

La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m.

La température augmente au fur et à mesure que l'on descend dans l'écorce terrestre. Ce phénomène a pour origine le flux d'énergie géothermique. La chaleur produite est essentiellement due à la radioactivité naturelle, essentiellement l'<sup>235</sup>U, l'<sup>238</sup>U, le thorium et le <sup>40</sup>K.

L' <sup>235</sup>U dégage une chaleur d'environ 18J/g/an, son accumulation dans la croûte terrestre suffit à générer de la chaleur, qui peut être stockée dans des réservoirs naturelles (nappes d'eau).

Le gradient géothermique est en moyenne de 3,3 °C/100 m dans les zones dites

normales et dépasse les  $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  dans des zones favorisées.

Le flux de chaleur géothermique est en moyenne de  $0,06\text{W}/\text{m}^2$  soit environ 3500 fois moins que le flux solaire reçu à la surface du sol.

En effet, la chaleur de la Terre, quand elle arrive jusqu'à la croûte terrestre, peut chauffer les nappes d'eau souterraines. Si cette eau a la possibilité de s'échapper à la surface, elle sourd tranquillement (source d'eau chaude) ou bien elle se vaporise et s'échappe violemment (geysers). Cette chaleur souterraine peut alors être exploitée soit pour chauffer des bâtiments, soit pour produire de l'électricité. Pour cela on creuse des puits profonds par lesquels, soit on capte l'eau chaude souterraine, soit on injecte de l'eau froide, qui se chauffe au contact du sous-sol chaud et que l'on récupère par un second forage.



Figure 4.10 Centrale géothermique de l'Ethiopie.

Selon la température de la source géothermale, on peut classer la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle peut produire de l'électricité ou pas.

La géothermie basse énergie correspond à des températures entre  $30$  et  $100^{\circ}\text{C}$ . Les sources se trouvent de quelques centaines de mètres de profondeur jusqu'à  $2500\text{ m}$ .

La géothermie moyenne énergie correspond à des sources d'eau chaude dont la température est comprise entre  $90^{\circ}\text{C}$  et  $180^{\circ}\text{C}$ . Elles peuvent se situer entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres de profondeur. On peut mettre en œuvre des installations permettant de produire des quantités d'électricité allant de quelques kW à quelques MW.

La géothermie haute énergie utilise des gisements de vapeur situés entre  $1500$  et  $3000\text{ m}$  de profondeur, dont la température va de  $250^{\circ}$  à  $350^{\circ}\text{C}$ . Selon la manière dont on produit l'électricité (à partir de la vapeur sèche ou après séparation de celle-ci).

#### a- Avantages

- Tant que la quantité d'énergie captée n'est pas supérieure à la chaleur provenant du

centre de la Terre, la ressource est inépuisable.

- Cette énergie ne produit aucun déchet.

#### b- Inconvénients

- La surexploitation d'un gisement amène la température du sous-sol à chuter ce qui fait baisser la qualité du gisement jusqu'à épuisement.
- Il y a des risques de concurrence entre l'eau pompée pour sa chaleur et l'eau pompée parfois pour elle-même (c'est le cas à Paris par exemple).
- Les gisements sont localisés en certaines régions où l'écorce terrestre laisse mieux passer la chaleur (faible épaisseur).

#### c- Utilisation

- Pour les petites températures (basse et moyenne énergie de 30 à 150 °C), la chaleur est utilisée directement pour le chauffage des bâtiments. Quand la température est plus élevée, on peut utiliser l'énergie pour faire tourner une turbine et produire de l'électricité. Dans ce cas, il s'agit de centrales géothermiques. On trouve ce type d'installations aux Philippines ou en Turquie par exemple.
- Dans le cas où la température est trop faible pour chauffer le bâtiment, il est possible d'utiliser une pompe à chaleur. Dans ce cas, une partie du chauffage est réalisée à partir de l'électricité, et l'autre partie par la géothermie.
- Le chauffage "dit géothermique" qui est parfois proposé par certains chauffagistes capte généralement sa chaleur à quelques dizaines de centimètres au dessous du sol. Dans ce cas précis, on ne peut pas exactement parler de géothermie, puisque la chaleur recueillie ne provient pas du centre de la Terre, mais du Soleil qui réchauffe le sol. Il s'agit donc d'un abus de langage.

### 4.1.5 La biomasse



Figure 4.11 Principe de la biomasse.

C'est une source importante d'énergie représentant une production de 8 fois la consommation annuelle mondiale d'énergie à partir des autres sources restantes.

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la [photosynthèse](#). Elle est exploitée par [combustion](#) ou [métabolisation](#). Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le [bois](#) et les [biocarburants](#).

La biomasse est utilisée pour produire des combustibles liquides ou gazeux, générer de la chaleur ou de l'électricité ou encore les deux.

L'énergie est dérivées de matières d'origine végétale et organique appelé biocombustible (bois et ses déchets, les herbes, les arbrisseaux, les résidus de l'agriculture, les excréments des animaux et même les déchets ménagers de nature organique). Elle représente environ 16% du bilan énergétique mondial.

La biomasse est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée actuellement dans les pays arabes (environ 50 million d'habitants, représentant 5-6 % de leur consommation d'énergie totale).

L'efficacité de la biomasse dans les pays arabes peut être améliorée en optant à l'insertion de la technologie moderne dans la production du bio-gaz.

Le plus grand projet de la biomasse est celui de New York (capacité de production 200,000 m<sup>3</sup>/jour d'alcool à partir du maïs) suivi de l'Allemagne avec plus de 70 projets, U.K. avec 35 projets et plus de 30 MW de puissance électrique. Le Brésil est l'un des pays principaux dans la production de l'alcool par la biomasse (à partir de la canne à sucre) soit environ 13 millions de tonnes par année pour faire circuler environs trois millions de voitures.



**Figure 4.12** Schéma d'une centrale de biomasse.

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent la combustion de déchets organiques (copeaux de bois, résidus agricoles ...). L'ensemble de ces combustibles constituent la biomasse.

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale.

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse.

#### 4.1.5.1.1 La biomasse par combustion



Figure 4.13 Déchets du bois.

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...).

#### 4.1.5.1.2 La biomasse par méthanisation



Figure 4.14 Les différentes formes de déchets.

Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons. L'énergie biomasse n'émet presque pas de polluants et n'a pas d'impact sur l'effet de serre.

La quantité de CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre, qu'elle rejette, correspond à la quantité absorbée par les végétaux pendant leur croissance. De plus, la valorisation du biogaz en électricité évite l'émission de méthane, un autre gaz à effet de serre, dans l'atmosphère.

Aujourd'hui, trois grandes familles de produits, issus de la biomasse sont exploitées :

- Le bois-énergie;
- Les biogaz;
- Les agro-carburants.

#### 4.1.5.1.3 Le bois énergie

Le bois ! C'est une vieille histoire. Déjà à l'époque de la guerre du feu, le bois était une ressource stratégique pour le chauffage et la cuisson des aliments. Et s'il a été supplanté par le charbon, puis le gaz, le fioul ou l'électricité, il demeure un très bon moyen de se chauffer qui n'a pas été abandonné. De nombreux pays l'utilisent encore à grande échelle et en Europe, c'est la première énergie primaire

produite.

#### **a- Avantages**

- Large disponibilité de la ressource sur la terre, sauf dans les régions désertiques où le bois est rare.
- Faibles émissions polluantes et pas de contribution à l'effet de serre.
- Le renouveau de son utilisation dans les pays qui s'en étaient un peu détournés amène à une meilleure gestion et valorisation des bois et des forêts.
- Le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

#### **b- Inconvénients**

- C'est une source d'énergie peu dense. Pour se chauffer durant un hiver, il faudra un grand volume de bois, ce qui nécessitera beaucoup de transport, de manutention et un vaste espace de stockage.
- L'exploitation des bois et forêts doit s'accompagner d'une nouvelle plantation. Et elle doit être raisonnée car la forêt accueille de nombreuses plantes et animaux. Dans le cas contraire, on dégrade l'écosystème et on détériore la ressource.

#### **c- Utilisation**

- Aujourd'hui c'est exclusivement pour le chauffage. En usage individuel, le bois sera utilisé dans des cheminées (de préférence à insert), des poêles de masse ou des chaudières. En usage collectif, ce sera dans ces chaudières automatiques et des réseaux de chaleur.
- Le bois peut être conditionné en bûchettes, en plaquettes ou en granulés.

#### **4.1.5.1.4 Les agro-carburants**

Dans agro-carburants, il y a "agro" et il y a "carburant" : il s'agit des carburants (liquides) produits à partir des activités agricoles. C'est, quand on y pense, à partir de l'agriculture, on sait produire des substances très riches en énergie, comme le sucre, l'alcool ou l'huile. Avec un peu de chimie on peut les transformer en carburant que l'on peut mettre dans le réservoir d'une voiture ou d'un tracteur.

Aujourd'hui, on produit trois sortes d'agro-carburants, classés par famille chimique : les huiles végétales, les esters, les alcools.

##### **a) Les huiles végétales brutes**

Ce sont des huiles obtenues à partir de certaines plantes : colza, tournesol, palmier, jatropha. Si on les chauffe, elles brûlent. Un petit réglage du moteur et quelques ajustements suffisent pour que l'on puisse les utiliser directement, ou en mélange avec des carburants pétroliers.

On peut aussi utiliser de l'huile de friture usagée. Dans ce cas, c'est du recyclage et on évite de jeter l'huile. C'est donc très bon pour l'environnement (excepté peut-être l'odeur de frite...).

**b) Les esters**

Ils sont produits par un procédé chimique à partir d'huile de colza ou de soja. Ensuite on les mélange à du gazoil et ça donne du bio-diesel.

**c) Les alcools**

Ils sont produits à partir de plantes sucrières : canne à sucre, betterave, maïs. Par fermentation, le sucre (ou l'amidon) se transforme en alcool. On parle alors de bio-éthanol. Cet agrocarburant peut être utilisé en mélange dans les moteurs à essence.

**a- Avantages**

- Issus de l'agriculture, ces carburants contiennent du CO<sub>2</sub> provenant de l'atmosphère. Il n'y a donc pas d'effet de serre induit par leur combustion.

**b- Inconvénients**

- L'agriculture intensive, à l'origine des agro-carburants, est néfaste pour l'environnement à plus d'un titre. Elle fonctionne grâce aux tracteurs, aux engrais de synthèse et aux pesticides qui abîment les sols et ne respectent pas la nature. Les pesticides sont des poisons qui tuent insectes, champignons, plantes et qui se retrouvent ensuite dans les sols, l'air et l'eau. Les engrais créent des déséquilibres et se concentrent dans les nappes phréatiques (nitrates). On sait aujourd'hui que cette agriculture est mortifère et qu'il faudra bientôt changer complètement les pratiques agricoles.
- D'autre part, cette agriculture demande beaucoup d'énergie pour faire rouler les tracteurs, pour produire les engrais et les pesticides, etc. ce qui fait que le bilan énergétique de la production des agro-carburants peut être négatif dans certains cas : on consomme plus d'énergie pour les produire qu'ils n'en libèrent lorsqu'on les utilise. Dans ce cas, il serait plus sage de ne pas les produire.
- Cultiver des champs pour produire des carburants alors que des millions de personnes dans le monde ont des difficultés à se nourrir pose une question éthique. Ne faudrait-il pas commencer par nourrir la planète avant de nourrir les moteurs des véhicules ? La concurrence des usages joue aussi sur les prix, ce qui explique la crise du maïs de 2007 au Mexique. Le maïs est une denrée de base dans ce pays, mais en raison de la demande en carburant de maïs, les prix ont flambé, entraînant des émeutes.

**4.1.5.1.5 Le biogaz**

L'agriculture produit plein de choses : des légumes et des fruits, des céréales, des plantes oléagineuses, du café, du cacao, des plantes sucrières, des plantes fibreuses pour faire des vêtements (coton, lin, chanvre, etc.).

Mais on n'utilise pas toujours toute la plante ; il y a donc des déchets. Broyer ces déchets, les mettre en tas, chauffer un peu : cela suffit pour nourrir tout une armée de... bactéries. Celles-ci transforment ces déchets en engrais naturel : le compost. Elles

produisent aussi un gaz toxique, qui sent mauvais mais qui est plein d'énergie que l'on appelle le "biogaz". C'est un mélange de différents gaz, dont le méthane qui est le principal constituant du gaz naturel. On peut donc produire du biogaz à peu près partout où sont produits des déchets organiques : dans les fermes, mais aussi dans les décharges. La difficulté consiste à collecter et à stocker ce gaz qui est rapidement volumineux.

#### **a- Avantages**

- Assez facile à produire puisqu'il se produit spontanément dans les décharges.
- Collecter le biogaz évite que ce gaz à effet de serre ne parte dans l'atmosphère.
- Permet de valoriser des déchets.

#### **b- Inconvénients**

- Comme tous les gaz, il est volumineux. Son stockage et son transport sont donc difficiles.
- Il sent mauvais et est toxique.

#### **c- Utilisation**

- Comme le biogaz n'est pas pratique à transporter, il vaut mieux l'utiliser là où il est produit. On peut le brûler pour produire de la chaleur et éventuellement de l'électricité.

### **4.1.6 L'énergie des marées**



Figure 4.15 Energie de marées.

Deux fois par jour, le niveau des mers, des océans (et même des continents !) s'élèvent puis s'abaissent, dans une lente oscillation. C'est la marée, bien connue des personnes qui vivent au bord de la mer, car sur la plage, la mer se retire puis reprend sa place. Cette oscillation immuable est due à la rotation de la Terre sur elle-même associé à l'influence de la Lune. Ce satellite de notre planète est suffisamment gros pour déformer légèrement la Terre.

Cette énergie est considérée comme une énergie nouvelle et sa conversion en électricité a été mise à l'étude et plusieurs types de dispositifs mécaniques ont été conçus pour récupérer l'énergie des vagues. Les problèmes d'opération et d'entretien sont toutefois considérables. Quelques dispositifs sont en exploitation régulière.

La hauteur de la marée est souvent faible (quelques mètres tout au plus) mais la quantité d'eau soulevée est colossale ! Car cette forme d'énergie renouvelable est une énergie potentielle, exactement comme l'énergie hydraulique. Pour l'exploiter, on a imaginé de faire des sortes de barrages au bord de la mer où l'on laisse l'eau de la marée montante (ou descendante) entraîner des turbines (appelé "groupes bulbes") qui produisent de l'électricité. Ça marche, et pourtant il n'existe que très peu de centrales de ce type. En fait à peu près une seule dans le monde, qui se trouve en Bretagne, à l'estuaire de la Rance. L'idée est très bonne mais malheureusement, il y a très peu d'endroit au monde où les conditions soient favorables pour ce type d'installations. Bien souvent, la marée n'est pas assez forte et ça ne vaut pas le coup de construire une centrale pour si peu. Cette solution n'est pas idéale non plus, car l'exploitation du barrage empêche la marée de nettoyer le fond de la mer, ce qui fait que le côté haut du barrage a tendance à s'ensabler.



Figure 4.16 Turbines à courant marin.



Figure 4.17 Les turbines à vent et turbines à courant marin

Pour générer 1MW d'électricité il faut que le diamètre de l'hélice de l'aérogénérateur soit de 90m mais seulement 9 m pour le cas de la turbine à courant marin.

#### a- Avantages

- L'énergie marémotrice est enfin un bon moyen pour produire de l'électricité car elle offre les avantages d'être à la fois propre, naturelle et renouvelable.
- Les marées qui animent mers et océans constituent une source d'énergie inépuisable et qui n'est pas soumise aux aléas climatiques contrairement à l'énergie solaire ou éolienne.
- Les usines marémotrices peuvent donc être une des solutions contre le danger de radioactivité des centrales nucléaires.

#### b- Inconvénients

- Les investissements nécessaires sont énormes. Une usine marémotrice ne peut pas être construite par hasard. Il faut choisir un endroit où l'amplitude des marées est très grande et ce lieu doit permettre l'installation d'un barrage, donc grand.
- La composition des sols doit permettre à l'usine de rester en équilibre. (sol granitique, roche dure et non friable).
- La construction de barrage peut perturber les habitants, les pêcheurs qui travaillaient avec l'heure de la mer. Il est difficile de s'adapter aux contraintes de circulation imposées par l'ouverture et la fermeture des écluses.

#### c- Utilisation

- L'utilisation principale de l'énergie marémotrice c'est pour la production d'électricité.
- Cette énergie peut être captée de deux manières :
  - Soit sous forme d'énergie potentielle en exploitant les variations du niveau de la mer (par exemple l'usine marémotrice de la Rance en France).
  - Soit sous forme d'énergie cinétique en exploitant les courants de marée captés par des turbines hydroliennes.

## 4.2 Les énergies renouvelables en Algérie

### 4.2.1 Enjeux Politico-Economiques et Environnementaux en Algérie

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Pour consolider les énergies renouvelables et assurer la transition énergétique, l'Algérie par ses ministères a arrêté un programme ambitieux, afin d'accélérer la transition énergétique.

En effet l'Algérie a fait un choix stratégique en lançant un programme des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur de ce programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Malgré un potentiel assez faible, ce programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

En matière d'énergie renouvelable le plan national prévoit la réalisation d'installations d'une capacité de 20.000 mégawatts dont 4.000 MWH mis en route d'ici 2025.

La phase initiale du programme national de transition énergétique a déjà été lancée. A la fin 2016, l'Algérie compte une capacité de 343 mégawatts répartis à travers 40 wilayas. Actuellement 16 centrales d'une capacité de 195 mégawatts sont déjà fonctionnelles et injectent de l'énergie d'origine renouvelable dans le réseau.

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases :

- Fin 2013, il était prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW;
- Horizon 2015, une puissance totale de près de 650 MW serait installée;
- Horizon 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW;

- Horizon 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

La synthèse de ce programme, par type de filière de production, se présente comme suit :

- Energie Solaire Photovoltaïque
- Energie Solaire Thermique
- Energie Eolienne

#### 4.2.2 Programme de l'Efficacité Energétique

L'objectif du programme de l'efficacité énergétique consiste à réduire graduellement la consommation. Sa mise en œuvre générerait une économie d'énergie cumulée de l'ordre de 90 millions de tep, dont 60 millions sur la période 2015-2030 et 30 millions de tep, au-delà de 2030, pour la période correspondant à la durée de vie des équipements utilisés et des constructions réalisées. Ainsi, Il permettrait pour l'année 2030 de réduire la demande en énergie d'environ 10%.

Ce programme consiste, principalement, en la réalisation des actions suivantes :

- L'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments ;
- Le développement du chauffe-eau solaire ;
- La généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation ;
- La substitution de la totalité du parc de lampes à mercure par des lampes à sodium ;
- La promotion du GPL/C et du GN/C;
- La promotion de la cogénération ;
- La conversion au cycle combiné des centrales électriques quand cela est possible; la réalisation de projets de climatisation au solaire;
- La génération d'électricité à partir des déchets ménagers.

#### 4.2.3 Parc de Production National : Sociétés de production Electrique (SPE) et Production des Tiers

Le parc de production totalise aujourd'hui une puissance installée de plus de 12.930 MW entre le réseau interconnecté du nord et les réseaux isolés du sud

La production de SPE est de l'ordre de 28.950 GWh répartie entre les filières comme suit :

- ❖ Turbines à vapeur : 9.422 GWh
- ❖ Turbine à gaz : 18.723,3 GWh
- ❖ Filière hydraulique : 389,4 GWh
- ❖ Filière Diesel : 415,9 GWh

Quant à la production des tiers, elle est de l'ordre de 25.133 GWh, elle est répartie comme suit :

- ❖ Kahrama : 2.559,2 GWh

- ❖ SKS : 5.421,6 GWh
- ❖ SKB : 2.792 GWh
- ❖ SKH : 8629,8 GWh
- ❖ SPP1 : 1.159,4 GWh
- ❖ SKT : 4.474,5 GWh
- ❖ SKD : 96,7 GWh

#### 4.2.4 L'énergie solaire en Algérie

Les régions où l'on observe le potentiel solaire le plus intéressant dans le monde sont:

- L'Amérique du Nord ;
- L'Amérique du Sud ;
- L'Asie ;
- L'Afrique ;
- L'Australie.

Il est clair que le monde arabe est l'endroit idéal puisqu'il se positionne au milieu du monde. En Algérie, on a un ensoleillement au Sahara de plus de 2200 kWh/m<sup>2</sup>/an.

- ✓ La terre reçoit en moyenne une puissance solaire de 1,368 kW/m<sup>2</sup>; Soit une puissance globale de 174000 TW;
- ✓ 17000 fois la capacité électrique disponible sur terre ;
- ✓ 1/1000ème de la puissance solaire vaut 3 fois la consommation mondiale en énergie;
- ✓ Le sud algérien reçoit à une moyenne d'ensoleillement de dix heures par jour une énergie électrique de 8 kWh/m<sup>2</sup>. Ceci est l'équivalent d'une énergie thermique de 6880 kcal/m<sup>2</sup> qui représente approximativement un litre d'essence par mètre carré.
- ✓ Le 1/10ème de notre Sahara permet d'alimenter l'Europe entière en énergie solaire;

Les évaluations du potentiel en énergies solaire effectuées par satellites (DLR) ont donné :

- Pour le solaire thermique : 169440 TWh/an ;
- Pour le solaire photovoltaïque : 13,9 TWh/an.

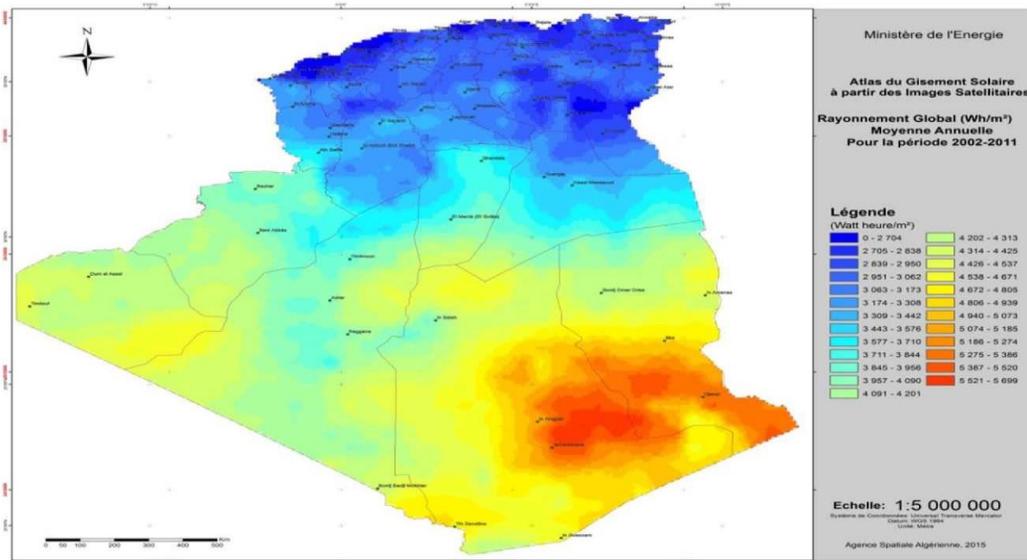


Figure 4.18 Carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne (Période 2002-2011).

En Algérie, on a un ensoleillement de 5 kWh/m<sup>2</sup>/jour (Oran, Annaba et Alger) à 6-8 kWh/m<sup>2</sup>/jour (Bechar, Adrar et Timimoun).

Zone	côtes	Haut Plateaux	Sahara
Surface (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçu (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau 4.2 Potentiel solaire de l'Algérie

#### 4.2.4.1 Projets Solaires Photovoltaïques en Algérie

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 Mwc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 Mwc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle.

Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

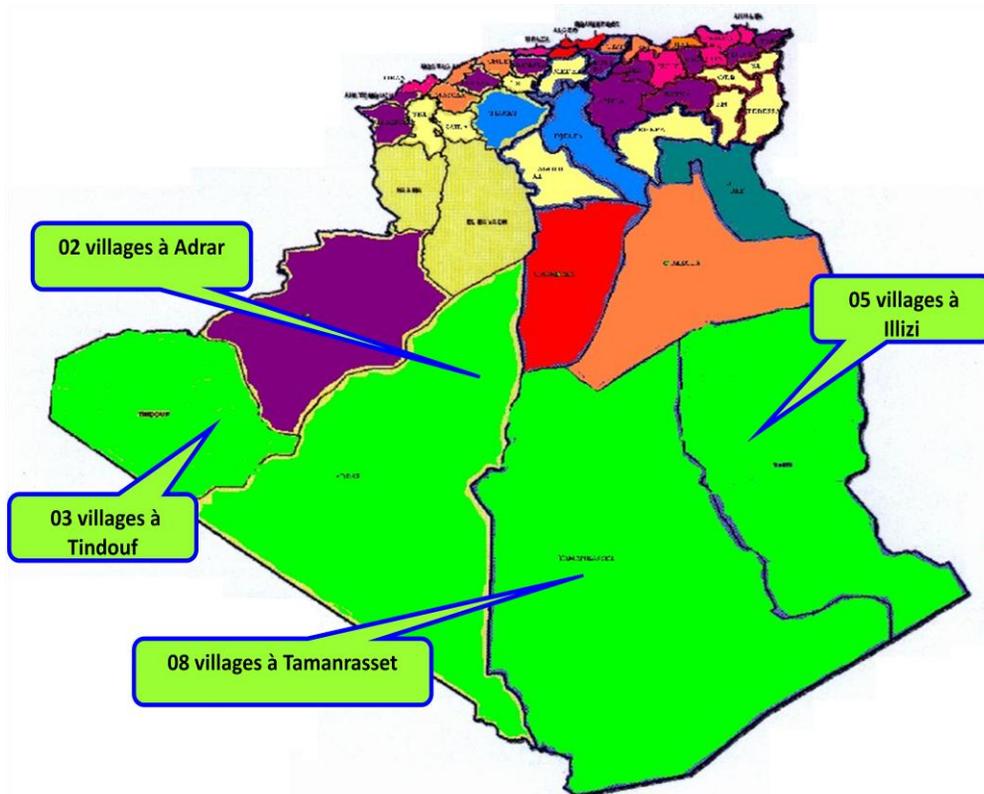


Figure 4.19 Photovoltaïque en Algérie.

Wilaya	Village	Puissance installée (kW)	Consommation (kWh/jour/foyer)
<b>Tamanrasset</b>	Moulay lahcen	9	1.48
	In delagh	15	0.92
	Tahifet	61.5	1.30
	Arak	61.5	1
	Amguid	51	1.60
	Tahernenet	30	1.13
	Tin tarabin	34.5	1.44
	In blel	15	1.38
<b>Tindouf</b>	Gara djebilet	33	1.47
	Daya el khadra	24	1.55
	Hassi mounir	21	1.68
<b>Adrar</b>	Hamou moussa	6	1.53
	Tala	16.5	1.61
<b>Illizi</b>	Imehrou	16.5	0.63
	Ifni	7.5	0.60
	Oued samen	15	0.68
	Tihahiout	12	0.57
	Tamadjart	24	0.80

Tableau 4.4 Installations algériennes en PV.

WILAYA	FOYER/UNITE	PUISSANCE (K)	ENERGIE (KWh)	STOCK (KWh)
Tamanrasset	555	277,5	1665	4026
Illizi	150	75	450	1100
Tindouf	156	78	468	1144
Adrar	45	22,5	135	330
<b>Total</b>	906	453	2718	6600

Tableau 4.5 Distribution par Wilaya de la puissance installée en PV.

#### 4.2.4.2 Projets Solaires Thermiques en Algérie

Plus connu sous le nom de « concentrating solar power » (CSP), le solaire thermique peut répondre à la demande en électricité de jour comme de nuit en étant couplé à des moyens de stockage thermique ou hybridé avec d'autres énergies comme le gaz.

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solaire thermique.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune ont été lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire.

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

#### 4.2.5 Energie hydraulique en Algérie

Le potentiel hydraulique de l'Algérie est estimé à 25 milliard de m<sup>3</sup>. La quantité d'électricité produite par l'hydraulique représente 5 % de la production totale. Les 13 sites produisent environs 269.208 MW/an. Le reste soit 94.5 % de l'électricité algérienne est générée par la combustion du gaz naturel.



Site	Puissance installée (MW)	Site	Puissance installée (MW)
Darguina	71.5	Ighzernchebel	2.712
Ighil Emda	24	Gouriet	6.425
Mansouria	100	Bouhanifia	5.700
Erraguene	16	Oued Fodda	15.600
Souk El Djemaa	8.085	Beni Behde	3.500
Tizi Meden	4.458	Tessala	4.228
Ghrib	7.000		

Tableau 4.6 Production hydraulique en Algérie.

## 4.2.6 Energie éolienne en Algérie

### 4.2.6.1 Installations Fermes Eoliennes en Algérie

Le programme EnR algérien a prévu dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

Site	Altitude	Vitesse moyenne (m/s)	Energie (kWh/m <sup>2</sup> /an)
Tindouf	401	8.7	215.50
Adrar	263	9.8	308.82
Timimoun	312	9.4	242.30

Tableau 4.6 Potentiel éolien de l'Algérie.

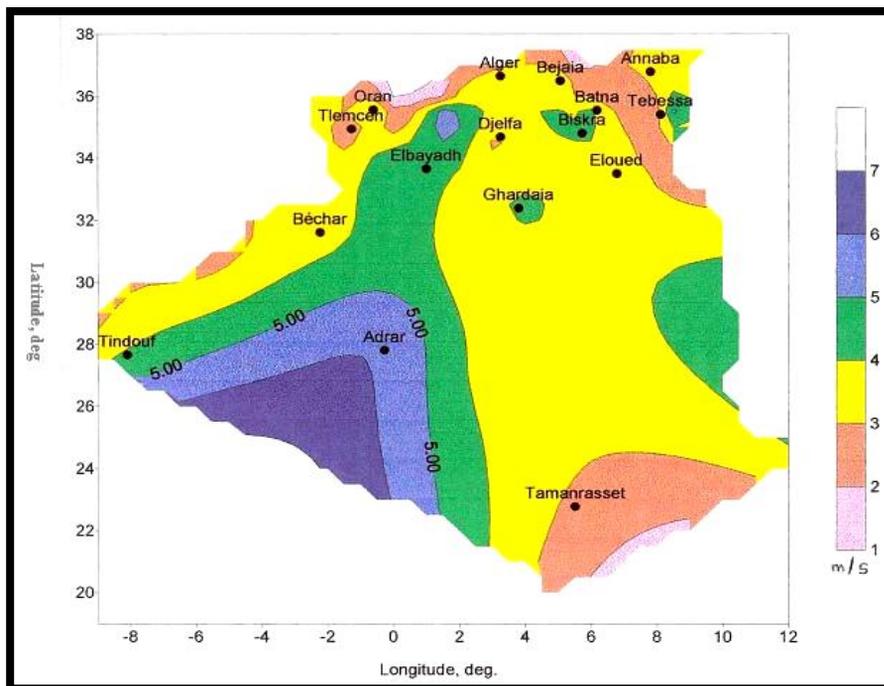


Figure 4.20 Potentiel éolien de l'Algérie.

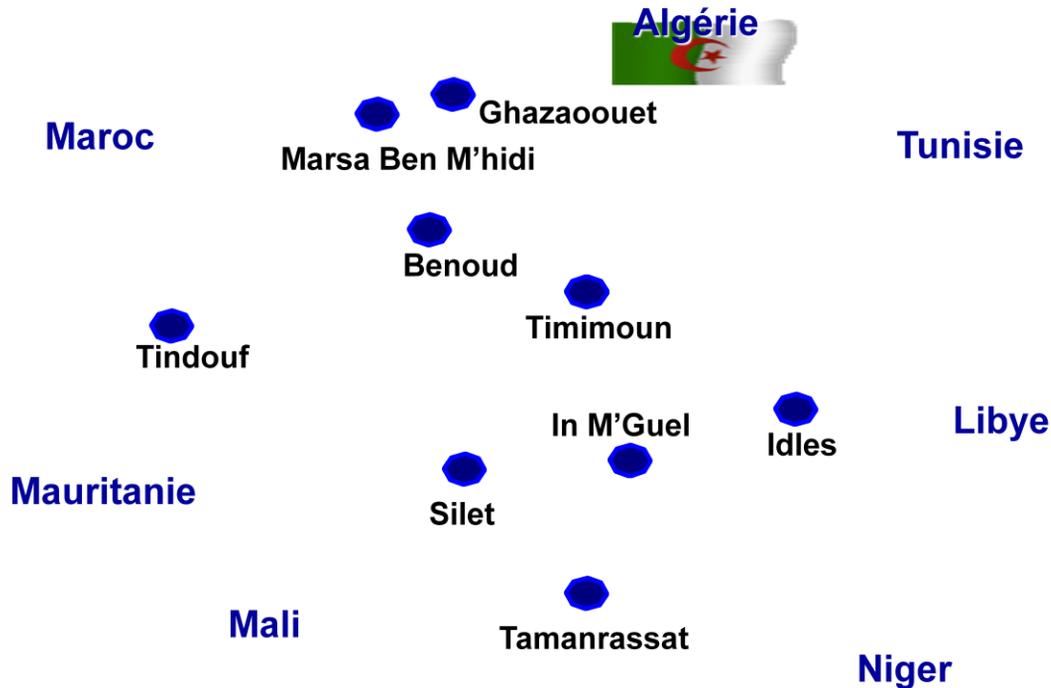


Figure 4.21 9 sites d'évaluation à travers l'Algérie

#### 4.2.7 Energie de la biomasse en Algérie

La biomasse est loin d'être négligeable en Algérie. Elle représente aujourd'hui un potentiel de 3.7 millions de TEP sous la forme de bois de forêt et 1.33 million de TEP/an provenant des déchets végétaux et urbain (365 kg de déchet urbain/algérien). Cependant, cette énergie est loin d'être exploitable en Algérie faute de moyens techniques sophistiqués et du fait qu'on est loin de la compétitivité économique (gaz naturel).

Néanmoins, L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

#### 4.2.8 Energie géothermique en Algérie

L'énergie géothermique n'est pas développée en Algérie. Les Algériens exploitent la géothermie par l'utilisation de l'eau des sources thermales chaudes pour le bain ou à des fins thérapeutiques.

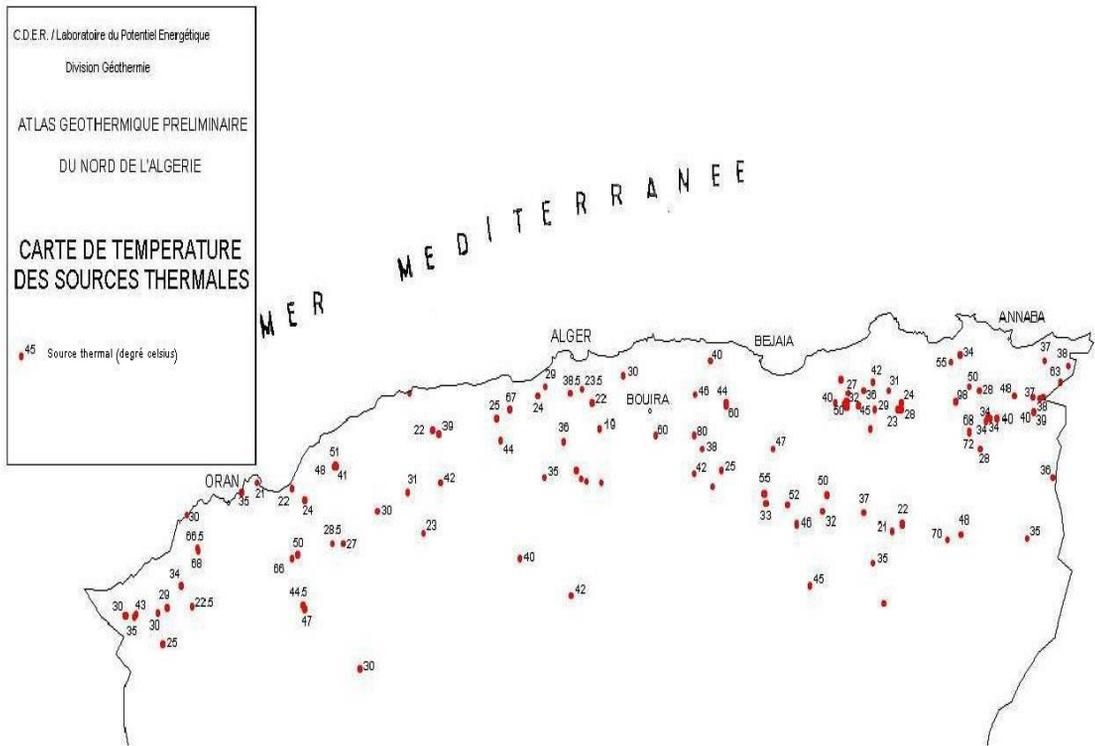


Figure 4.22 Carte de température des sources thermales.



### 5.1 Introduction

La fonction du stockage d'énergie est essentielle pour apporter de la flexibilité et renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. On distingue deux types de stockage : le stockage d'énergie électrique et le stockage de chaleur ou de froid.

Le stockage d'électricité permet d'apporter une capacité de production à faible émissions en soutien des énergies intermittentes (éolien, solaire) ou pour répondre à des aléas systémiques (secours, systèmes de haute disponibilité).

Le stockage d'énergie sous forme de chaleur ou de froid permet d'optimiser le dimensionnement d'installations et leurs coûts opérationnels face à une grande variation temporelle (journalière ou saisonnière) de la demande.

### 5.2 Les différentes technologies

Le stockage de l'énergie s'inscrit dans un contexte où :

- l'utilisation de l'énergie électrique s'accroîtra fortement dans les prochaines décennies afin de réduire globalement les utilisations d'énergies fossiles ;
- dans un souci de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la part des énergies renouvelables intermittentes dans la production d'énergie électrique s'accroîtra également fortement ;
- l'intensité de la pointe de demande en électricité devrait augmenter fortement si les habitudes de consommations ne sont pas modifiées.

Les solutions de stockage d'énergie se divisent en quatre catégories principales :

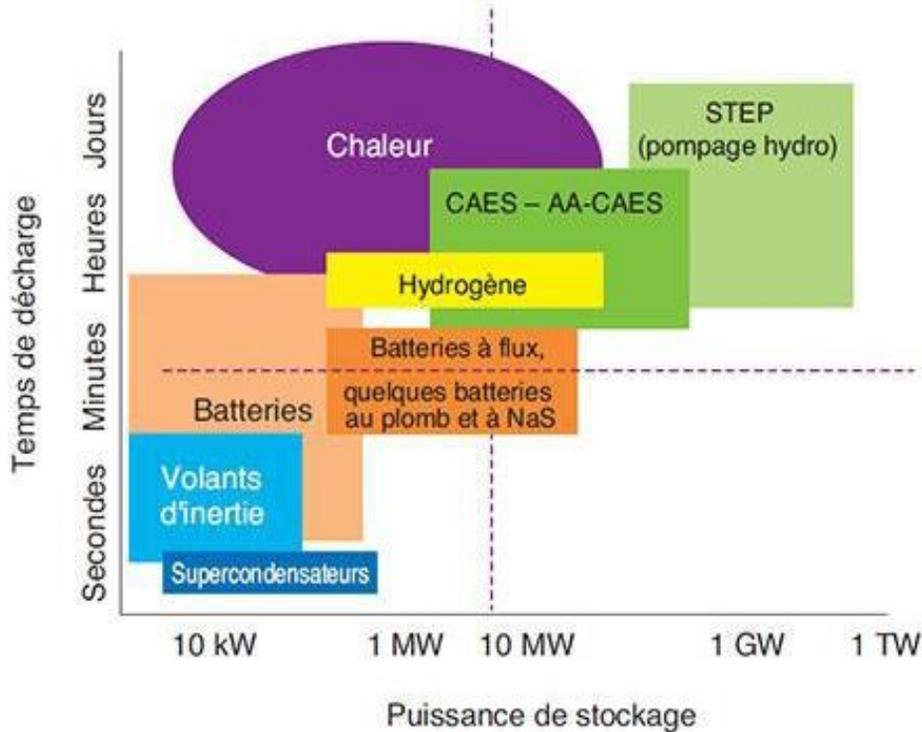
- l'énergie mécanique potentielle (barrage hydroélectrique, Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP), STEP en façade maritime, stockage d'énergie par air comprimé (CAES))
- l'énergie mécanique cinétique (volants d'inertie) ;
- l'énergie électrochimique (piles, batteries, condensateurs, vecteur hydrogène) ;
- l'énergie thermique (chaleur latente ou sensible).

La figure 5.1 montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des périodes longues concernent principalement les STEP, les CAES et la chaleur. Le stockage massif de l'énergie est majoritairement du stockage stationnaire mais quelques batteries mobiles peuvent aussi stocker des quantités d'énergie de l'ordre de quelques dizaines de MWh. Ces batteries sont utilisées comme réserve d'énergie à la différence des batteries UPS (Uninterruptible Power Systems) qui livrent une brève impulsion en régime continu (pour mettre en route un générateur de secours par exemple).

Le stockage de l'hydrogène commence également à être utilisé hors piles à

combustible.

Figure 5.1 Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie).



### 5.3 Mode de stockage mécanique

#### 5.3.1 Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire. Il représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde, avec près de 400 STEP pour une capacité totale d'environ 125 GW.

Comment ça marche ?

Ce système, lié à l'énergie hydraulique, fonctionne sur le principe de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes et est souvent couplé avec un barrage. Lorsque l'électricité est produite en excès, l'eau du bassin inférieur est pompée via une conduite forcée vers le bassin supérieur, qui devient un réceptacle (réservoir) d'énergie potentielle. Lorsque le besoin se fait ressentir, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau passe dans une turbine qui produit l'électricité. C'est un système réversible qui associe pompe et turbine.

La STEP est une technologie mature nécessitant néanmoins des installations

conséquentes et un contexte géographique spécifique. Elle est en plein essor dans les régions montagneuses du monde entier, notamment en Asie, où est prévu un doublement de la capacité d'ici à 2020, et en Europe, où plus de dix projets sont actuellement en développement. Plusieurs projets consistent également à convertir un barrage hydroélectrique existant en STEP.

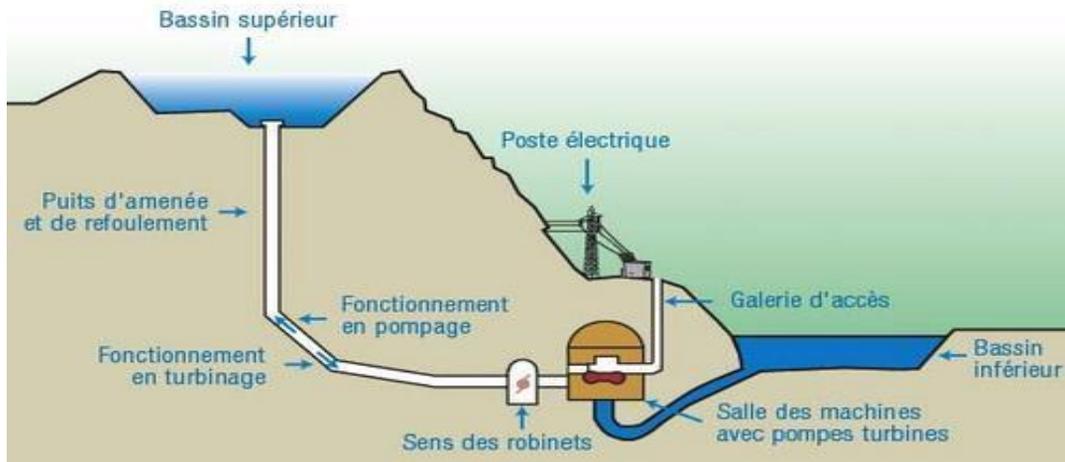


Figure 5.2 Schéma de fonctionnement d'une STEP.

### 5.3.2 Stockage par air comprimé classique (CAES, Compressed Air Energy Storage)

Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

Il existe deux types de stockage à air comprimé : CAES classique et Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES).

#### 5.3.2.1 CAES classique

Le système fonctionne pratiquement comme une centrale à gaz sauf que les phases de compression et de détente sont séparées et décalées dans le temps. Ce système met en œuvre une turbine à gaz; la chaleur produite n'est pas stockée mais seulement récupérée et le stockage de l'air comprimé se fait dans des cavernes souterraines.

**5.3.2.2 Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)**

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose que les deux énergies thermique et de compression soient stockées dans deux réservoirs spécifiques. La chaleur nécessaire pour réchauffer l'air comprimé pour sa détente est apportée par cette réserve et le système s'affranchit ainsi des apports en gaz comme dans le CAES classique.

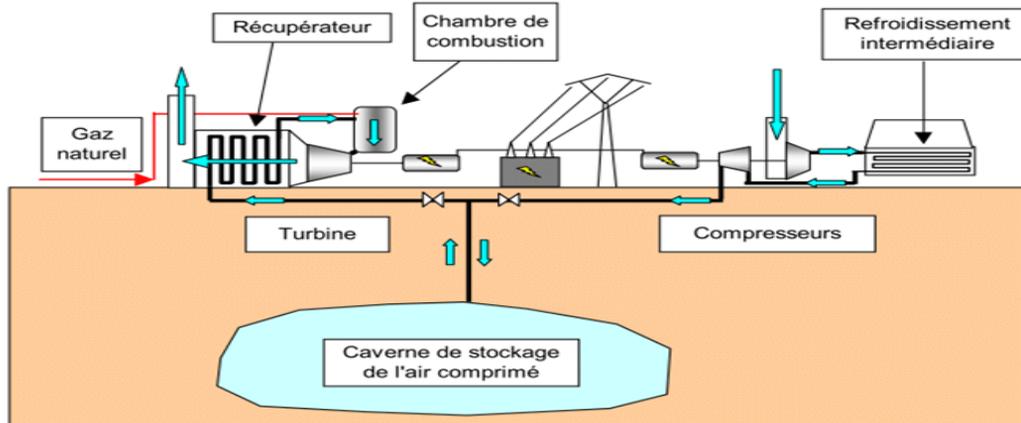


Figure 5.3 Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

	<b>Huntorf</b>	<b>McIntosh</b>
Cavités salines	2 Cavités de 150 000 m <sup>3</sup> chacune, situées entre 650 et 800 m de profondeur	1 Cavité de plus de 500 000 m <sup>3</sup> située entre 450 et 750 m de profondeur
Puissance/durée	290 MW pendant 2 à 3 h	110 MW pendant 26h
Pression dans la cavité	45 à 70 bar	45 à 75 bar

Tableau 5.1 Caractéristiques des deux installations CAES.

Deux installations liées à des cavités salines existent à ce jour : la première à Huntorf en Allemagne, qui fonctionne depuis 1978 (tableau 1), et la seconde à McIntosh en Alabama, depuis 1991.

**5.4 Stockage inertielle**

Longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées

(entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.



Figure 5.4 Stockage inertielle.

### 5.5 Mode de stockage électrochimique et électrostatique

Ce mode de stockage, dont le principe repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries, piles et accumulateurs.

Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Quelques batteries au plomb peuvent répondre à ce besoin, de même que des batteries au sodium ou lithium-ion, mais ce sont surtout les batteries à flux qui font l'objet d'études pour le stockage massif à ce jour.

### 5.5.1 Batteries à flux

Ces batteries permettent le stockage des couples électrochimiques (électrolytes à l'état liquide) à l'extérieur de la batterie. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions dont les deux compartiments sont séparés par une membrane solide.

Les électrolytes peuvent également fonctionner comme liquides caloporteurs, facilitant ainsi la régulation de température, alors que les batteries conventionnelles dépendent d'une conduction passive de la chaleur, conduisant à des températures élevées à l'intérieur des cellules. Plusieurs types de batteries à flux sont ou ont été étudiés mais deux seulement sont actuellement opérationnels.

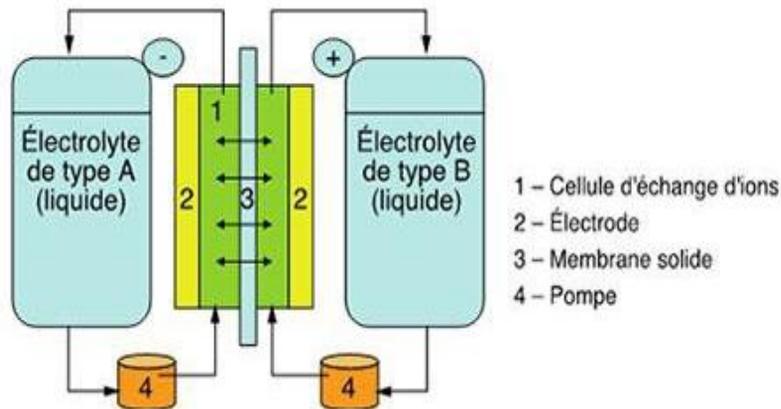


Figure 5.5 Principe d'une batterie à flux.

### 5.5.2 Batteries Zn-Br

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome ( $Zn^{+}/Br^{-}$ ). Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés (par exemple un système de 400 kWh réalisé à partir de modules de base de 50 kWh à Akron, Michigan) et quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.

Cependant, la nature corrosive du brome et la formation de dépôts solides de zinc constituent un frein important à leur mise en œuvre.

### 5.5.3 Batteries Vanadium-Redox Flow (VBR)

Le stockage de l'énergie est assuré par les couples redox (réaction chimique d'oxydo-réduction par échanges d'électrons) de vanadium dans une solution d'acide sulfurique,  $V^{2+}/V^{3+}$  dans l'électrolyte négatif et  $V^{4+}/V^{5+}$  dans l'électrolyte positif.

Un des avantages de cette technologie réside dans l'absence de contamination possible d'un compartiment électrolytique à l'autre puisqu'il s'agit du même composant chimique. Plusieurs installations sont en service à ce jour :

- King Island en Tasmanie, qui fonctionne depuis 2003 avec une batterie de capacité

moyenne de 200kW/4h ou de 400kW/10 s en période de pointe ;

- L'unité de stockage associée à la ferme éolienne de Tomamae Villa au Japon, d'une capacité de 4 MW/90min, en service depuis 2005.

### 5.6 Mode de stockage thermique

Le stockage de chaleur concerne principalement le chauffage (ou la climatisation) des bâtiments, qui représente près de 50 % de la consommation énergétique en Europe.

Les sources de chaleur proviennent en premier lieu du solaire pour lequel le stockage permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives (le jour/l'été) par rapport aux périodes de plus grandes demandes (le soir/l'hiver). Il est également possible de stocker la chaleur produite par certaines industries en corollaire de leur activité principale (centrales à gaz ou d'incinération par exemple).

Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

- par chaleur sensible, c'est-à-dire par changement de la température du matériau - la chaleur est alors emmagasinée dans le matériau -,
- ou par chaleur latente, c'est-à-dire par changement de phase du matériau, généralement changement solide/liquide d'un matériau pour lequel la variation volumique est faible.

Il y a deux facteurs clés pour les matériaux de stockage étudiés :

- L'inertie thermique (sables, bétons, céramiques).
- La capacité à supporter de très hautes températures.

Le stockage sensible de grande capacité concerne surtout le stockage saisonnier en réservoirs soit :

- en réservoirs souterrains dans des aquifères naturels (nommés ATES pour Aquifer Thermal Energy Storage),
- dans des roches ou en souterrain (appelés UTES ou BTES pour Underground ou Borehole Thermal Energy Storage),
- ou encore dans des cuves en surface ou plus ou moins enterrées.

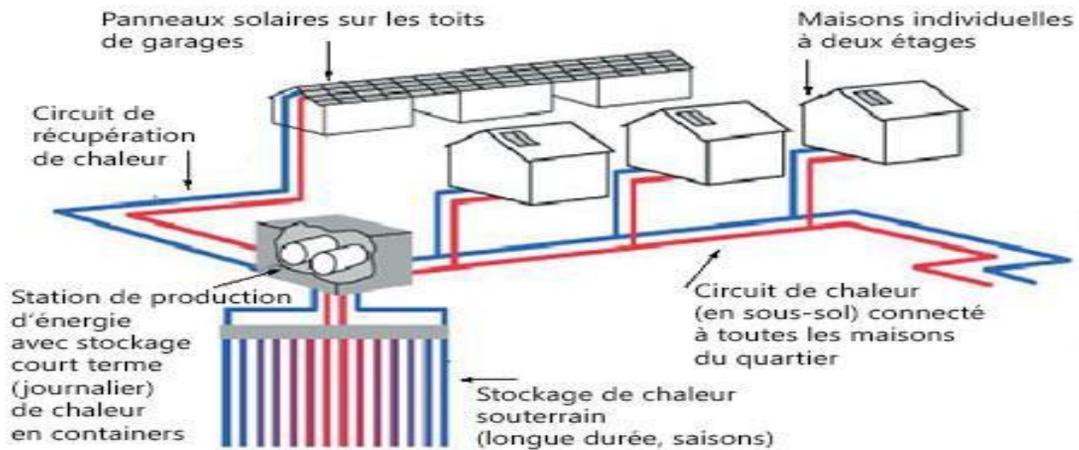


Figure 5.6 Exemple de BTES.

### 5.7 Mode de stockage chimique : l'hydrogène

Au-delà de ses applications comme carburant, l'hydrogène, vecteur énergétique, pourrait constituer une source de chaleur et d'électricité pour les bâtiments ou les lieux difficilement reliés au réseau. En cas de surproduction, l'électricité excédentaire servirait à produire de l'hydrogène qui pourrait être stocké et reconverti en électricité au moment du besoin.

À l'heure actuelle, plusieurs projets portent sur des systèmes de stockage d'hydrogène de grande capacité (réservoirs de stockage tampon ou réservoirs souterrains) entre sources d'énergies intermittentes et réseaux électriques.

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation  $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz existant mais surtout être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz

spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.

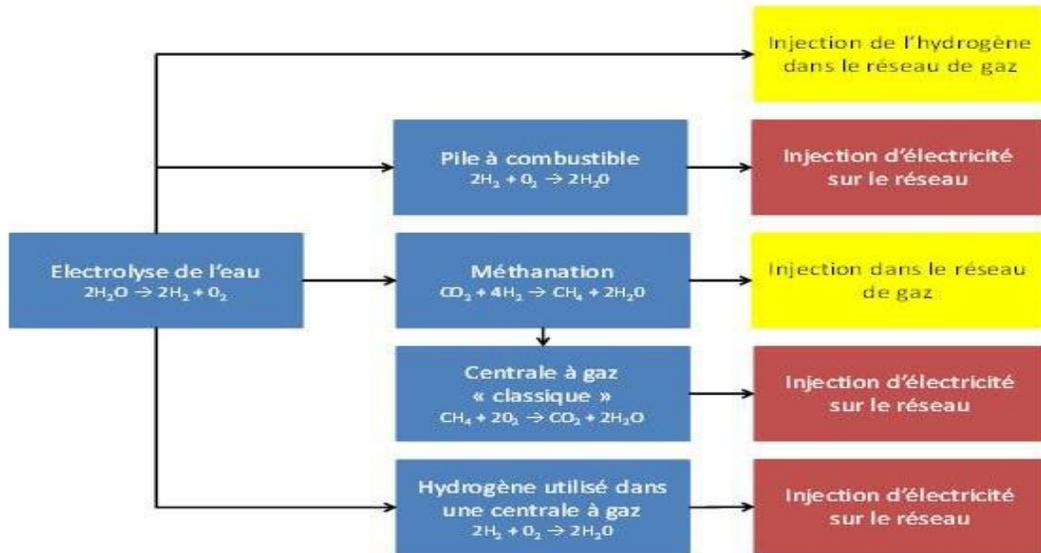


Figure 5.7 Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène.

L'intérêt de ce type de système réside :

- dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;
- dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système.

### 5.8 Mode de stockage électromagnétique

Le principe des supercapacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo - réduction.

L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts.

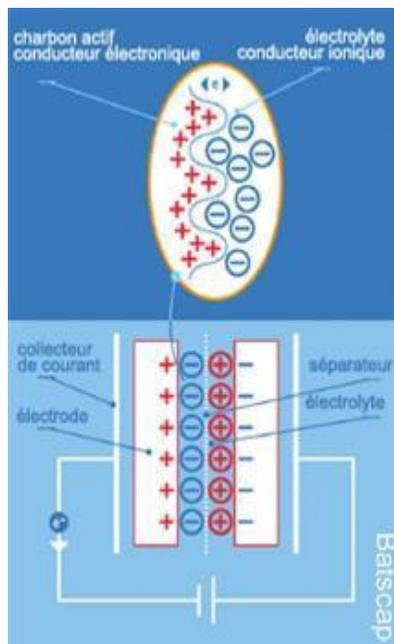


Figure 5.8 Stockage électromagnétique.

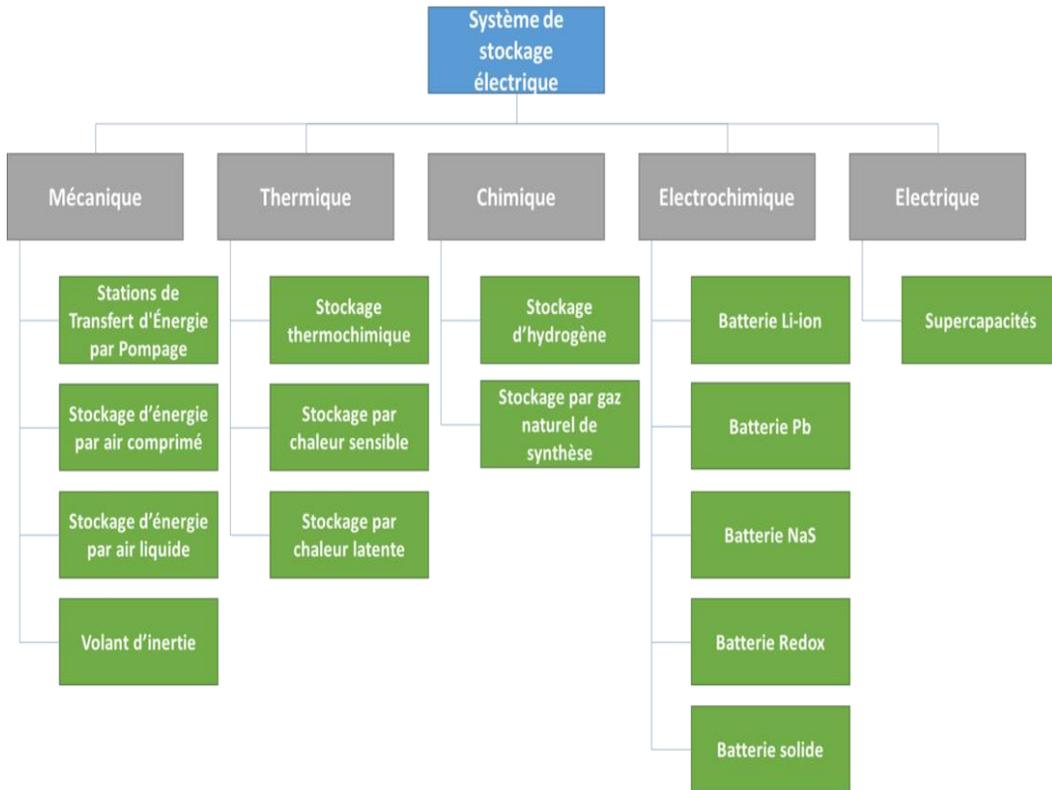


Figure 5.9 Différentes formes de stockage électrique.

					
Aggro-alimentaire et boissons	Dechets et traitement	Bois, papier, carton	Divers (feux...) et services	Elevages	Pétrole et gaz
					
Energie	Entreposage, transports et commerce	Chimie et parachimie	Industries diverses (textiles, verreries...)	Mécanique et traitements de surface	Sidérurgie et métallurgie

# CHAPITRE 6 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION

---

## 6.1 Introduction

Une pollution est un phénomène ou élément perturbateur d'un équilibre établi et plus particulièrement si cet élément est nuisible à la vie. Nous trouvons les pollutions dans les 3 états de la matière :

- Pollution de l'eau (liquide) ;
- Pollution de l'air (gaz) ;
- Pollution des sols (solide).

## 6.2 Pollution de l'eau

### 6.2.1 Les ressources en eau

Les eaux naturelles sont présentes dans la nature sous la forme :

- De lacs ;
- De fleuves ou rivières ;
- De nappes souterraines ;
- De marais ou lagunes ;
- De mers ou océans.

Les eaux naturelles contiennent principalement de faibles quantités d'éléments minéraux et organiques. Les caractéristiques physiques et chimiques seront différentes suivant :

- Leur origine ;
- Et leur transit dans le milieu naturel.

Les sources d'eau brute utilisées pour la production d'eau de consommation sont classées en 3 catégories :

- Les eaux des nappes souterraines (les eaux profondes) ;
- Les eaux superficielles courantes (les eaux de surface) ;
- Les eaux superficielles de retenues.

Entre les différentes sources d'eau et l'atmosphère, l'échange d'eau est permanent et forme ce que l'on appelle le cycle externe de l'eau. Le moteur de ce cycle en est le soleil : grâce à l'énergie thermique qu'il rayonne, il active et maintient constamment les masses d'eau en mouvement.

Ce cycle se divise en 2 parties intimement liées :

- Une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau essentiellement ;
- Une partie terrestre qui concerne l'écoulement de l'eau sur les continents,

## CHAPITRE 6 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION

qu'il soit superficiel ou souterrain.

Les eaux profondes auront des caractéristiques physico-chimiques directement liées aux couches géologiques traversées. Elles sont naturellement de bonne qualité, elles peuvent contenir des éléments minéraux.

Des différences fondamentales existent entre les cours d'eau et les eaux de lacs et de retenues :

<b>Les cours d'eau sont :</b>	<b>Les eaux de lacs et de retenues sont :</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Des milieux ouverts d'eau courante ;</li><li>• Bien aérés et éclairés ;</li><li>• A tous moments renouvelés ;</li><li>• Et comportant peu de production planctonique.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Des milieux fermés ;</li><li>• Mal aérées et mal éclairées ;</li><li>• Renouvelées très difficilement ;</li><li>• Et comportant des productions planctoniques.</li></ul>

### 6.2.2 Les différentes pollutions

Les différentes sources de pollution sont :

- Agricole : les produits en cause sont les nitrates et les pesticides (par infiltration) ;
- Industrielle : les produits en cause sont les produits chimiques et les hydrocarbures (par infiltration et ruissellement) ;
- Urbaine : les produits en cause sont les huiles, carburants et eaux usées (par infiltration et ruissellement) ;
- Accidentelle ; les produits en cause sont les produits chimiques et produits organiques (par infiltration et ruissellement).

Il existe plusieurs familles de pollutions :

- Les pollutions organiques ;
- Les pollutions chimiques ;
- Les pollutions biologiques ;
- Les pollutions radioactives.

### 6.2.2.1 Les pollutions organiques

Les sources de ces pollutions sont :

- Les pesticides ;
- Les fertilisants ;
- Les pétroles, huiles ;
- Les charges organiques des villes (eaux usées, ...) ;
- Les résidus organiques (sang, lait, ...).

Les effets des pollutions organiques sont :

- La diminution de la teneur en  $O_2$  dissous (décomposition de ces composants par les bactéries) ;
- La diminution de la photosynthèse ;
- Le phénomène d'eutrophisation.

### Cas particulier : Les hydrocarbures

A la suite de leur déversement sur un plan d'eau, les hydrocarbures et les produits chimiques sont soumis aux conditions existantes :

- Température de l'eau et de l'air ;
- Vent et courant ;
- Agitation du plan d'eau en surface.

En fonction de ces paramètres, les hydrocarbures se transforment plus au moins rapidement. Les hydrocarbures peuvent réagir différemment, soit :

- Flotter et s'étaler en formant un film plus ou moins épais ;
- S'évaporer, pour les plus volatiles ;
- Quelques rares hydrocarbures, plus lourds que l'eau peuvent couler dès leur déversement.

### 6.2.2.2 Les pollutions chimiques

- Les sources de ces pollutions sont :
- Les métaux lourds (plomb, cadmium, mercure, arsenic) ;
- Les substances Acides/Basiques ;
- Les substances indésirables (les oligo-éléments à concentrations élevés : Fe, Mn, ...).

Les effets des pollutions chimiques sont :

- La variation du pH de l'eau ;
- Des effets toxiques sur la faune et la flore (somme des effets et des

concentrations) ;

- Réactions chimiques avec certains minéraux (favorise la dissolution du  $\text{Ca}^{2+}$  et du  $\text{Mg}^{2+}$ ).

### 6.2.2.3 Les pollutions biologiques

- Les sources de ces pollutions sont :
- Les eaux usées ;
- L'introduction d'espèces invasives ;
- La modification de la température de l'eau.

Les effets des pollutions biologiques sont des effets pathogènes sur :

- La faune ;
- La flore ;
- L'homme.

### 6.2.3 L'utilisation de l'eau

Avec ou sans traitement préalable, l'eau sert aux activités de l'homme dans les domaines :

- Alimentaires ;
- Domestiques ;
- Agricoles ;
- Industriels.

L'homme, pour utiliser cette eau vient interférer dans le cycle de l'eau. Il va chercher l'eau dans les nappes profondes (par le réseau de captage) puis s'en servir et la relâcher dans les eaux de surfaces par les stations d'épuration.

## 6.3 Pollution de l'air

### 6.3.1 Généralités

La pollution de l'air est une atteinte à la pureté de l'air et à l'intégrité du fonctionnement de l'atmosphère. L'atmosphère est un des principaux agents du climat. La pollution atmosphérique correspond à la présence dans l'atmosphère d'un ou plusieurs polluants à des concentrations créant un effet toxique ou écotoxique. Le polluant peut être :

- Altéragène ;
- Biologique ;

## CHAPITRE 6 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION

---

- Physique ou chimique.

Les pollutions de l'air ont différentes origines :

- Anthropiques (industriel, trafic routier, domestique) ;
- Naturelles (volcanisme, émissions naturelles de méthane et d'ozone).

### 6.3.2 Les différents niveaux de pollution

La pollution atmosphérique est étudiée à 3 niveaux différents :

- A l'échelle planétaire ou continentale (macro-échelle) ;
- A l'échelle régionale (mésos-échelle) ;
- A l'échelle locale (sub-mésos-échelle).

#### 6.3.2.1 L'échelle planétaire ou continentale

Les phénomènes découlent de l'action à long terme des émissions de gaz qui causent :

- La diminution de la couche d'ozone ;
- L'effet de serre.

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse ceinturant en couches concentriques la terre. Elle est responsable d'un effet de serre qui réchauffe la surface de la terre. Sans elle, la température moyenne de la terre serait de  $-18^{\circ}\text{C}$ , contre  $15^{\circ}\text{C}$  actuellement, cet effet découle des propriétés des gaz vis-à-vis de la lumière.

C'est dans la troposphère qu'il y a le plus d'effet. L'épaisseur de cette couche varie entre 13 et 16 km à l'équateur, mais entre 7 et 8 km aux pôles. Elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est également la couche où se produisent les phénomènes météorologiques et les circulations atmosphériques.

#### 1) La couche d'ozone

Elle sert d'écran :

- Pour filtrer les rayons du soleil ;
- Pour conserver l'air recouvrant la terre.

Les sources d'altération de la couche d'ozone sont les CFC ou « fréons ».

L'amincissement de la couche d'ozone peut provoquer :

- Des cancers de la peau ;
- Des modifications de la flore et de la faune ;

## CHAPITRE 6 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION

---

- Un changement du régime des vents.

### 2) L'effet de serre

Une partie de l'énergie du soleil traverse l'atmosphère et réchauffe la surface de la terre. La surface de la terre renvoie la chaleur vers l'espace, les gaz à effet de serre retiennent une partie de la chaleur.

Les gaz à effet de serre sont :

- H<sub>2</sub>O ;
- CO<sub>2</sub> ;
- CH<sub>4</sub> ;
- CFC ;
- HFC ;
- N<sub>2</sub>O.

L'augmentation des gaz à effet de serre provoque une élévation de la température moyenne de la Terre. Ce qui a pour conséquence à long terme :

- Augmentation du volume d'eau de mer ;
- Augmentation de la pluviométrie ;
- Modification des courants marins ;
- Risque de changement climatique.

### 6.3.2.2 L'échelle régionale

Les phénomènes découlent de la dispersion et de la réactivité chimique des polluants dans l'atmosphère qui causent des pollutions acides et physico-chimiques (les pluies acides). Les pluies acides sont toutes les formes de précipitations acides qui dégradent les écosystèmes (pluie, neige, brumes et brouillards, grêle, smogs et aérosols). Les pluies normales ont un pH de 5,6. On parle de pluies acides quand le pH est inférieur à 5,6.

Ces pluies résultent de la dispersion de polluants comme :

- SO<sub>2</sub> ;
- NO<sub>x</sub> ;
- CO<sub>2</sub> ;
- Combustion du PVC.

Ces pluies viennent s'intercaler dans le cycle de l'eau. Par les phénomènes de circulation atmosphérique, lors de précipitations, cette pollution va ruisseler et s'infiltrer dans le sol. Ce qui a pour conséquence :

## CHAPITRE 6 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUTION

---

- Une modification de la résistance de la flore (feuilles endommagées, moins nutritifs, ...);
- Une modification de la chaîne alimentaire (base de la chaîne manquante);
- Accélération de l'érosion de nombreux matériaux (calcaires, marbres, plomb, ...);
- Atteinte à la santé de l'homme (problème respiratoire, cancer, ...).

### 6.3.2.3 L'échelle locale

Les effets se font se sentir à proximité des sources pendant quelques heures ou quelques jours, ce sont notamment les pollutions urbaines ou ponctuelles.

## 6.4 Pollution des sols

### 6.4.1 Généralités

Le sol est l'interface entre la terre, l'air et l'eau. Il remplit une multiplicité de fonctions complexes, c'est :

- Un réservoir d'éléments nutritifs ;
- Une éponge et un filtre (cycle de l'eau) ;
- Un régulateur des grands cycles naturels (eau, carbone, azote, soufre, ...).

La formation d'un sol résulte de l'altération d'une roche superficielle sous l'influence :

- Du climat (provoque une érosion) ;
- De la végétation et d'organismes vivants (formation d'humus).

### 6.4.2 La phase liquide du sol

On distingue une zone non saturée (les grains sont entourés d'eau mais aussi d'air) et une zone saturée (les grains baignent totalement dans l'eau). L'eau qui se trouve dans la zone saturée constitue la nappe.

En fonction des saisons, le niveau de la nappe s'élève (situation des hautes eaux) ou s'abaisse (situation des basses eaux) : c'est le battement de la nappe.

### 6.4.3 La phase gazeuse du sol

Les gaz présents naturellement dans le sol sont principalement :

- L'air ;
- Le CO<sub>2</sub> ;

- La vapeur d'eau.

Ils proviennent de l'atmosphère ou de l'eau infiltrée dans le sol. On trouve aussi sous forme de traces du méthane, des hydrocarbures et des composés soufrés issus de la fermentation des végétaux morts, mais également du radon et du mercure selon la nature de la roche en place.

### 6.4.4 Le rôle du sol dans le cycle de l'eau

Sous l'effet du battement de la nappe et de l'augmentation de température, la phase gazeuse du sol s'élève : c'est l'évaporation. De plus, le relief favorise le ruissellement et donc la répartition des pluies et l'évacuation des excédents d'eau. Et enfin, les nappes retiennent, épurent et libèrent de l'eau (infiltration, évaporation, source). Le sol est donc un élément actif du cycle de l'eau.

### 6.4.5 Le rôle du sol dans le cycle de la matière organique

Les terrains superficiels sont des supports pour la végétation et fournissent les minéraux et l'eau nécessaires au développement des végétaux.

### 6.4.6 Classification des types de pollution

Les types de pollution sont classés :

- En fonction de leur durée : pollutions accidentelles et pollutions chroniques ;
- En fonction de leur étendue : pollutions locales ou pollutions diffuses.

### 6.4.7 Propagation de la pollution

La propagation de la pollution sera différente selon que les sols sont composés de:

- Graviers à particules grossières centimétriques ;
- Sables à particules fines millimétriques ;
- Sables limoneux à particules très fines micrométriques.

L'écoulement de la nappe à travers un sol limoneux diffusera la pollution plus lentement que dans un sol grossier. Selon les polluants :

- Si la pollution est miscible, elle se propage dans la totalité de la nappe (c'est le cas notamment des eaux contenant des métaux) ;
- Si la pollution est due à des hydrocarbures, elle peut flotter à la surface de la nappe (sa propagation à travers les sols dépendra alors du niveau de la nappe).

### 6.4.8 Conséquences des pollutions des sols

Une pollution des sols aura pour conséquences :

- Une modification de la flore ;
- Une modification de la chaîne alimentaire ;
- Une pollution rentrant dans le cycle de l'eau (atteinte à l'homme et à l'écosystème) ;
- Superficie des terres utilisables en décroissances.

## REFERENCES

---

### Sites Internet

- [https://www.connaissance des énergies.org](https://www.connaissance-des-energies.org), fiche pédagogique, énergie.
- [http://www, Physique.pdf](http://www.Physique.pdf), par Claude Gabriel
- <https://energypedia.pdf>.
- <https://www.futura-sciences>, 2012.
- <http://www.poitou-magazine.com>.
- <http://www.sciences.univ-nantes.fr>, par Claude Saint Blanquet.
- <http://www.futura-sciences.com>.
- <http://www.cea.fr>, Médiathèque - Les diverses sources d'énergie – CEA, 2021.
- <https://livre.fnac.com>, Vive les énergies fossiles , par Samuele Furfari, 2014.
- <https://www.techniques-ingenieur.fr>, base documentaire, énergie, économie et environnement.
- <https://www.energy.gov.dz>, énergies nouvelles renouvelables et maîtrise de l'énergie.
- <https://www.cder.dz>.
- <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/seconde/mecanique/sources-energie.html>.
- <https://sites.google.com/site/stsecondaire/5e-secondaire/energie-transformations>
- <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10110/10110-conversion-denergie-et-efficacite-energetique-ensps.pdf>.
- <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-un-barrage>.
- <https://blog.olawatt.com/guides-dossiers/lenergie-verte/energie-renouvelable-definition-difference-energies-non-renouvelables>.
- [http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours\\_photovoltaique.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours_photovoltaique.php).
- <https://quelfutur.org/Classification-des-energies>.
- <http://www.energies-renouvelables.org>.
- <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>.
- <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.dunod.com%2Fsciences-techniques%2Felectrotechnique-energies-renouvelables-et-cogeneration&psig=AOvVaw2M0Kwy0ZZdR60t7NpdeX0r&ust=1647515060988000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjhxqFwoTCIjFIKi-yvYCFQAAAAAdAAAAABAU>.

## REFERENCES

---

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fportail.cder.dz%2F&psig=AOvVaw1LBDvefTWO0hRx6U\\_ojw2p&ust=1647516322649000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwi45dPawsr2AhXw2eAKHTCDAIQr4kDegQIARBY](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fportail.cder.dz%2F&psig=AOvVaw1LBDvefTWO0hRx6U_ojw2p&ust=1647516322649000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwi45dPawsr2AhXw2eAKHTCDAIQr4kDegQIARBY).

<https://i0.wp.com/www.algeriemarket.com/wp-content/uploads/2021/01/Le-stockage-de-lenergie-c2-bis.jpg?fit=318%2C499&ssl=1>.

### **Livres**

- 1-Vive les énergies fossiles ! La contre-révolution énergétique : par Samuele Furfari.
- 2-Les énergies fossiles : par Ian Graham.
- 3-Trop de pétrole, énergie fossile et réchauffement climatique : par Henri Prévot.
- 4-L'énergie: ressources, technologies et environnement : par Christian Ngô, 2008.
- 5-Quelle Terre ? Dialogue sur l'environnement et la transition énergétique, Collection Bulles De Sciences : par JEAN-LOUIS BOBIN.
- 6-Energie de demain Techniques Environnement Économie Sous la direction de J.L. BOBIN – E. HUFFER – H. NIFENECKER Groupe Énergie de la Société Française de Physique GRENOBLE Sciences-Rencontres Scientifiques.
- 7-Collection que sais-je les énergies renouvelables : par Jacques Vernier 2014.
- 8-Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération, Jenkins et coll., Dunod 2008 Pinard.
- 9-Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, Dunod, 2009.
- 10-Crastan, Centrales électriques et production alternative d'électricité, Lavoisier, 2009
- 11-Energie solaire photovoltaïque, par Labour et Villos, 4e ed, Dunod, 2009.
- 12-Le vivant et l'énergie : la grande histoire de l'énergie sur Terre, Paul Mathis, dans les énergies (2011).
- 13-Nucléaire : les vérités cachées Face à l'illusion des énergies renouvelables, par Fabien Bouglé Paru le 6 octobre 2021.