

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Ghardaia



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique et d'Electromécanique

Cours

ENERGIES ET ENVIRONNEMENT

Spécialité:
2^{ème} Licence_ Automatique et Systèmes
2^{ème} Licence_ Maintenance industrielle

Par:

Dr. Fatma BOUCHELGA
Maitre de conférences classe B

Année universitaire 2020-2021

I. Avant- propos

Ce cours d'énergie et environnement est destiné aux étudiants en 2^{ème} année Licence, spécialité Automatique et Maintenance. Le cours suivant présente la relation énergie-environnement et ses conséquences sur l'environnement et la santé humaine.

Le premier chapitre présente une analyse des diverses sources d'énergie renouvelable et non renouvelable.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types de stockage des énergies et leur principe de fonctionnement.

Le troisième chapitre traitera les taux de consommations, les réserves et les évolutions des ressources d'énergie au niveau mondiale.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter les différents types de pollutions ; pollution de l'espace, de l'air, de l'eau, du sol due à la production et la conversion de l'énergie.

La détection et le traitement des polluants et des déchets seront présentés dans le cinquième chapitre de ce cours.

Enfin, le dernier chapitre de ce cours traitera l'impact des pollutions sur la santé et l'environnement.

II. Visée d'apprentissage

Les compétences visées par la première partie de ce cours "Énergie" sont les suivants:

- Acquérir les connaissances de base sur la production d'énergie électrique à partir des énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, biomasse etc.), et non renouvelables (Énergies fossiles et fissile)
- Comprendre les problématiques énergétiques et appréhender les notions essentielles relatives aux différentes sources d'énergies renouvelables et non renouvelables.
- Pour chacune des technologies, étude du fonctionnement d'une installation, connaître sa mise en œuvre, prendre en compte l'impact environnemental de l'installation.
- Enfin, choisir entre les différentes sources des énergies renouvelables.

Les compétences visées par la deuxième partie de ce cours "environnement" sont comme suit:

- Traitement des différentes sources de pollution et leur impact environnemental.
- Connaître les liens entre la production d'énergie et la pollution de l'eau, sol et

atmosphère.

-Initier les étudiants à une approche scientifiquement rigoureuse et critique des problèmes de pollution et de la remédiation de l'environnement.

III. Prés requis

- Notions d'énergie et d'environnement
- Connaissances de base en électricité

TABLE DES MATIERES

Table des matières	iii
Introduction générale	1
Chapitre I. Différentes ressources d'énergie	
I. 1. Introduction	4
I. 2. Sources d'énergies renouvelables	5
I. 2. 1. Energie éolienne	5
I. 2.2. Energie solaire	8
I. 2.3. Energie hydraulique	14
I. 2.4. Energie géothermique	15
I. 2.5. Energie biomasse	17
I. 3. Sources d'énergies non renouvelables	19
I. 3.1. Energie nucléaire	19
I. 3.2. Energies fossiles	22
I. 4. Conclusion	24
Chapitre II. Stockage de l'énergie	
II. 1. Introduction	26
II. 2. Intérêt du stockage de l'énergie	26
II. 3. Les différentes technologies de stockage de l'énergie	27
II. 3. 1. Techniques de choix des technologies de stockage	27
II. 3. 2. Stockage mécanique	28
II. 3. 3. Stockage électrochimique	31
II. 3. 4. Stockage électromagnétique	33
II. 3. 5. Stockage thermique (chaleur et froid)	34
II. 4. Conclusion	34
Chapitre III. Consommation, réserves et évolutions des ressources d'énergie	
III. 1. Consommations des ressources d'énergie	36
III. 1. 1. Consommation d'énergie par grande zone géographique	37
III. 1. 2. Chiffres clés du pétrole et du gaz naturel en 2019	38
III. 2. Réserve des ressources énergétiques mondiales	39
III. 2. 1. Pétrole	40
III. 2. 2. Gaz naturel	41
III. 2. 3. Charbon	42
III. 2. 4. Énergie nucléaire	43
III. 3. Energies renouvelables en Algérie	44
III. 3. 1. Potentiel Solaire	44
III. 3. 2. Potentiel Eolien	44
III. 3. 3. Potentiel Géothermique	45
III. 3. 4. Potentiel Hydraulique	45
III. 3. Conclusion	45
Chapitre IV. Les différents types de pollutions	
IV. 1. Introduction	47
IV. 2. Différentes formes de pollution	48
IV. 2. 1. Pollution du sol	48
IV. 2. 2. Pollution de l'eau	49

IV. 2. 3. Pollution atmosphérique	50
IV. 3. Pollutions liées à la production et à l'utilisation d'énergie	51
IV. 4. Conclusion	53
Chapitre V. Détection et traitement des déchets polluants	
V. 1. Introduction	55
V. 2. Différents types de déchets	55
V. 2. 1. Déchets inertes (DI)	56
V. 2. 2. Déchets industriels banals (DIB)	56
V. 2. 3. Déchets dangereux	56
V. 3. Traitement des déchets	57
V. 3. 1. Valorisation	57
V. 3. 2. Stockage	59
V. 4. Conclusion	59
Chapitre VI. Impact de la pollution sur la santé et l'environnement	
VI. 1. Introduction	61
VI. 2. Principaux risques actuels pour l'environnement et la santé des populations	61
VI. 2. 1. Effet sur l'atmosphère	62
VI. 2. 2. Effet sur le sol et sur les milieux aquatiques	63
VI. 2. 3. Effet sur la santé humaine	64
VI. 3. Les 10 sites les plus pollués au monde	64
VI. 4. Lutte contre la pollution	65
VI. 5. Conclusion	66
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	69

La présence de l'énergie est très importante dans la qualité de vie, elle joue un rôle primordial dans divers secteurs, elle permet la production de biens et de services. L'énergie est la base du développement, de la mobilité et de la communication. Le secteur de l'énergie est une industrie qui dégage un chiffre d'affaires élevé ; toutes les économies dépendent des combustibles fossiles. C'est pour cela que les états producteurs de pétrole ont une influence significative sur la situation financière et la politique mondiale.

Les jours demande dans une large mesure d'un approvisionnement énergétique qui fonctionne. Cependant, la thématique de l'énergie soulève aussi de gros problèmes. Les agents énergétiques conventionnels comme le charbon et le pétrole ne sont pas adaptés à l'avenir. Les combustibles fossiles couvrent environ de 80 % des besoins énergétiques mondiaux mais ils sont de quantité limitée. De plus, l'extraction et la transformation des combustibles fossiles ont pour effet de graves atteintes à l'environnement; en outre, les gisements dont l'exploitation est de plus en plus complexe requièrent des quantités d'énergie considérables. Les combustibles fossiles sont en outre responsables pour une part importante des émissions de CO₂ dans l'atmosphère et donc de l'effet de serre et des changements climatiques. Les changements environnementaux graves comme la multiplication des inondations et des tempêtes tropicales, la hausse du niveau des mers, les sécheresses, etc. sont des conséquences qui, parfois, rendent des régions entières inhospitalières. Ce qui a permis aux chercheurs de penser à d'autres solutions, parmi celles-ci, ils ont choisi d'exploiter des énergies nucléaire et renouvelables. Il existe plusieurs sources primaires de celles-ci dans la nature au-dessus de nos têtes et sous nos pieds, elles peuvent durer longtemps si on respecte bien la nature.

Le stockage des énergies est un point faible dans la filière énergétique, ce problème fait aujourd'hui l'objet de nombreux travaux scientifiques afin de réaliser un équilibre entre l'offre et la demande de l'électricité et pour proposer des solutions de stockage plus performantes. Le développement de l'humanité durant les 50 dernières années s'est accéléré d'une manière exponentielle, entraînant une augmentation importante de la consommation d'énergie dans le monde, particulièrement dans les pays industrialisés. Les ressources en matière première ne cessent de diminuer, tandis que la demande en énergie ne cesse d'augmenter. A ce rythme, les ressources de la terre s'épuiseront, ce qui posera un réel

problème aux générations futures. Le développement technologique doit nécessairement tenir compte des ressources et réserves mondiales et s'y adapter.

Le présent polycopié a pour but d'aborder et de bien maîtriser la notion d'énergie et d'analyser le lien entre l'économie, l'environnement et la société dans un contexte globale.



I. 1. Introduction

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. Un réseau est généralement constitué par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées.

La production doit en tout instant être capable de satisfaire la demande (consommation+ pertes), elle doit donc prévoir des moyens de production pour couvrir l'extrême pointe de la demande, même si cette dernière n'existe que quelques minutes par an.

L'électricité peut être produite en déplaçant un fil conducteur tel que le cuivre dans un champ magnétique. Une génératrice électrique est une machine qui contient des fils logés à l'intérieur d'un aimant. Quand le générateur tourne, les fils se déplacent à l'intérieur du champ magnétique et produisent le courant électrique. Pour produire les grandes quantités de l'électricité dont nous avons besoin pour notre industrie, et nos maisons, nous avons besoin d'usines de pouvoir étendu pour tourner le générateur. La plupart des sites de production d'électricité commencent par le processus de tournage de l'arbre du générateur électrique avec la chaleur. Les usines de production brûlent le pétrole, le charbon ou le gaz naturel pour obtenir la chaleur. Les centrales nucléaires utilisent la fission de l'uranium pour obtenir la chaleur. Dans tous les cas, la chaleur est utilisée pour bouillir l'eau à la vapeur. La vapeur est ensuite utilisée pour faire tourner l'arbre des turbines (un axe avec les lames incurvées) lequel est fixé au générateur. Les lames de l'arbre des turbines, en rotation, tournent le générateur, qui produit le courant électrique. Ce courant est alors prêt pour être transmis aux maisons, aux usines et ailleurs par l'intermédiaire des lignes de transmission et des postes de distribution de du service public d'électricité [1].

On distingue deux sources d'énergies :



Figure I. 1. Types de sources d'énergie

I. 2. Sources d'énergie renouvelable

Ce sont les sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles soient considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. Cette forme d'énergie n'utilise que des éléments naturels sur la terre, sans la détruire ni les épuiser. Ce sont essentiellement celles qui sont issues du rayonnement solaire soit directement soit indirectement par le déplacement ou le mouvement des fluides, air ou eau, sous l'influence d'inhomogénéités de température. De même sont considérées comme renouvelables l'énergie qui a pour origine la chaleur de la Terre (géothermie) et celle qui provient des marées (usines marémotrices) sous l'influence de l'attraction lunaire (et solaire). Enfin entrent dans cette catégorie les combustibles provenant de la matière organique vivante, la biomasse, (bois des forêts, agrocarburants, biogaz) dont la croissance est activée par la lumière et la chaleur du soleil.

I. 2. 1. Energie éolienne

Ce type d'énergie est une source qui dépend du vent. La force éolienne est exploitée depuis des milliers d'années à travers des moulins à vent. Cette énergie peut être exploitée au moyen d'une hélice, cette dernière est entraînée en rotation par la force du vent, puis elle permet la production de l'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté.

Les moulins, désormais appelés éoliennes, sont tous systématiquement composés de quatre éléments :

- 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)

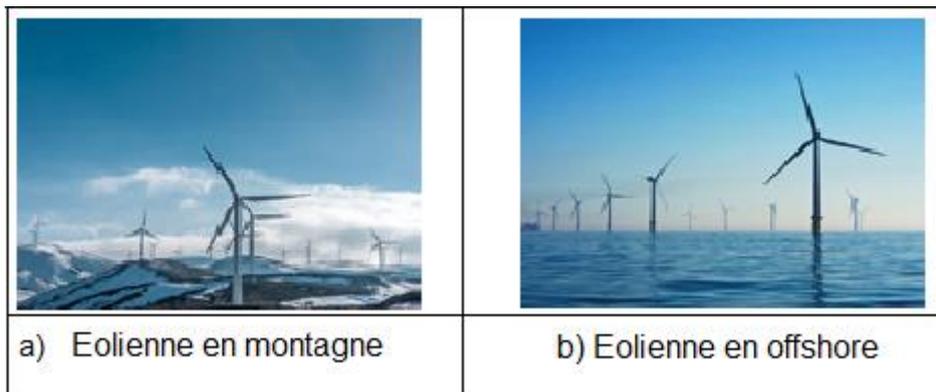


Figure I. 2. Installation d'Eoliennes

Les éoliennes fonctionnent sur le même principe que les moulins. Le vent fait tourner les ailes (ou pales) placées au sommet d'un mât. Ce mouvement entraîne la rotation du rotor, celui-ci transmet l'énergie mécanique de la rotation à un alternateur, qui transforme cette énergie en énergie électrique. Les éoliennes sont généralement placées dans des zones dégagées et venteuses. On appelle « parc éolien » ou « ferme éolienne » un site regroupant plusieurs éoliennes. L'une des types d'éoliennes est l'éolienne offshore ou éolienne en mer, celle-ci est installée au large des côtes. Ces zones sans montagnes bénéficient de beaucoup de vent; elles sont aussi éloignées des habitations, ce qui évite les désagréments du bruit pour les gens. Ces éoliennes sont soit fixées sur les fonds marins, soit flottantes [2-3].

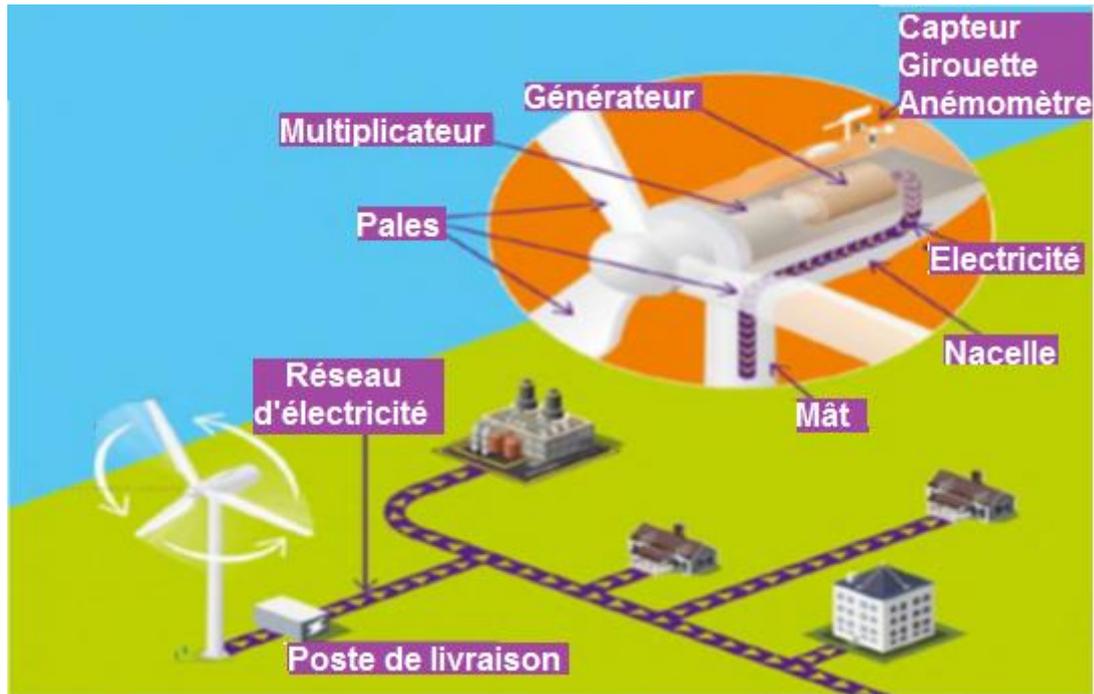


Figure I. 3. Fonctionnement d'une éolienne

I. 2. 1. 1. Caractéristiques des éoliennes

- Le nombre de pales varie d'une seule à une dizaine environ, la plupart des modèles actuels, possèdent ainsi deux ou trois pales. Il en existe même à une seule pale, équilibrée par un contrepoids, tournant autour d'un rotor à axe horizontal.
- Plus le nombre des pales est élevé, plus l'hélice tourne lentement (mais avec une plus grande force).
- Pour produire de l'électricité, c'est la vitesse de rotation qui compte.
- Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être de différente nature à savoir, en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal.
- Le diamètre qu'elles balaient varie de 40 m à 120 m. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur.
- Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

I. 2. 1. 2. Avantage de l'énergie éolienne [2- 3]

- Ce type d'énergie ne nécessite pas de carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement

climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Coût de production relativement faible (200.000 euros environ) par rapport à l'énergie produite.

I. 2. 1. 3. Inconvénient de l'énergie éolienne [2, 3]

- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme).

II.2. 2. Energie solaire

Le Soleil est indispensable à la vie sur Terre, c'est une source d'énergie impressionnante, et sa disparition entraînerait la suppression de toute possibilité de vie sur la Terre. Cependant cette étoile ne disparaîtra pas avant environ 4 milliards d'années. Malheureusement l'énergie qu'il nous envoie n'est pas suffisamment exploitée, en effet il émet 10 000 fois plus d'énergie que nous n'en utilisons.

Dans cette partie nous ferons la distinction entre deux types d'utilisation de l'énergie solaire. Nous étudierons d'abord l'énergie solaire photovoltaïque, en particulier comment les rayons solaires se transforment en électricité. Nous analyserons par la suite l'énergie solaire thermique et comment l'eau sanitaire peut être chauffée [4].

I. 2. 2. 1. Exploitation photovoltaïque de l'énergie [4, 5]

Certains matériaux semi-conducteurs comme le silicium possèdent la propriété de générer de l'électricité quand ils reçoivent la lumière du soleil : c'est l'effet photovoltaïque.

- Elle utilise pour ce faire des modules ou panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.
- Un panneau solaire est composé de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles en série ou en parallèle. Plus la puissance des cellules est grande et plus leur nombre est élevé, plus les panneaux produisent.
- La cellule photovoltaïque : C'est un dispositif permettant la transformation des photons (particules élémentaires contenues dans les rayons lumineux du Soleil) de la lumière en électricité. C'est l'élément de base du système photovoltaïque. Un regroupement de cellules photovoltaïques est un capteur (délivrant une tension électrique continue de 12V) et finalement l'ensemble des capteurs forment le panneau solaire.
- La couche antireflet : comme son nom l'indique permet de réduire au maximum le rayon réfléchi et donc la perte des photons.
- La couche de silicium type-N ou semi-conducteur de type N est composée de silicium dopé par un élément contenant plus d'électrons, elle a donc un excès d'électrons.
- La couche de silicium de type-P ou semi-conducteur de type P est composée de silicium dopé par un élément contenant moins d'électrons, elle a donc un défaut d'électrons.
- Le métal conducteur sur la face "Nord" joue le rôle de l'anode.
- La grille conductrice joue le rôle de la cathode.

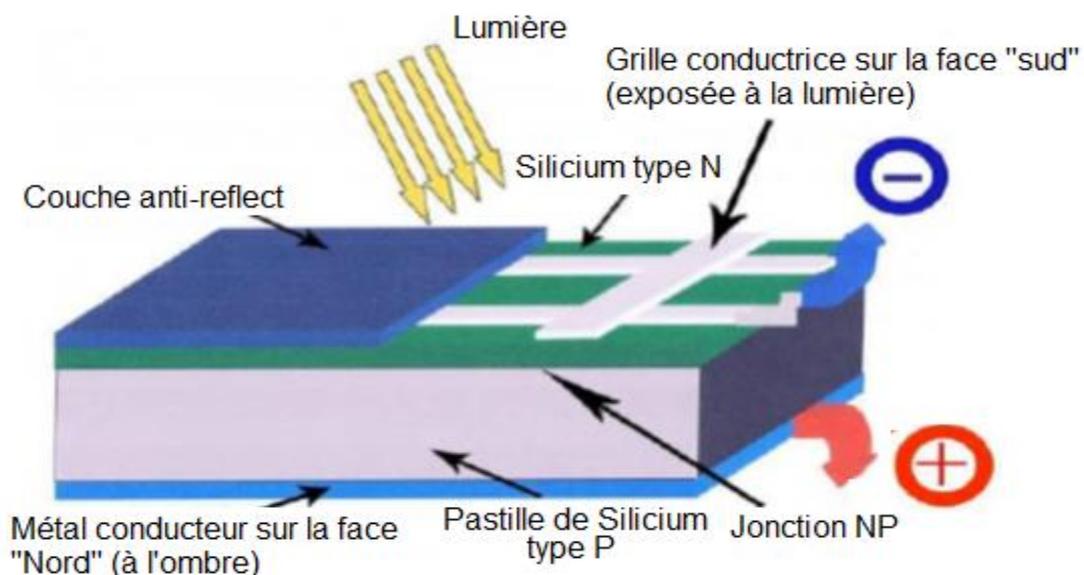


Figure I. 4. Exemple de cellule photovoltaïque

- **Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Le contact entre les deux couches de silicium met en place une jonction PN qui permet le transfert des électrons d'une couche vers l'autre. Lorsque les photons de la lumière arrivent sur la cellule photovoltaïque, un apport d'énergie se crée et arrache un électron de la couche N qui va dans la couche P. Ce transfert modifie les charges au sein de la cellule, une différence de tension se crée, ce qui entraîne la formation de courant électrique.

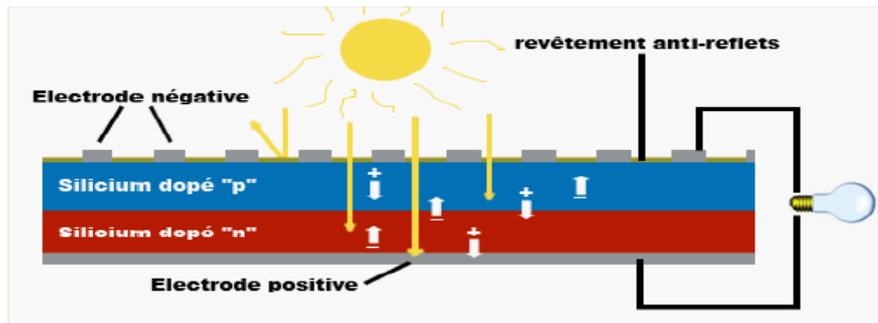


Figure I. 5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

- **Principales technologies solaires**

- *Les technologies cristallines* : Les cellules au silicium cristallin représentent environ 85% du marché mondial actuel. Elles utilisent des cellules peu épaisses (0,15 à 0,2 mm), connectées en série et encapsulées sous un verre protecteur.

D'une durée de vie d'au moins 25 ans, on distingue deux types :

- ▶ Les modules « silicium multicristallin », les plus courants, d'un rendement de conversion d'environ 13 à 15 %,
- ▶ Les modules « silicium monocristallin », plus chers que les premiers, d'un rendement de conversion plus élevé, de 18 %.

- *Les technologies « couches minces »* :

Dans ce cas, une couche très mince (de quelques millièmes de mm) d'un ou plusieurs matériaux est déposée sur un support (verre, acier inoxydable, matière plastique...).

Les modules de type « silicium amorphe » relèvent de cette technologie. Leur rendement de conversion se situe entre 6 et 9 %. D'autres technologies (tellurure de cadmium [CdTe], diséléniure de cuivre et d'indium [CIS ou CIGS] par exemple) sont aussi disponibles sur le marché [2, 4, 5].

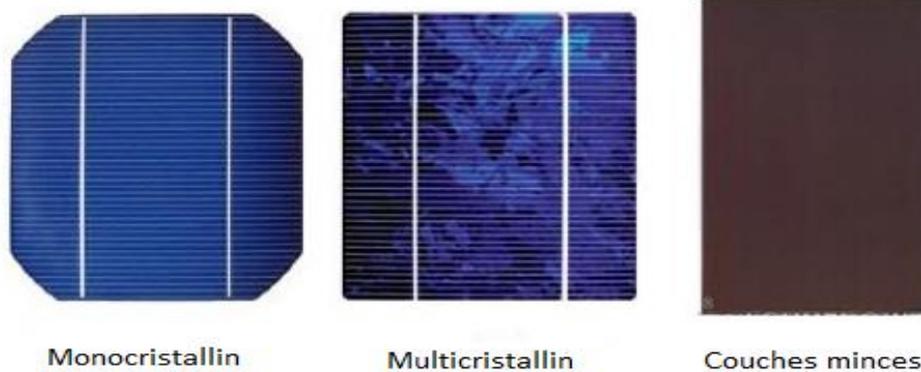


Figure I. 6. Les différentes cellules

- **Complément :** La tension obtenue continu ou alternatif ?

Les cellules solaires et les modules photovoltaïques produisent de l'électricité en courant continu comme les batteries, et n'est pas en courant alternatif 220 V à la fréquence de 50 Hz. Pour alimenter des appareils en courant alternatif ou pour se connecter au secteur et y injecter l'électricité produite à partir de l'énergie photovoltaïque, on a donc besoin de convertisseurs DC/AC (onduleurs) qui produisent un courant alternatif à partir du continu.

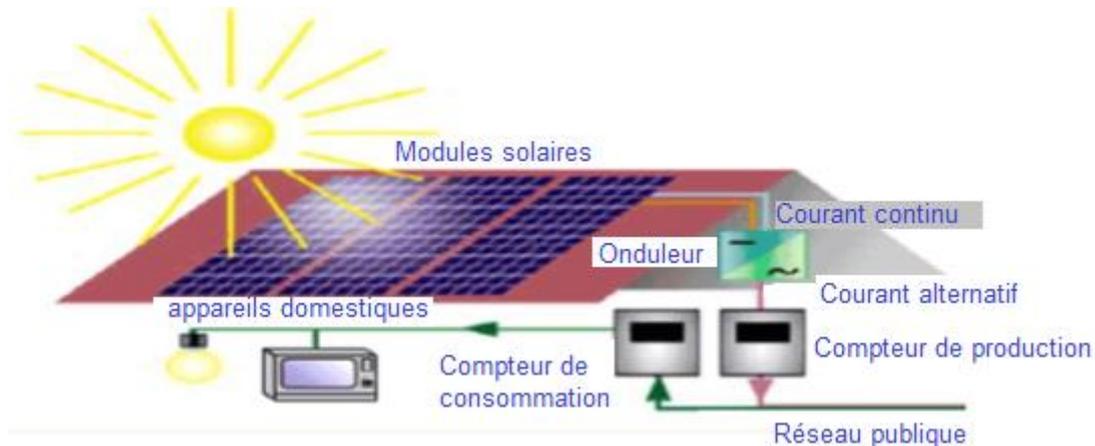


Figure I. 7. Modules photovoltaïques

- Le régulateur solaire permet de contrôler la charge et décharge de la batterie pour éviter tout endommagement de celle-ci du a une surcharge ou décharge trop importante.
- La batterie permet de stocker l'électricité pour permettre aux usagers d'être fournis toute la journée en électricité qu'il y ait du soleil ou pas.
- L'onduleur est un convertisseur de type continu au type alternatif, c'est donc le lien entre le courant électrique stocké et les usages quotidiens.
- Les fusibles permettent d'interrompre le courant en cas de défaut dans le circuit.

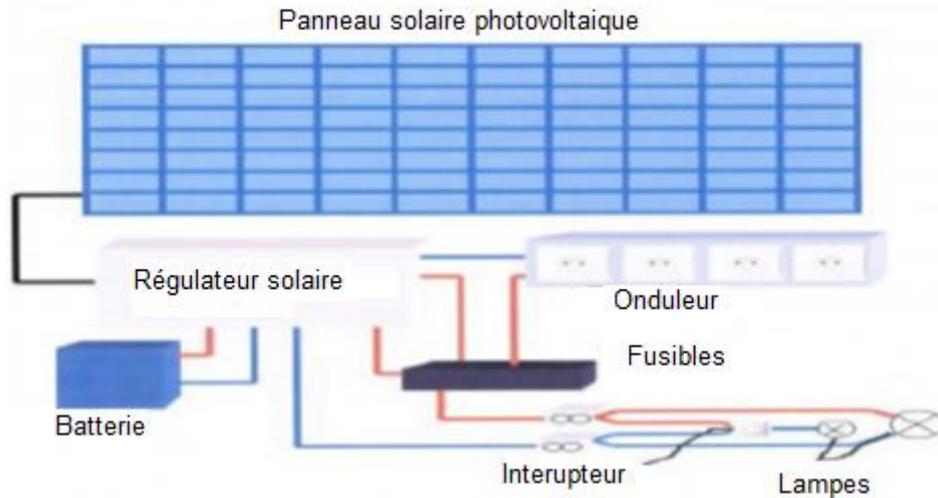


Figure I. 8. Le trajet de l'électricité

➤ **Combien produit un module ?**

- En extérieur (sous exposition solaire), la production électrique d'un panneau solaire dépend:
- De ses dimensions,
- De sa technologie,
- Du rayonnement reçu,
- Et de la durée d'exposition.

I. 2. 2.2. Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique, fonctionne différemment, en produisant de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge du soleil afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide [4, 5].

- La technologie est assez simple, par rapport au photovoltaïque, donc moins onéreuse.
- Il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbant de la chaleur, des plaques métalliques peintes en noir par exemple.
- Cela permet de réaliser des chauffe-eau solaires individuels ou collectifs.

- **Principe de fonctionnement [4]**

Les rayons du Soleil arrivent sur les capteurs solaires, des coffres rigides et thermiquement isolés. En effet une plaque de verre piège les rayons, ce qui permet donc une augmentation de la température à l'intérieur et entraîne un réchauffement de

tubes absorbeurs en cuivre, contenant le fluide dit caloporteur (qui porte la chaleur) composé d'eau et de divers additifs dont de l'antigel. Tout d'abord les rayons ne traversent pas entièrement le verre, il en absorbe une partie (1) puis une autre est réfléchi (2). L'absorbeur capte la majorité des rayons(3) mais il y a quand même une réflexion(4) et de nouveau le verre absorbe une faible partie des rayons(5), puis une autre est libérée en re-traversant le verre(6).

Finalement le reste des rayons lumineux est re-réfléchi et totalement absorbé par les tuyaux(7).

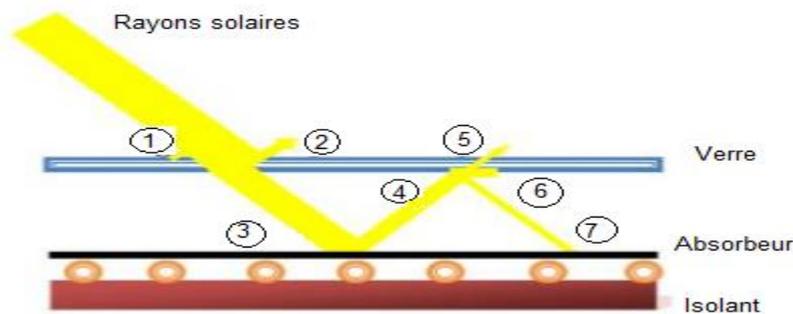


Figure I. 9. Capteurs solaires

I. 2. 2.4. Avantages de l'énergie solaire

- Ce type d'énergie est non polluant et inépuisable.
- L'énergie solaire thermique produit un rendement élevé et d'après le retour sur l'investissement, elle permet également de produire 50% de l'énergie de chauffage utile à une habitation, elle permet aussi d'avoir de l'eau chaude gratuitement.
- Les frais de fonctionnement et de maintenance d'une installation thermique sont relativement faibles.
- Elle est idéale pour les sites isolés qui ne sont pas reliés à un réseau électrique.

I. 2. 2. 5. Inconvénients de l'énergie solaire

- Non seulement c'est une énergie très coûteuse mais le retour sur investissement est plutôt long (environ 10 ans) et la durée de vie des panneaux est limitée (20 à 25 ans).
- Non seulement le rendement est assez faible mais la quantité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dépend du climat et de la situation géographique.
- Les capteurs solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome .
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes .

-L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

I. 2. 3. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

La production annuelle d'hydroélectricité s'élève en moyenne à 70TWh, ce qui correspond à 95% de la production d'électricité de source renouvelable et 14% de la production d'électricité française.

L'hydroélectricité est produite dans des usines appelées centrales hydrauliques, qui fonctionnent le plus souvent en association avec un barrage, en dérivant l'écoulement naturel de l'eau. Les turbines des centrales hydroélectriques sont activées par la force de l'eau. Ces turbines entraînent des alternateurs qui produisent alors l'électricité. Par l'intermédiaire d'un transformateur, l'électricité produite est ensuite évacuée vers le réseau électrique.

Que ce soit en plaine ou en montagne, le principe est le même : l'énergie de l'eau, au fil de l'eau ou à partir d'un réservoir, est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par une génératrice [6].

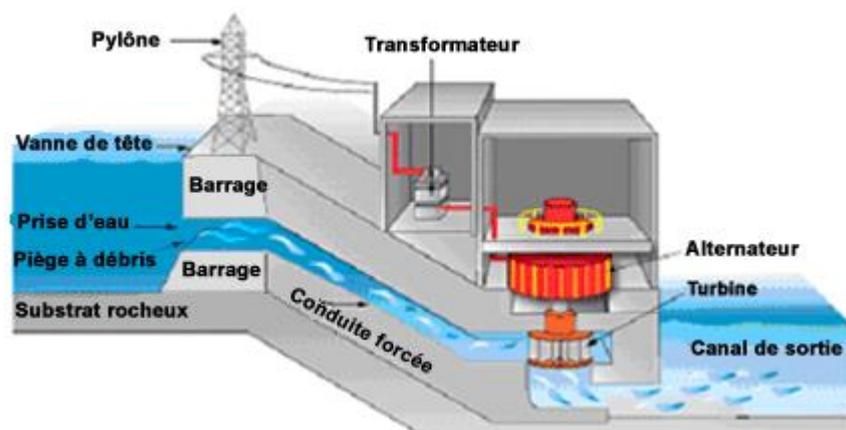


Figure I. 10. Centrales hydroélectriques

I. 2. 3. 1. Avantages de l'énergie hydraulique

- Sa production n'entraîne donc pas d'émission de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets toxiques.
- Disponible toute l'année.
- Technologie bien maîtrisée.
- Très bon rendement (90%).
- Installation de très longue durée.
- Cette énergie est modulable: en cas de panne générale d'électricité ou lors des heures de pointe, il est possible d'augmenter très rapidement sa production de l'électricité.

I. 2. 3. 2. Inconvénients de l'énergie hydraulique

- Dépend des conditions météo (pour les installations au fil de l'eau).
- L'installation doit s'adapter à chaque site.
- La construction de barrages peut bouleverser certains écosystèmes. Ils constituent également une forme de pollution visuelle.
- L'installation de centrales hydrauliques entraîne souvent d'importants déplacements de population ainsi que la disparition de surfaces agricoles.
- L'installation d'une centrale hydraulique est très coûteuse et doit répondre à un cahier des charges très strict. Sans oublier toute la maintenance que les barrages nécessitent.

I. 2. 4. Energie géothermique

Il s'agit de récupérer l'énergie stockée sous nos pieds sous la surface de la Terre et de s'en servir pour chauffer les bâtiments ou produire de l'électricité.

Suivant la température de l'eau, on distingue 3 types d'énergie géothermique [6]:

- *La géothermie à basse énergie* : température de l'eau comprise entre 30 et 100° C. La profondeur des réservoirs atteint 1 000 à 2 500 m. Elle est utilisée pour le chauffage. Ce type de géothermie est présent dans tous les grands bassins sédimentaires du monde.
- *La géothermie moyenne énergie* : température de l'eau comprise entre 100 et 180°C. On l'utilise pour produire de l'électricité. On la rencontre dans les zones volcaniques, dans des réservoirs à moins de 1 000 m de profondeur. Et aussi dans les bassins

sédimentaires, mais dans des réservoirs à plus grande profondeur que ceux de la géothermie basse énergie (2 500 à 4 000 m).

- *La géothermie haute énergie* : température de l'eau comprise entre 180 et 350° C. L'eau est utilisée sous forme de vapeur pour produire de l'électricité. On la trouve dans les zones volcaniques et à la frontière des plaques tectoniques en collision ou en formation (tous les archipels volcaniques bordant le Pacifique – la « Ceinture de feu » –, l'Islande...).

Un gisement géothermique est constitué de trois éléments :

- une source de chaleur ;
- un réservoir, qui est une formation rocheuse dans laquelle circule le fluide ;
- un fluide : sous forme de liquide, de vapeur ou d'un mélange des deux. C'est le plus souvent de l'eau réchauffée par le contact des roches.

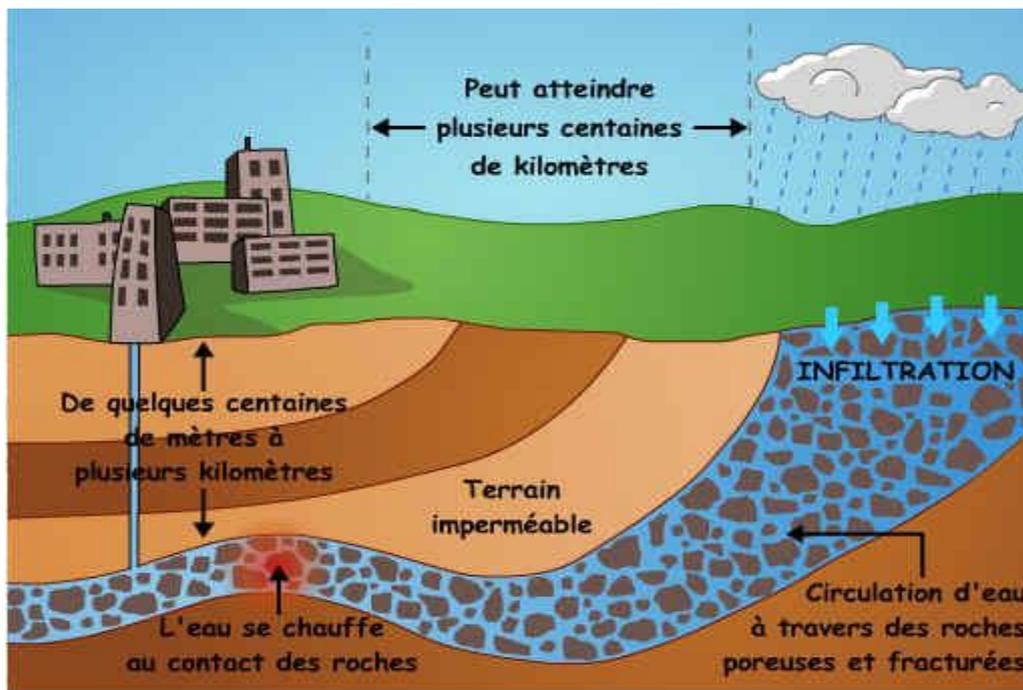


Figure I. 11. Principe de fonctionnement de la géothermie basse énergie [6]

I. 2. 4. 1. Avantages de la géothermie

- C'est une énergie qui ne produit aucun déchet et sa ressource reste inépuisable tant que la qualité d'énergie géothermique captée est inférieure à la chaleur qui provient du centre de la Terre.

- contrairement à d'autres énergies renouvelables, la géothermie ne dépend pas des conditions atmosphériques.

I. 2. 4. 2. Inconvénients de la géothermie

- La surexploitation d'un gisement entraîne une chute de température du sous-sol, ce qui fait que la qualité du gisement baisse progressivement jusqu'à ce qu'elle s'épuise complètement. En outre, il peut y avoir une concurrence entre l'eau qui est pompée pour sa chaleur et l'eau qui est pompée pour elle-même.

- La géothermie peut parfois dégager de faibles vapeurs de soufre si elle est utilisée sous la forme d'eau ou de chaleur.

I. 2. 5. Energie biomasse

Les plantes et les déchets des animaux peuvent produire de l'énergie. C'est l'énergie la plus ancienne encore utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Le bois coupé est brûlé dans les cheminées ou les fourneaux pour chauffer, cuire et même faire fonctionner des centrales électriques. 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 biomasses. Les biocarburants sont des carburants fabriqués à partir de plantes comme le colza et le tournesol.

Il existe trois familles pour la biomasse :

- Biomasse lignine : Comprenant principalement le bois et les résidus verts. Leur utilisation est faite à partir d'une combustion ou conversion thermo-chimique.

- Biomasse à glucide : Utilisant la canne à sucre, les céréales et les betteraves sucrières. Elle utilise la dégradation naturelle et biologique de la matière organique en l'absence d'O₂ ou encore par distillation.

- Biomasse oléagineuse : Ses composants sont le colza ainsi que le palmier à huile. Ces carburants sont récoltés suite à de nouvelles transformations chimiques [7].

I. 2. 5. 1. Transformation de la biomasse

➤ *La biomasse par combustion*

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...).

➤ *La biomasse par méthanisation*

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...

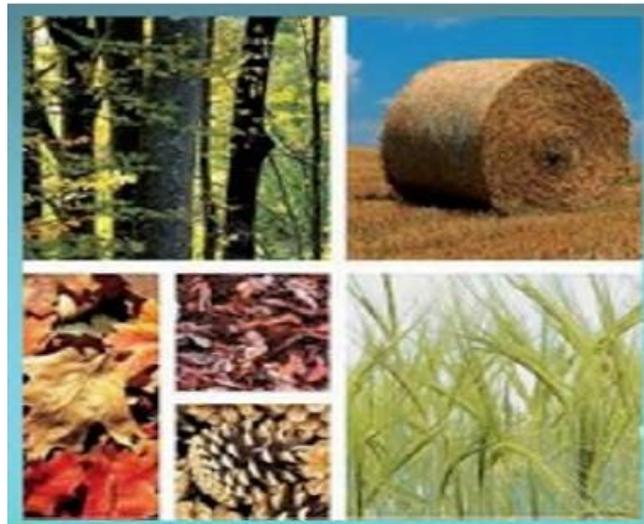


Figure I. 12. Biomasse

I. 2. 5.2. Avantages de la biomasse

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Biodégradable rapidement.
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse)
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- La biomasse est disponible partout.
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

I. 2. 5. 3. Inconvénient de la biomasse

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Dégage du CO₂.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

I. 3. Source d'énergie non renouvelable

C'est une source d'énergie qui ne se renouvelle pas ou bien très lentement pour considérer comme inépuisable à l'échelle de l'homme. On distingue deux types, à savoir, les ressources fossiles et le minerai d'uranium et du thorium.

I. 3. 1. Energie nucléaire

L'énergie nucléaire (énergie atomique) dépend des combustibles fossiles, l'uranium et le thorium, dont le minerai radioactif est contenu dans le sous-sol de la Terre. Le thorium doit d'abord être converti dans un réacteur nucléaire, tandis que l'uranium peut être soumis à la fission dès son extraction à l'état naturel, elle permet de produire de l'électricité, dans les centrales thermiques nucléaires, appelées centrales électronucléaires, grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium.

L'uranium est la matière première des centrales nucléaires. Il s'agit d'un métal, que l'on trouve dans certaines roches, et qui a la particularité d'être radioactif. Cela signifie que le noyau de ses atomes est instable et a tendance à se désintégrer. Ce phénomène naturel, même s'il se déroule à une échelle si petite qu'on ne peut même pas le voir au microscope, libère une très grande quantité d'énergie.

L'énergie nucléaire est libérée lorsque les noyaux des atomes se cassent. On parle de "fission nucléaire". C'est ce phénomène que l'on utilise dans un réacteur nucléaire. Mais l'énergie contenue dans certaines matières peut aussi être libérée lorsque les noyaux de leurs atomes fusionnent. On parle alors de "fusion nucléaire". À l'heure actuelle, on ne sait pas reproduire ce phénomène pour le rendre utilisable. En

revanche, on sait que l'énergie produite dans ces conditions est bien plus puissante que la fission, car c'est la fusion nucléaire qui fait brûler les étoiles comme notre soleil [3].

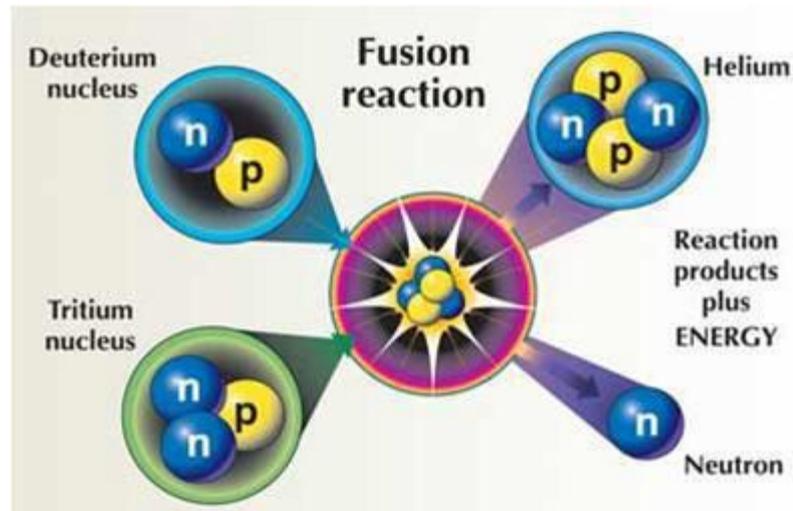


Figure I. 13. Processus de fusion nucléaire

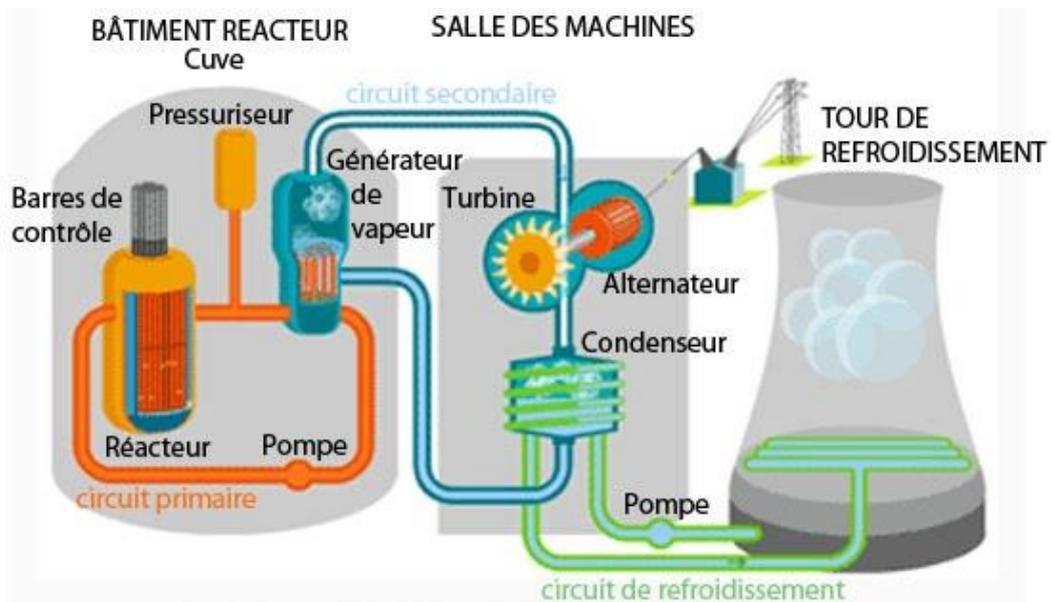


Figure I. 14. Les centrales nucléaires

Une centrale nucléaire fonctionne avec trois circuits d'eau totalement indépendants, toujours séparés les uns des autres :

- le circuit primaire,
- le circuit secondaire,
- le circuit de refroidissement.

➤ *Le circuit primaire* : libérer la chaleur

C'est dans le cœur du réacteur qu'a lieu la réaction nucléaire.

Les combustibles d'une centrale sont conditionnés sous forme de petites pastilles empilées dans de longs tubes métalliques : il s'agit de petites pastilles de d'uranium enrichi (les pastilles de plutonium sont également utilisées dans certaines centrales). Les tubes sont placés dans des cuves en acier remplies d'eau.

L'énergie est libérée sous forme de chaleur qui se dégage de la fission des atomes d'uranium. Les tubes chauffent l'eau à plus de 300°C, mais l'eau n'entre pas en ébullition grâce au pressuriseur qui maintient la pression de l'eau.

L'eau circule dans un circuit fermé appelé circuit primaire. Le circuit primaire récupère la chaleur dégagée par la fission de l'uranium [8].

➤ *Le circuit secondaire* : produire la vapeur d'eau

Mise sous pression pour être maintenu à l'état liquide, cette eau est ensuite dirigée jusqu'au générateur de vapeur. Au contact des tuyaux parcourus par l'eau très chaude du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. La vapeur ainsi produite fait tourner une turbine située dans la salle des machines, qui fait à son tour tourner un alternateur. L'alternateur produit du courant alternatif par rotation.

➤ *Le circuit de refroidissement* : condenser la vapeur en eau, évacuer la chaleur

En sortant de la turbine, la vapeur est retransformée en eau grâce au circuit de refroidissement, pour être renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. Cette vapeur passe pour cela dans un condenseur. Ce condenseur est alimenté soit par de l'eau froide, prélevée dans la mer ou le fleuve, soit par de l'eau refroidie par le courant d'air qui circule dans la tour de refroidissement [8].

I. 3. 1.1. Avantages de l'énergie nucléaire

- L'énergie nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre. Elle est utilisable en grandes quantités grâce aux puissances qu'elle génère et elle est très compétitive.
- Installation de moyenne durée (40 ans).

I. 3. 1. 2. Inconvénients de l'énergie nucléaire

- Conséquences en cas d'accident (radioactivité) et dangerosité du nucléaire (Tchernobyl il y a 20 ans).

- Problème de gestion des déchets nucléaires qui restent pendant des milliers d'années.
- Coûts d'installation, d'entretien et de démantèlement (lorsque les centrales sont trop vieilles).
- Ressources en uranium limitées.

I. 3. 2. Energies fossiles

Le pétrole le gaz naturel et le charbon sont des matières présentes dans le sous-sol de la terre. Leur particularité, c'est qu'ils brûlent très bien : ce sont d'excellents carburants. On les appelle "hydrocarbures". Ils ont aussi l'avantage de pouvoir être facilement stockés et transportés, ce qui en fait la source d'énergie la plus pratique à utiliser. Les sources fossiles produisent de l'énergie par la combustion, ce qui les rend très polluantes. La conversion de cette énergie se fait dans des chaudières, des fours, des moteurs à combustion interne ou des turbines.

Les énergies fossiles sont les plus utilisées dans le monde. Le pétrole, en particulier, est l'énergie presque de tous les transports. C'est pourquoi son prix est un élément fondamental pour l'économie. S'il augmente, le prix de toutes les marchandises qu'il sert à transporter augmente aussi.

I. 3. 2.1. Pétrole [9]

Le pétrole est actuellement l'une des premières sources d'énergie dans le monde. Il rentre dans la composition d'un grand nombre de produits. Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui viens du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie :

- L'essence,
- Le gazole,
- Le kérosène,
- Produits de la pétrochimie, comme le plastique,
- naphta,

- GPL (Gaz du Pétrole Liquéfié) qui constitue un carburant moins polluant que les carburants conventionnels, utilisé dans le domaine automobile,

I. 3. 2. 2. Charbon [10]

Le charbon est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se sont transformées en charbon.

Il y a des millions d'années, des forêts tropicales se sont décomposées au fond d'anciens marais. Elles se sont d'abord transformée en tourbe (un mauvais combustible), puis l'accumulation des couches a durci cette tourbe qui s'est transformée en lignite (charbon brun). Puis en houille (charbon noir) et en anthracite (charbon très dur).

Pendant longtemps, le charbon a été utilisé pour les transports (locomotives à vapeur), les usines, les centrales électriques et les cuisinières. Aujourd'hui, on ne le consomme plus beaucoup, mais il est encore une source d'énergie importante dans de nombreux pays, car il brûle lentement tout en dégageant presque autant d'énergie que le pétrole.

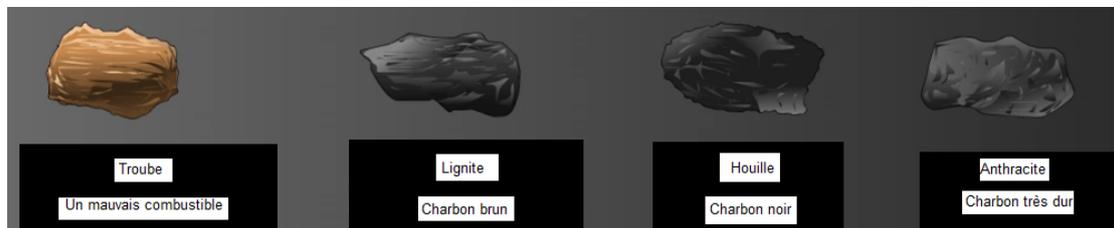


Figure I. 15. Développement du charbon

I. 3. 2. 3. Gaz naturel [11]

Comme le pétrole et le charbon, le gaz naturel trouve son origine dans la décomposition d'animaux et de végétaux morts depuis des millions d'années, les organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air. Ces poches de gaz naturel se trouvent entre 3 000 et 4000 mètres sous la surface de la Terre. Le gaz naturel est principalement constitué de méthane CH_4 (jusqu'à 99%), avec de l'éthane C_2H_6 et du propane C_3H_8 . Il contient aussi de l'azote, du dioxyde de carbone et du H_2S et des composés oxygénés comme les phénols et les alcools.

Le gaz est un très bon combustible qu'on utilise par exemple pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons et produire du chauffage.

I. 3. 2. 4. Avantages des énergies fossiles

- Technologie bien maîtrisée.
- Bon rendement en moyenne/ (gaz naturel: 90%, charbon: 40%, pétrole: variable selon utilisation).
- Facilement stockable et déplaçable.

I. 3. 2. 5. Inconvénients des énergies fossiles

- Le premier, c'est qu'en brûlant, ils dégagent beaucoup de particules qui polluent l'atmosphère.
- Le second, c'est que leur quantité sur Terre est limitée. En effet, les hydrocarbures ont mis plusieurs centaines de millions d'années pour se former, ce qui signifie que leur stock n'est pas prêt de se renouveler, au rythme où l'humanité les utilise, ce stock finira par s'épuiser.
- Installation à durée de vie limitée (20-40 ans).

I. 4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué en premier lieu la différence entre les deux sources de l'énergie; renouvelables et non renouvelables. Ensuite, Nous avons cité les différentes sources primaires de l'énergie électrique, et nous avons décrit le principe de fonctionnement de chaque type, leurs caractéristiques principales, leurs avantages et inconvénients.



II. 1. Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'une source d'énergie en un lieu donné, sous une forme aisément utilisable, pour une utilisation ultérieure. Il est nécessaire pour valoriser avec efficacité les énergies alternatives, sûres et renouvelables mais intermittentes telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, l'alimentation énergétique de sites insulaires ou isolés.

Pour la « production d'énergie », le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » est :

- Soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fissile,...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique.
- Soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire.

On s'intéresse ici principalement à l'opération consistant à créer un stock à partir d'énergie disponible, et non directement à la gestion des stocks (notamment des stocks d'énergie fossile), ni au déstockage.

II. 2. Intérêt du stockage de l'énergie

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines et l'industrie. Pour les États, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût économiques et social élevé et en termes de santé et de sécurité, etc ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses, ce pourquoi, il est muni de plusieurs groupes électrogènes de secours et de stocks de carburant [12].

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- Sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays;
- Ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande ;
- Compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

II. 3. Les différentes technologies de stockage de l'énergie

Sauf dans des cas bien particuliers, il est difficile de stocker directement l'électricité. Il faut dès lors la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable, les solutions de stockage d'énergie se divisent en quatre catégories :

- Mécanique (barrage hydroélectrique, Station de transfert d'énergie par pompage STEP, stockage d'énergie par air comprimé – CAES, volants d'inertie),
- Electrochimique (piles, batteries, vecteur hydrogène),
- Électromagnétique (bobines supraconductrices, supercapacités),
- Thermique (chaleur latente ou sensible).

II. 3. 1. Techniques de choix des technologies de stockage

Afin de comparer les diverses technologies de stockage et déterminer les plus pertinentes pour un usage particulier, nous avons plusieurs facteurs techniques qui doivent être pris en compte. En particulier, pour le stockage stationnaire d'électricité :

- **La puissance disponible (en MW) et la capacité énergétique (en MWh) :**
La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio- énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière.
- **Le temps de réaction :** est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système.
- **L'efficacité énergétique,** définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée.
- **La durée de vie :** qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries.

- **Le rendement** : Rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée. Ce rapport peut varier en fonction de l'utilisation du système de stockage (fonctionnement à basse puissance, haute puissance,...).
- **Le coût d'installation** : deux types de coûts; Coûts d'investissement (en €/kW) et coûts de fonctionnement (en €/kWh).

II. 3. 2. Stockage mécanique

C'est un élément pratiquement obligatoire dans tous les moteurs, sous forme de volant d'inertie, pour réguler le mouvement à des échelles de temps très courtes, inférieures à la seconde. Il n'est pratiquement pas utilisé pour le stockage à long terme, car les quantités d'énergie stockées sont faibles. On distingue deux formes de stockages :

- Stockage sous forme d'énergie potentielle :
 - Stockage pompage (les barrages),
 - Stockage air comprimé.
- Stockage sous forme d'énergie cinétique : stockage par volant d'inertie.

II. 3. 2. 1. Station de pompage (les barrages)

Les stations de pompage sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. Cependant, en heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique.

On distingue deux types de pompage :

A) Stations de pompage d'apports

Elles permettent de remonter via des pompes un volume d'eau entre son propre réservoir et le réservoir supérieur d'une chute turbinage. Les eaux turbinées proviennent ainsi des apports gravitaires et des apports de la station de pompage.

B) Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Elles sont caractérisées par un fonctionnement en cycles pompage-turbinage entre un réservoir inférieur et un réservoir supérieur, grâce à des turbines-pompes

réversibles. Le pompage peut être « mixte » (les eaux turbinées proviennent des apports gravitaires et des apports de la station de pompage) ou « pur » (les apports naturels au réservoir supérieur sont négligeables) [13].

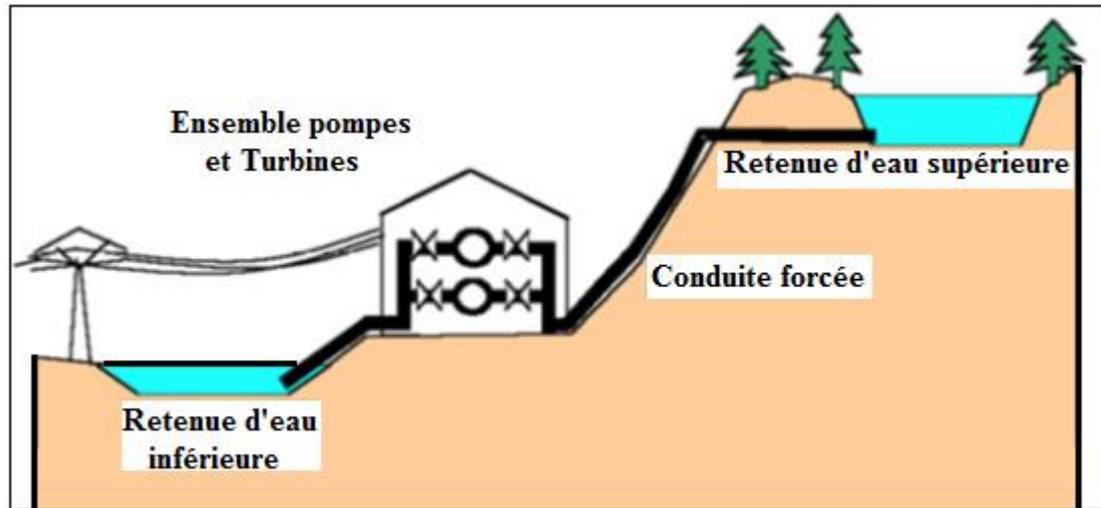


Figure II. 1. Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire

II. 3. 2. 2. Stockage d'énergie par air comprimé

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité.

Le rendement des CAES est malheureusement réduit car la compression de l'air s'accompagne d'un échauffement. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur (stockage adiabatique) [13].

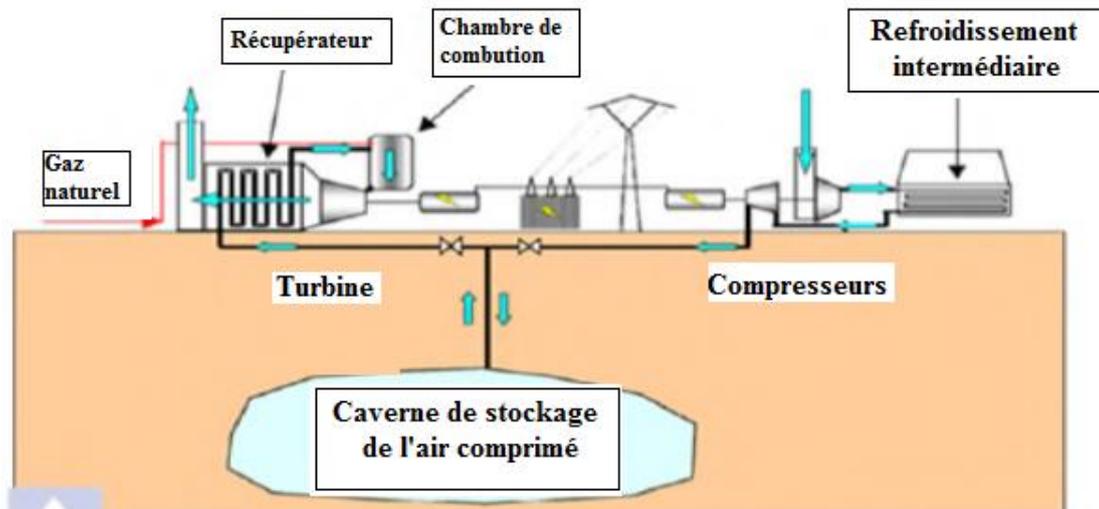


Figure II.2. Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé

II. 3. 2. 3. Stockage inertiel

Ce type est utilisé ça fait longtemps 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.

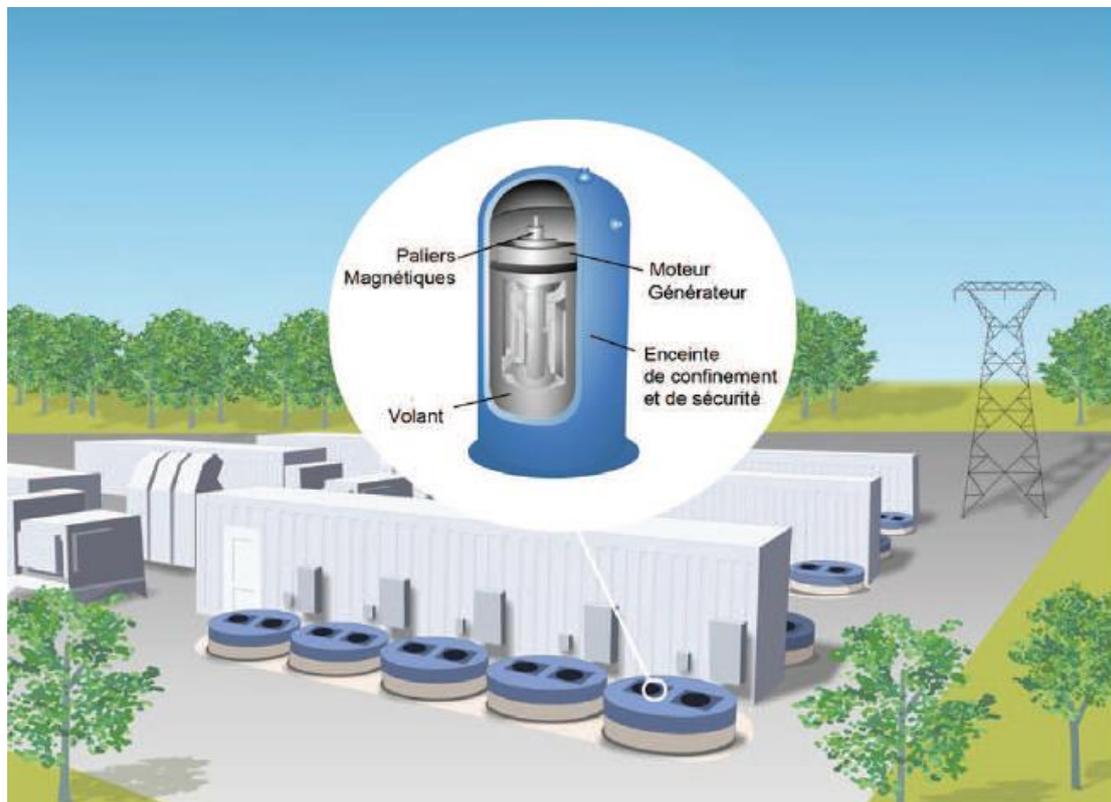


Figure II. 3. Stockage par volants d'inertie

- 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 8000 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 la rotation du volant d'inertie [13].

II. 3. 3. Stockage électrochimique

À plus faible échelle, le stockage d'énergie en vue de la production d'électricité (électrochimique dans les piles et les batteries, électrique dans les condensateurs) est bien moindre en termes de quantité d'énergie, mais très important sur le plan pratique.

II. 3. 3. 1. Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

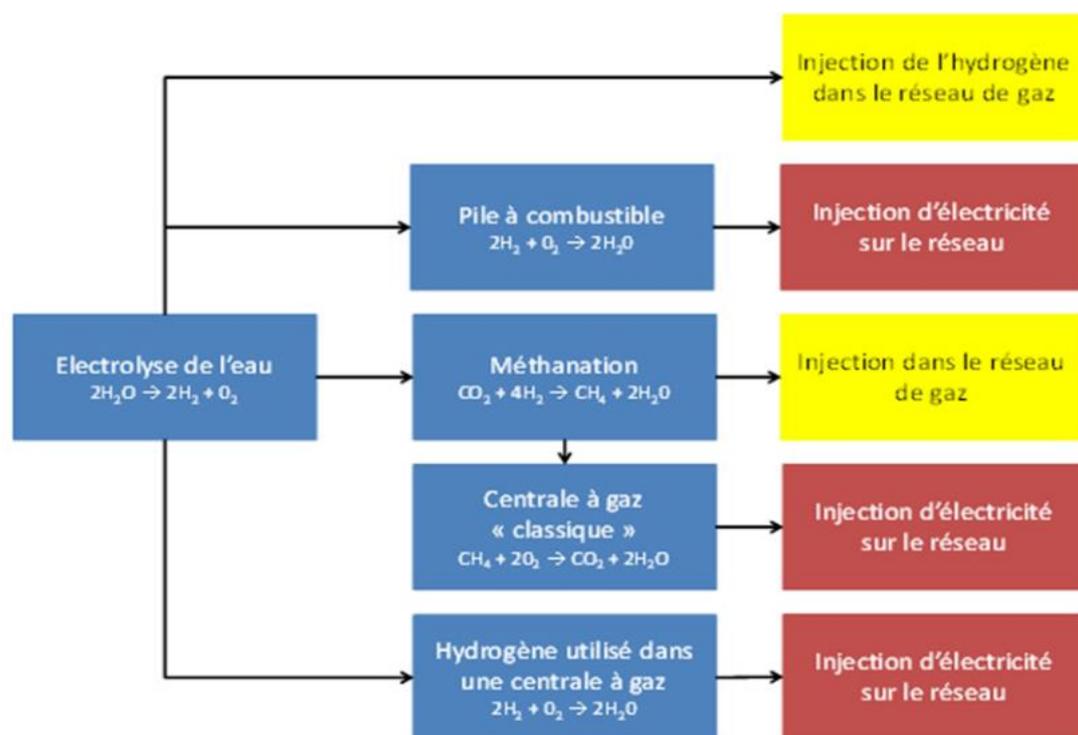


Figure II. 4. Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène

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'hydruure métallique [14].

II. 3. 3. 2. Batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickelcadmium, nickel-hydruure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodiumsoufre, chlorure de sodium (zebra), etc.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours). La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies. Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité.

II. 3. 3. 3. Batteries à circulation

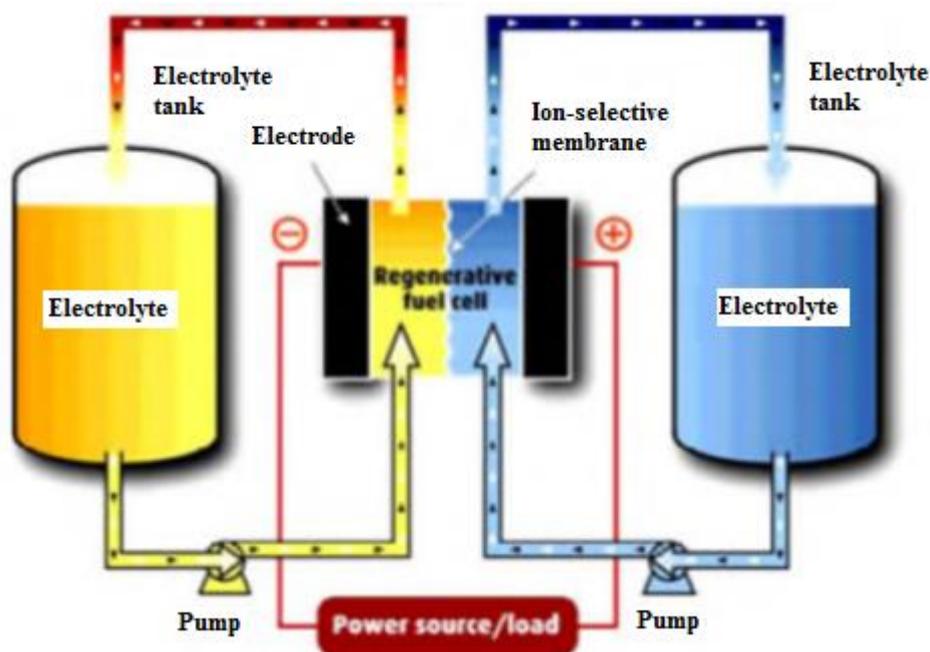


Figure II. 5. Schéma d'une batterie à circulation

Dans les systèmes de stockage par batteries à circulation, deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques (couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/ polysulfure de sodium et vanadium/vanadium), séparés par une

membrane échangeuse de protons, circulent à travers les 10 électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes [15].

II. 3. 4. 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'oxydoréduction. 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.

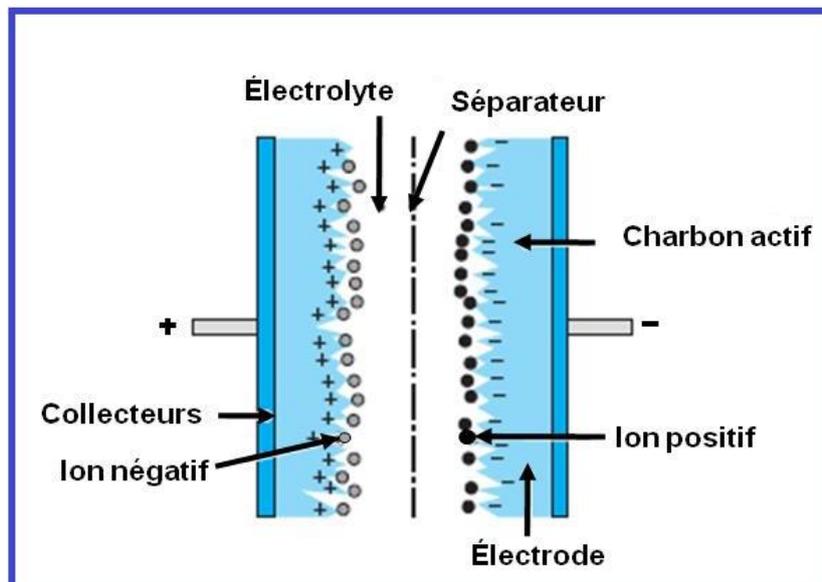


Figure II. 6. Schéma équivalent d'un super-condensateur

II. 3. 4. Stockage thermique (chaleur et froid)

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, et le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS). Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants [13].

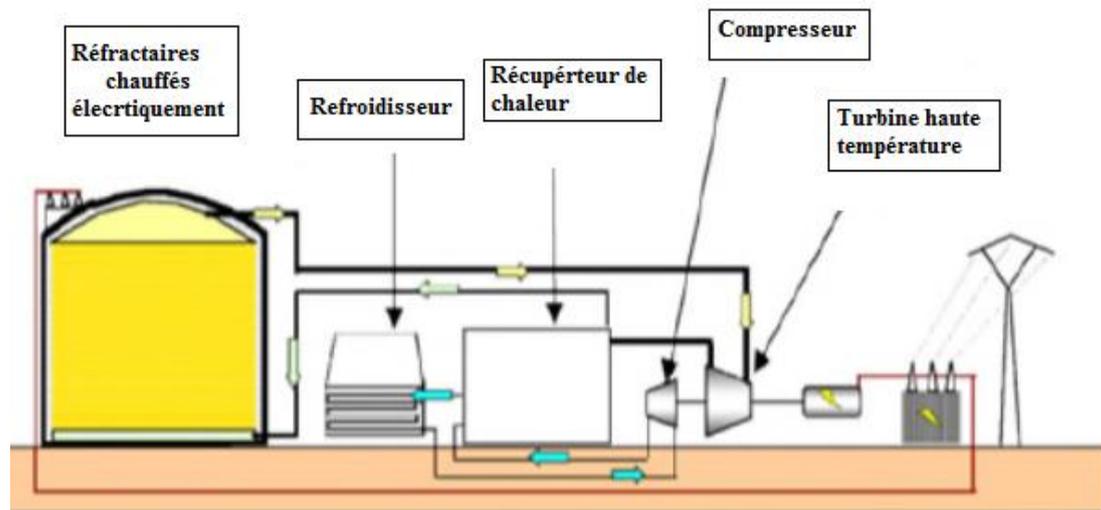


Figure II. 7. Schéma d'une installation de stockage thermique

II. 4. Conclusion

L'intérêt et l'importance du stockage de l'énergie électrique a été bien expliqué dans le deuxième chapitre. Afin d'assurer l'équilibre production consommation, il existe plusieurs solutions qui facilite le stockage de l'énergie électrique et sous différentes formes. Nous avons cité les meilleures technologies exploitées de stockage.



III. 1. Consommations des ressources d'énergie

La consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de 1,3% en 2019 (contre 2,8 % en 2018). Cette hausse de la consommation a concerné « pour les trois quarts les énergies renouvelables et le gaz naturel ». Toutefois, le pétrole reste de loin la principale source d'énergie consommée dans le monde (33,1% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2019), devant le charbon (27 %). Les émissions mondiales de CO₂ liées à la consommation d'énergie ont pour leur part augmenté de 0,5 % en 2019 (contre 1,1 % par an en moyenne au cours de la dernière décennie).

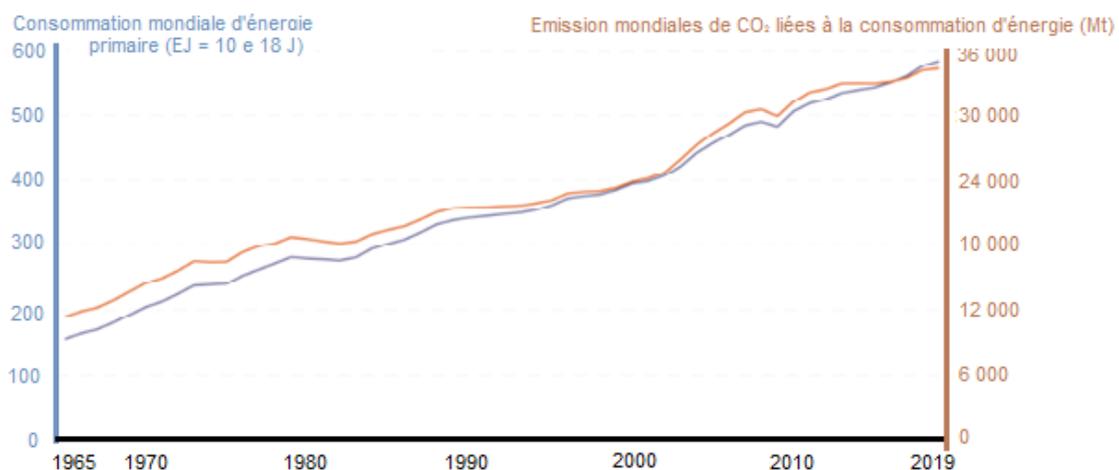


Figure III. 1. Evolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ [16]

Au total, les énergies fossiles ont encore compté pour 84,3% du mix énergétique mondial en 2019 (contre 84,7 % en 2018). Pour que l'électrification puisse contribuer à la transition énergétique « bas carbone » au niveau mondial, la production électrique doit naturellement être elle-même décarbonée. Or, le charbon est toujours de très loin la principale source d'électricité dans le monde malgré un recul de 2,8 % de la production des centrales à charbon en 2018 : ce combustible a compté pour 36,4 % de la production mondiale d'électricité en 2019.

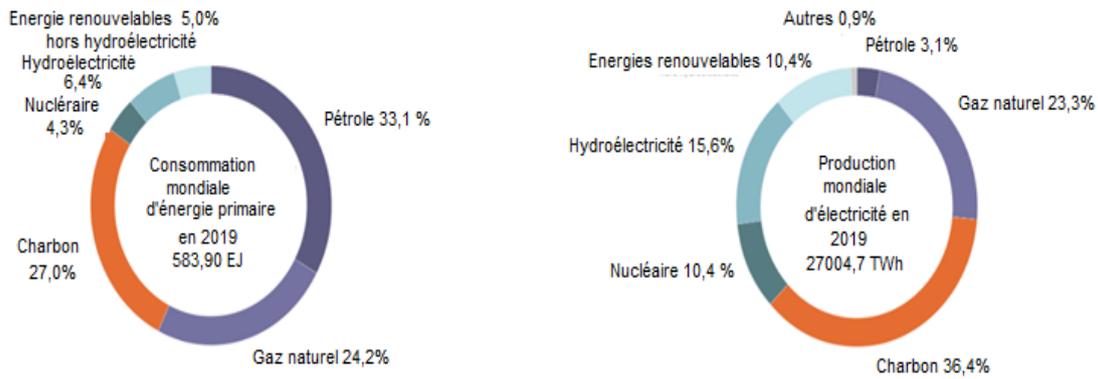


Figure III. 2. Consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2019

[16]

III. 1. 1. Consommation d'énergie par grande zone géographique

Les énergies fossiles sont majoritaires dans le mix de toutes les grandes régions du monde mais il apparaît d'importantes différences d'une zone à une autre : pétrole, gaz naturel et charbon comptent par exemple pour 67,4 % du mix énergétique de l'Amérique centrale et du Sud (où l'hydroélectricité a compté pour 22,3 % de la consommation d'énergie primaire en 2019), 73,6 % en Europe, 81,7 % en Amérique du Nord et 98,8 % au Moyen-Orient. Signalons entre autres l'importance du charbon dans la zone Asie-Pacifique dont 47,5 % de la consommation d'énergie primaire a reposé sur ce combustible en 2019 (contre 13,5 % en Europe par exemple).

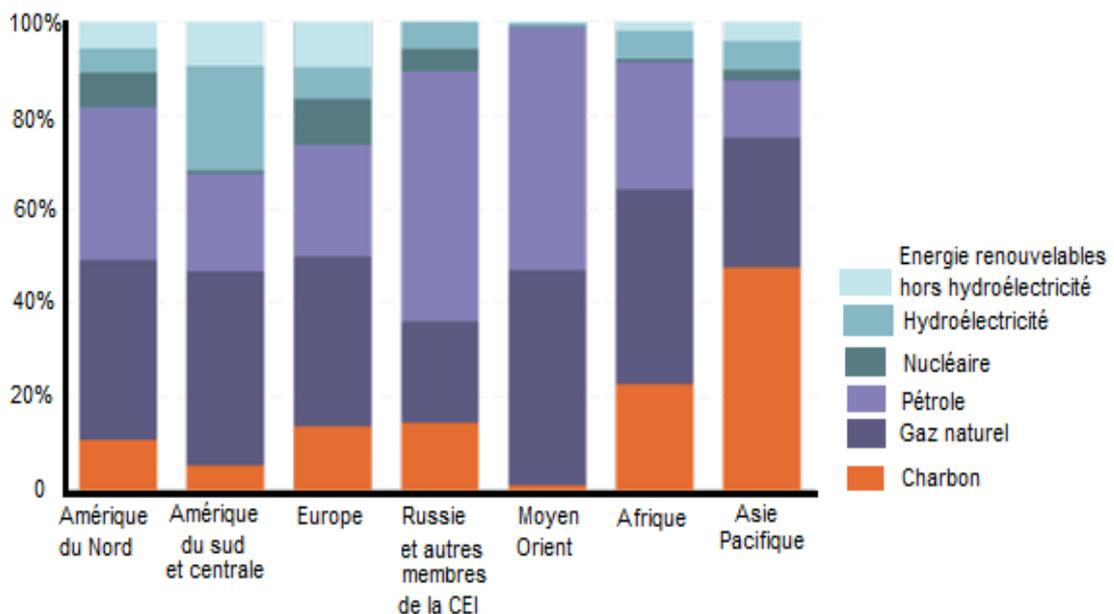


Figure III. 3. Consommation d'énergie par zone en 2019

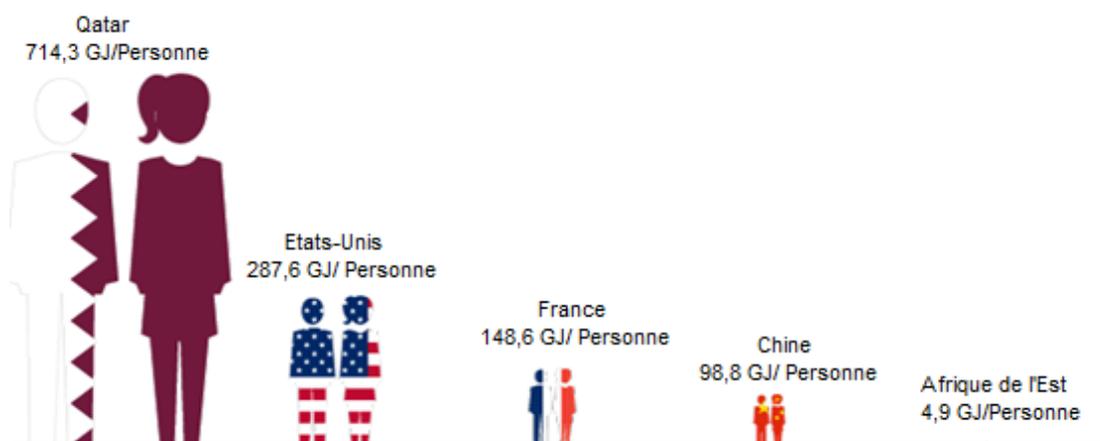


Figure III. 4. Consommation d'énergie par habitant en 2019

III. 1. 2. Chiffres clés du pétrole et du gaz naturel en 2019

La major BP a historiquement diffusé des données particulièrement détaillées sur les hydrocarbures. La figure suivante présente les chiffres clés sur le pétrole et le gaz naturel en 2019. Précisons par ailleurs que le BP Statistical Review contient désormais également des données sur la production et la consommation des énergies renouvelables, ainsi que sur la production des grandes ressources minérales nécessaires dans le cadre de la transition énergétique.

Pétrole		Gaz Naturel	
Production mondiale 95,2 millions de barils / jour (Pétrole brut, condensats, liquides de gaz naturel)		Production mondiale 3989,3 milliards de m ³	
Consommation mondiale 101,0 millions de barils / jour (biocarburants inclus)		Consommation mondiale 3929,2 milliards de m ³	
Réserves mondiales prouvées à fin 2019 1733,9 milliards de barils		Réserves mondiales prouvées à fin 2018 198800 milliards de m ³	
49,9 ans C'est le nombre d'années de production que les réserves prouvées pourraient satisfaire au rythme actuel		49,8 ans C'est le nombre d'années de production que les réserves prouvées pourraient satisfaire au rythme actuel	

Figure III.5. Les chiffres clés du Pétrole et Gaz naturel en 2019

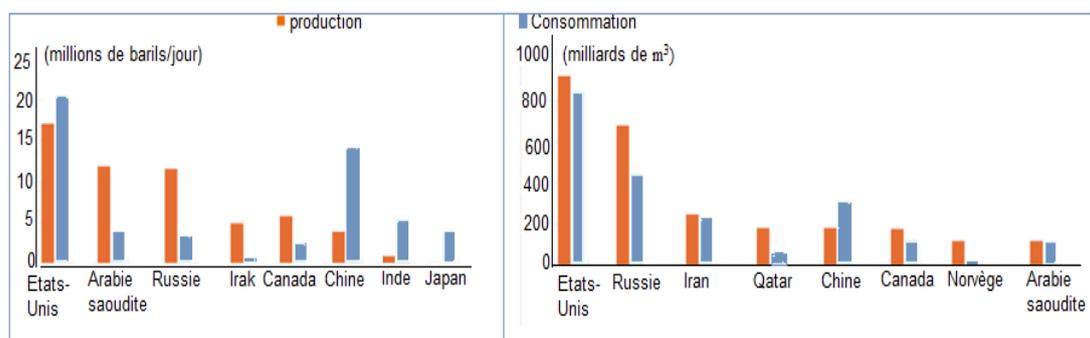


Figure III. 6. Les principaux pays producteurs et consommateurs

La consommation de pétrole en Algérie était de l'ordre de 0,88 EJ en 2019, soit 454 kb/j, en hausse de 6,3 % en 2019 et de 35 % depuis 2009. Elle représente 0,5% de la consommation mondiale. Sa consommation n'absorbe que 31 % de sa production.

Concernant la consommation du gaz ; l'Algérie a consommé 45,2 milliards de m³ de gaz naturel, soit 1,63 EJ, en progression de 4,2 % en 2019 et de 73 % depuis 2009. Elle se classe au 19^{ème} rang mondial avec 1,2 % de la consommation mondiale. Sa consommation absorbe 52 % de sa production.

La consommation intérieure de gaz est subdivisée en trois parties :

- 44 % est consacré à la production d'électricité ;
- 9 % est destinée aux besoins propres de l'industrie énergétique ;
- 7,5 % aux usages non énergétiques (chimie) ;
- 36 % à la consommation finale énergétique (secteur résidentiel ; 20,6 %, industrie : 11 %).

III. 2. Réserves des ressources énergétiques mondiales

Les réserves qui sont les quantités que l'on peut produire techniquement et économiquement des ressources, et les quantités totales existantes mais qui ne sont pas forcément exploitables. Les ressources d'énergie fossiles par exemple représentent un stock bien défini d'énergie solaire qui n'est pas facile à évaluer. Les prévisions sur les réserves doivent souvent être revues compte tenu des recherches nouvelles et de

l'évolution des techniques. Depuis longtemps l'épuisement des réserves pétrolières est programmé mais toujours retardé dans le temps.

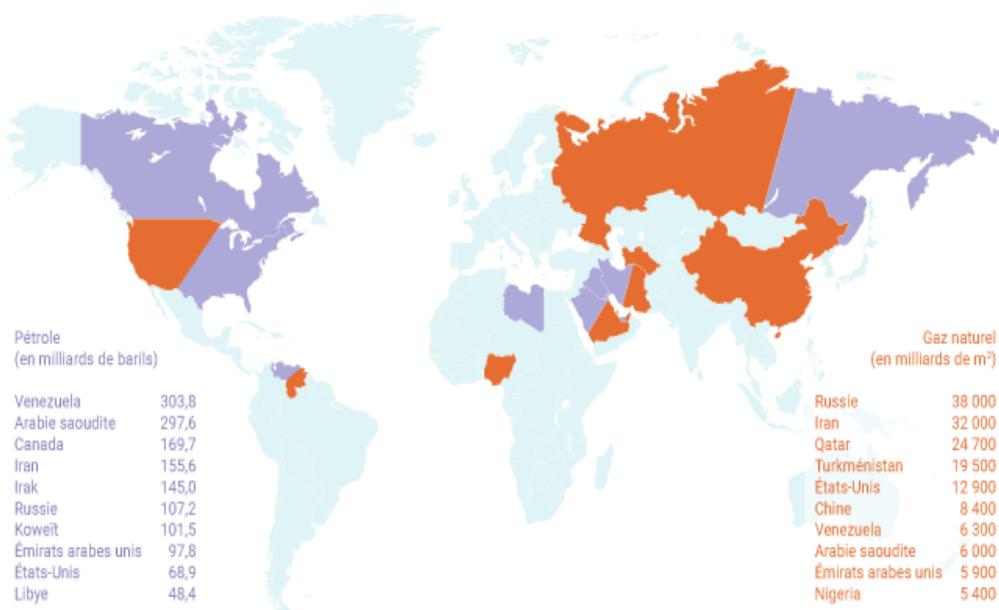


Figure III.7. Les 10 pays disposant des plus importantes réserves en pétrole et en gaz à la fin de 2019

III. 2. 1. Pétrole

Les réserves prouvées de pétrole brut dans les pays membres de l'Opep ont augmenté de 3,7 % pour atteindre 1,227 milliards de barils à la fin de 2019, après une légère baisse en 2018. Ces réserves avaient légèrement diminué de 0,2 % à 1,189 milliards de barils à la fin de 2018.

Globalement, les réserves mondiales prouvées de pétrole brut s'élevaient à 1,551 milliards de barils à la fin de 2019, en augmentation de 3,6 % par rapport au niveau de 1,497 milliards de milliards enregistré fin 2018.

Tableau III. 1. Réserves mondiales du Pétrole (milliards de barils) [17]

Pays	Réserves (milliards de barils)
Venezuela	302,8
Arabie Saoudite	263,2
Iran	155,6
l'Irak	147,2
Koweït	101,5
Emirats Arabes Unis	87,8
Russie	80
Libye	48,4
Nigeria	37,5

Non seulement le Nigeria représente donc 2,55 % des réserves mondiales de pétrole, mais il reste aussi le premier pays africain producteur de pétrole. Au-delà de ce top dix, on observe aussi que deux autres pays africains sont classés dans le top 20. En effet, l'Algérie atteint la quinzième place, avec une réserve de pétrole estimée à 12,2 milliards de barils, soit 22,5 années de production au rythme de 2019. Ces réserves classaient l'Algérie au 16^{ème} rang mondial avec 0,7 % du total mondial, elle est suivie par l'Angola, dont les réserves sont estimées à 8,4 milliards de barils.

III. 2. 2. Gaz naturel

Le gaz naturel représente aujourd'hui 24,2 % des énergies utilisées dans le monde. Soit 0,8 points de plus qu'en 2018. Les réserves, quant à elles, ne sont pas illimitées. Les réserves de gaz naturelles prouvées bien qu'ayant été sollicitées toute une année n'ont pas diminué. Au contraire, l'étude annuelle BP montre que nous disposons aujourd'hui d'un stock de gaz naturel de 198,8 billions de m³ de gaz naturel, soit 5,3 billions de plus que l'année dernière.

Le tableau suivant résume les pays disposant des plus grandes réserves en 2019 :

Tableau III.2. Réserves mondiales de Gaz Naturel (en billions de m³) [17]

Pays	Réserves (billions de m ³)
Russie	38,0
Iran	32,0
Qatar	24,7
Turkménistan	19,5
Etats-Unis	12,9
Chine	8,4
Venezuela	6,3
Arabie Saoudite	6,0
Emirats Arabes Unis	5,9
Nigeria	5,4
Algérie	4,3

En Algérie, les réserves de gaz naturel sont estimées à 4 500 milliards de m³ en 2015 (159,1 trillions US de pieds cubes), soit 54 années de production au rythme de 2015.

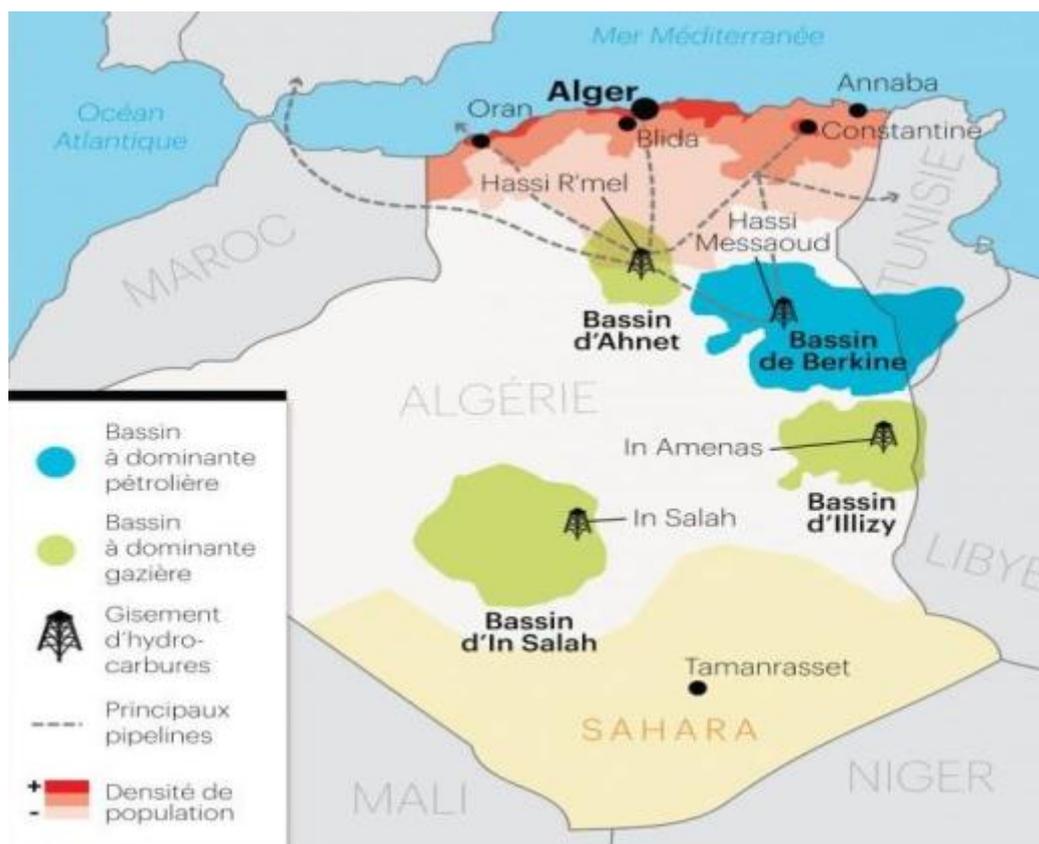


Figure III. 8. Carte des gisements pétroliers et gaziers en Algérie [18]

III. 2. 3. Charbon

Les principales réserves de charbon se trouvent aux États-Unis, loin devant la Russie, l'Australie et la Chine. La Chine est dans une phase de réorganisation profonde de son secteur minier, fermant de très nombreuses petites exploitations au profit des mines plus grandes et plus modernes sur le plan technique.

Tableau III. 3. Réserves mondiales de charbon (en millions de tonnes) [17]

Pays	Réserves prouvées fin 2017	Part dans les réserves mondiales
États-Unis	250 219	24,2 %
Russie	160 364	15,5 %
Australie	147 435	14,0 %
Chine	138 819	13,4 %
Inde	101 363	9,4 %

Allemagne	36 103	3,5 %
Ukraine	34 375	3,3 %
Kazakhstan	25 605	2,5 %
Afrique du Sud	9 893	1,0 %
Canada	6 582	0,6 %
Colombie	4 881	0,5 %
Reste du monde	139 143	12,1 %
Total monde	1 054 782	100,0 %

En Algérie, le charbon; de la houille bitumineuse est présenté à faible profondeur dans les Hauts-Plateaux. A Béchar, les gisements de charbon aujourd'hui fermés recèlent encore 1 milliard de tonnes.

III. 2. 4. Énergie nucléaire

A l'échelle mondiale, les réserves récupérables d'uranium sont estimées à 7988600 tonnes (t) en janvier 2017. L'uranium est un métal certes répandu, mais comportant toutefois d'importants gisements à faible teneur qui ne sont actuellement pas considérés comme rentables ou exploitables [19].

Tableau III. 4. Réserves mondiales d'uranium [19]

Etat	Réserves
Australie	25,7%
Kazakhstan	11,3%
Canada	10,6%
Russie	8,2%
Namibie	6,8%

Les gisements de l'uranium en Algérie sont reconnus au Hoggar (Timgaouine, etc..) où ils sont évalués à 26 000 t. Mais des réserves gigantesques existent dans le Silurien du Sahara où il est à hauteur de 16500 t/km², soit un total de 9,5 Gt. La

lixiviation (percolation d'eau acide à 8 % à travers la roche-mère permet de le récupérer à 100% [18].

III. 3. Energies renouvelables en Algérie

III. 3. 1. Potentiel Solaire

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. Le potentiel d'énergie solaire est le plus important dans le bassin méditerranéen. Le territoire du grand sahara algérien, les zones arides et semi-arides occupent plus de 90 % de la superficie totale du pays. Le temps d'ensoleillement excède 2500 h/an et peut atteindre jusqu'à 3900 h/an ce qui donne un potentiel solaire moyen de 2500 kWh/m² soit près de 6000 TWh (150 fois la consommation algérienne actuelle) [20].

III. 3. 2. Potentiel Eolien

En Algérie, le taux des vents moyens varient entre 1 et 6 km/h. Dans ce qui suit nous représentons une carte du potentiel éolien en Algérie, il est à constater que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset.

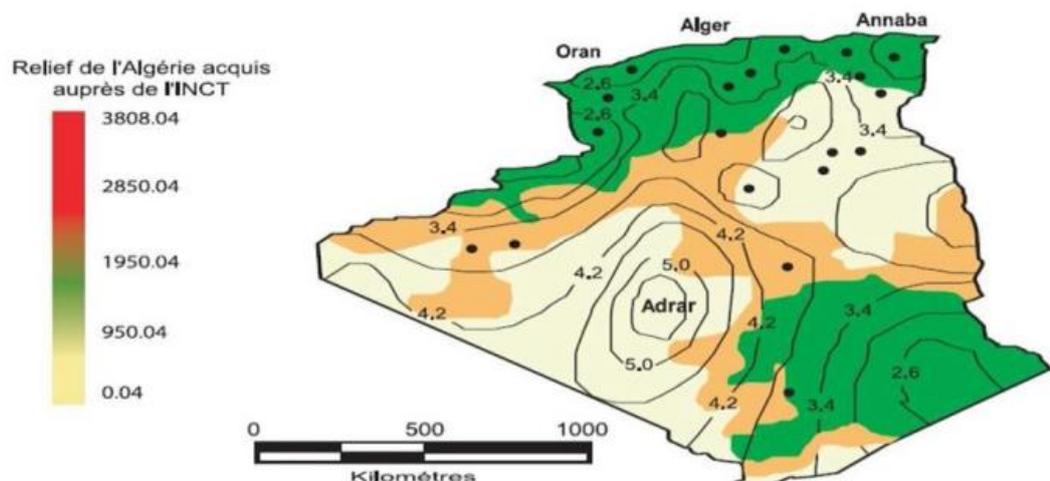


Figure III. 9. Potentiel Eolien

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran,

Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et Elbayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (> 8 m/s). De plus, ils ont découvert que le site d'Adrar dispose d'un potentiel énergétique éolien important et qui est plus favorable à l'exploitation de ce type d'énergie pour la production d'électricité [20].

III. 3. 3. Potentiel Géothermique

Le sud algérien est considéré comme un vaste territoire dont le potentiel géothermique est contenu dans les bassins sédimentaires des zones continentales stables. Les réservoirs géothermiques débitent à travers des sources thermales et des forages artésiens, dont la température varie entre 19 °C et 98 °C. Il existe deux zones géothermiques distinctes, l'une dans la partie Est et l'autre dans la partie Ouest du Sahara algérien [21].

III. 3. 4. Potentiel Hydraulique

Les ressources hydrauliques en Algérie présentent 18 milliards de m³ en eau conventionnelle et 20.000 milliards de m³ pour la nappe albiennaise. L'Algérie compte 70 barrages avec une capacité théorique de 7 milliards de m³ [22].

III. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité le taux de consommations des ressources d'énergie renouvelables et non renouvelables ainsi que les réserves des ressources énergétiques locale et mondiale. Nous constatons que la consommation mondiale d'énergie pourrait fortement croître dans les prochaines années. Cette hausse proviendrait essentiellement des pays en voie de développement, sous l'effet de leur croissance démographique et économique. Cependant, la consommation en Afrique resterait toujours très faible. Cela implique la nécessité d'utilisation des ressources d'énergies renouvelables, celles-ci progressent le plus rapidement dans le mix énergétique mondial.



IV. 1. Introduction

L'environnement est défini généralement comme étant un ensemble des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des écosystèmes plus ou moins modifiées par l'action de l'homme. Les sciences de l'environnement étudient les conséquences de ces modifications sur l'homme, les plantes, les animaux aussi bien à l'échelle de l'individu ou de l'écosystème que de toute la biosphère, il est important de distinguer les sciences de l'environnement de l'écologie qui étudie des milieux naturels ou peu modifiés.

A cause de l'accroissement démographique et du développement de l'activité économique industrielle, accompagnés d'une forte augmentation de la consommation et l'aménagement des territoires, la quantité de la pollution rejetée dans le milieu naturel devenue incompatible avec les capacités auto épuratoires de notre environnement. Et vue la mauvaise gestion de l'Homme sur tous les plans à travers ses étapes de développement, l'Homme a influencé négativement son environnement naturel.

Le mot pollution vient du latin *pollutio* qui signifie « salissure », « souillure ». Une définition du terme pollution pourrait être un phénomène ou élément perturbateur d'un équilibre établi et plus particulièrement si cet élément est nuisible à la vie. Définition de la pollution donnée par la Directive européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 : "Introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier".

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).

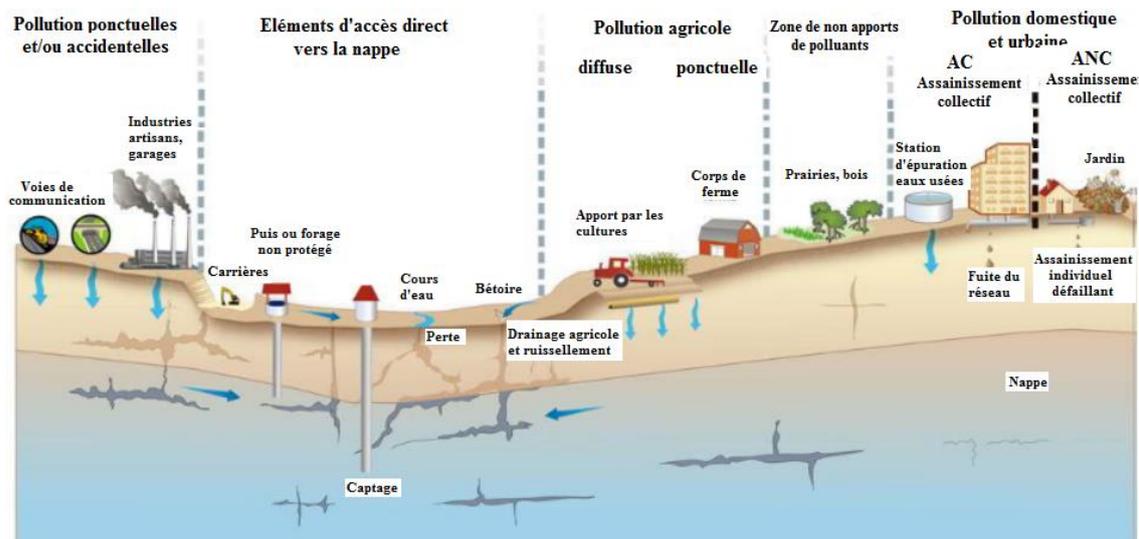


Figure IV. 1. Différentes formes de pollution

IV. 2. Différentes formes de pollution

Les différentes formes de pollution selon que l'on s'intéresse au milieu pollué ou aux types de polluants :

IV. 2. 1. Pollution du sol [23]

Le sol est un milieu de l'environnement en lien étroit avec les autres milieux (eau, air). Les possibilités d'exposition sont multiples, que ce soit par ingestion ou par inhalation et les plus fréquentes sont :

- L'ingestion de terre par les jeunes enfants, particulièrement exposés en raison de leur comportement. Lors de jeux à même le sol, ils peuvent ingérer directement de la terre déposée sur les mains ou les objets qu'ils portent à la bouche
- L'ingestion de produits végétaux alimentaires cultivés sur des terres polluées
- L'ingestion d'eau, conséquence d'un transfert d'un produit présent dans le sol vers la nappe phréatique

- L'inhalation de poussières émises par les sols pollués
- L'inhalation, conséquence de la volatilisation éventuelle du polluant à partir du sol.

De plus, plusieurs sources peuvent être à l'origine de la contamination des sols :

- Naturelles, liées à la nature géologique des roches et leur évolution dans le temps ;
- Humaines, associées notamment à des exploitations industrielles actuelles ou anciennes.

IV. 2. 2. Pollution de l'eau [23]

Elle se manifeste par une présence dans l'eau (océans, mers, lacs, fleuves, nappes phréatiques, etc.) des éléments toxiques (Industriels, Urbains, Agricoles, Produits phytosanitaires, Hydrocarbures) qui engendrent la destruction de la faune et de la flore. Elle peut rendre l'eau impropre à la consommation ou à la baignade.

Nous citons quelques types de pollution de l'eau :

- La pollution tellurique des mers et des océans est une pollution d'origine terrestre. Elle est apportée par les cours d'eau et les canalisations qui se déversent dans la mer.
- La pollution thermique des eaux est l'augmentation de la température causée par des rejets d'eaux de refroidissement, en particulier des centrales thermiques et nucléaires. Elle peut causer des dommages importants à la faune des cours d'eau. Le réchauffement climatique provoqué par les gaz à l'effet de serre est une autre forme de pollution thermique qui concerne la terre toute entière.
- Pollution par les déchets solides ; des dizaines de tonnes de déchets déversées dans les océans par les paquebots de croisière aux milliers de bouteilles, mouchoirs, matières plastique, polymères... jetés dans la nature, la pollution par les déchets solides vient dénaturer gravement les eaux et les sols de la planète.

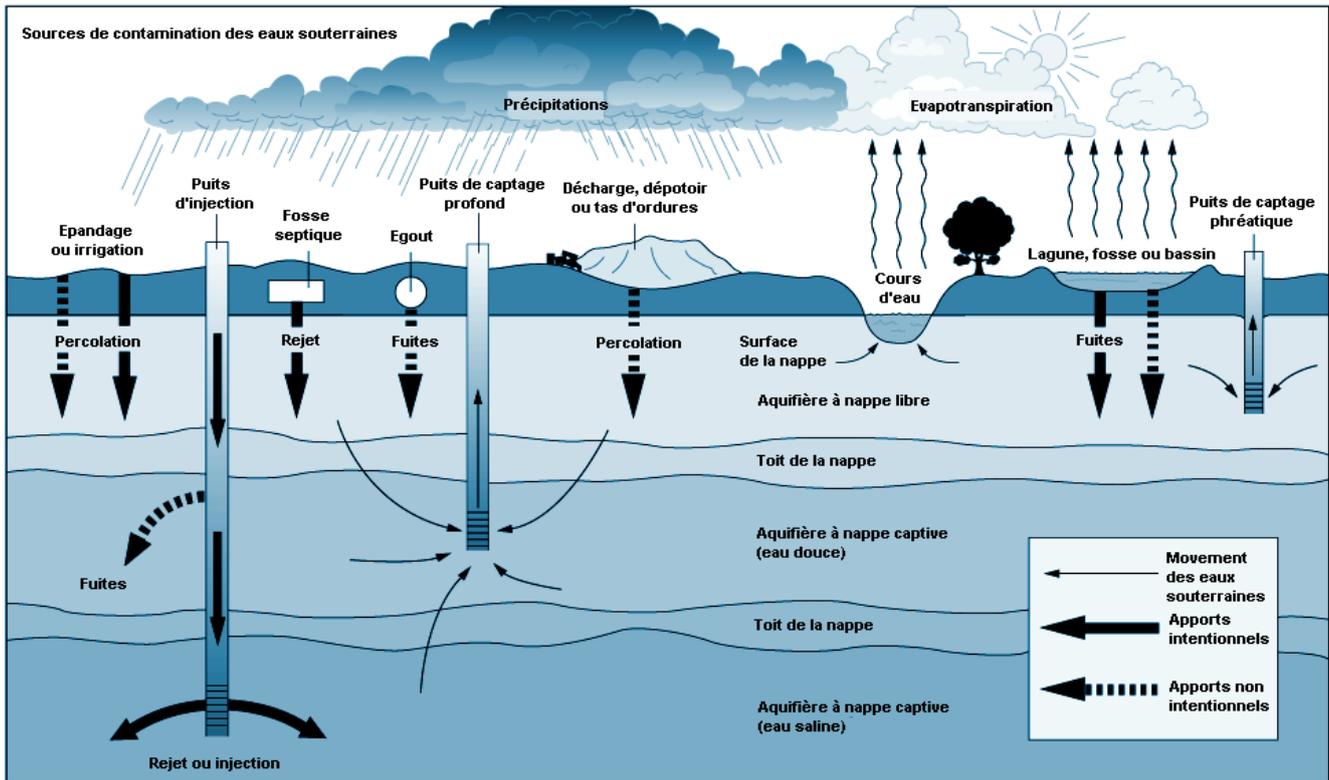


Figure IV. 2. Cycle hydrologique et sources de contamination des eaux souterraines

IV. 2. 3. Pollution atmosphérique [23]

Elle se manifeste par la présence dans l'air de particules ou de gaz nocifs ou non, qui entraînent, en fonction de leur concentration, un inconvénient quelconque.

Exemples : oxydes de carbone, de soufre et d'azote, poussières, particules radioactives provoquées par les rejets :

- Des installations de chauffage,
- Des moteurs à combustion,
- Des installations industrielles,
- Des incinérateurs.



Figure IV. 3. Pollution de l'air

IV. 3. Pollutions liées à la production et à l'utilisation d'énergie

- Les combustibles fossiles (le pétrole, le charbon et le gaz) ont des répercussions graves sur l'environnement (7,6 milliards de tonnes d'équivalent carbone sous forme de CO₂ dans l'atmosphère). Ils génèrent des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique et sont également à l'origine d'une pollution par particules fines. Outre la question de la sécurité de l'approvisionnement, ces sources d'énergie s'épuisent rapidement sans qu'il existe de possibilité naturelle de renouvellement.
- À cela, il faudrait ajouter l'usage du bois comme combustible dans les divers pays en développement (3 milliards de tonnes par an), qui est la source d'une déforestation massive et d'une pollution sous-estimée de l'intérieur des habitations en raison des mauvaises combustions.

- La pollution chimique et autres nuisances engendrées par la production de l'énergie, on ne saurait omettre l'une d'entre elles, particulièrement importante, la pollution thermique des eaux, qui est de nature physique.
- Les centrales nucléaires modernes, envisagées par certains Etats européens comme une solution possible à moyen terme, évitent d'augmenter la pollution atmosphérique (par gaz à effet de serre et particules fines) mais posent toujours le problème non résolu à ce jour du traitement et du stockage des déchets nucléaires radioactifs. C'est pourquoi une évaluation urgente doit être entreprise sur le stockage sûr et à long terme des combustibles usagés et d'autres déchets nucléaires produits. Par ailleurs, les accidents naturels, technologiques ou dus à des actes de terrorisme peuvent entraîner des conséquences catastrophiques pour la sûreté des populations. Le risque de contamination radioactive peut aussi nuire à l'image des produits agricoles et alimentaires de qualité provenant des zones d'implantation de centrales nucléaires.

➤ *Quelques chiffres*

1022: C'est le nombre de tonnes de CO₂ relâchées chaque seconde par l'homme. Cela fait plus de 32 milliards de tonnes chaque année, et le chiffre croît année après année.

6: Un barbecue pollue 6 fois plus qu'un incinérateur de déchets, si l'on prend en compte le premier mètre cube de pollution émanant des appareils.

48%: de la pollution électrique vient de la pollution lumineuse. Les lampadaires à boule sont les plus polluants, les moins polluants étant les perches à ampoule confinée.

56,6%: Le gaz, le pétrole et le charbon produisent à eux seuls 56,6% de la quantité mondiale de CO₂ présent dans l'atmosphère.

25: C'est le nombre de tonnes de CO₂ qu'un américain moyen produit chaque année, contre 8 tonnes pour un français et 6 tonnes pour un chinois.

9 milliards: C'est le nombre de tonnes de CO₂ libéré dans l'atmosphère en 2005.

390: C'est le nombre de kilos de déchets que jette en moyenne un français chaque année, soit 6 mètres cube.

IV. 4. Conclusion

La pollution produit des phénomènes nocifs et destructeurs pour l'environnement, la santé et la vie en général. C'est le résultat de ces phénomènes qui a poussé les humains à prendre la pollution au sérieux et à préserver l'environnement.

Dans cette partie, les différentes formes et sources de pollution ont été bien détaillé. Il existe plusieurs stratégies techniques pour réduire la pollution dans les systèmes industriels. Celle-ci seront présentés dans le chapitre suivant.



V. 1. Introduction

Usuellement, un déchet (détritus, ordure, résidu, etc.) désigne : la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui en reste après son utilisation. De nos jours, ce terme tend à désigner n'importe quel objet ou substance ayant subi une altération d'ordre physique, chimique, ou en tant qu'il est perçu, le destinant à l'élimination ou au recyclage. Selon une formule employée en logistique " le meilleur déchet, c'est celui que l'on ne produit pas", qui veut dire : pour moins jeter, on commençait par moins consommer. L'augmentation de la population et modes de consommation modernes font que les volumes de déchets à traiter chaque année ne cessent d'augmenter.

V. 2. Différents types de déchets [24]

Les déchets peuvent être classés en 2 grandes catégories :

➤ Selon l'origine du déchet :

- Déchets ménagers et assimilés (DMA).
- Déchets industriels banals (DIB) et spéciaux (DIS).
- Déchets de l'agriculture.
- Déchets de la construction et de la démolition (déchets inertes).
- Déchets d'activité de soins (DAS) ou déchets infectieux (DASRI).
- Déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE).
- Déchets de l'automobile.

➤ Selon la nature du danger :

- Déchets radioactifs.
- Déchets dangereux.
- Déchets inertes.
- Déchets ultimes.
- Déchets non dangereux.

Généralement on considère trois grandes catégories de déchets :

V. 2. 1. Déchets inertes (DI)

Ce type de déchets ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Les déchets inertes font donc partie des déchets non dangereux.



Figure V. 1. Déchets inertes

V. 2. 2. Déchets industriels banals (DIB)

Ils ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à des ordures ménagères. Les DIB sont triés et revalorisés (recyclage, compostage, incinération) ou éventuellement stocké en Centre de Stockage des Déchets Ultimes (CSDU). Ils sont traités de la même façon que les ordures ménagères.

V. 2. 3. Déchets dangereux

Ces déchets issus de l'activité industrielle ayant un caractère polluant pour l'environnement. Ils représentent un risque pour la santé ou l'environnement et nécessite un traitement adapté :

- Traitement thermique ;
- Traitement physico-chimique minéral ou organique ;

- Traitement biologique ;

Les résidus de traitement des déchets polluants sont stabilisés avant d'être enfouis en CSD. Ils doivent être entreposés sous abri ou sur l'aire de rétention, et étiquetés correctement. Ils doivent suivre un circuit d'élimination spécifiés par un Bordereau Suivi des Déchets Dangereux (BSDD) remis par un collecteur spécialisés. Leur élimination nécessite des précautions particulières, certains doivent être stabilisés avant stockage en CSDU.

Il y des déchets :

- DTQD (Déchets Toxiques en Quantité Dispersée) lorsqu'ils sont produits en petites quantité.

- DID (Déchets Industriels Dangereux) (anciennement déchets Industriels Spéciaux DIS) lorsqu'ils sont produits en plus grande quantité.

V. 3. Traitement des déchets

Le traitement des déchets débute après les opérations de collecte, de transport et de prétraitement. Il est réalisé par des opérateurs privés ou publics, dans le cadre du service public ou dans un cadre privé.

Plusieurs types de traitement existent, ils sont très variables, souvent adaptés à un type de déchets. Les installations de traitement de déchets sont, pour la plupart, des installations classées pour la protection de l'environnement. Les traitements des déchets peuvent être soit valorisés (valorisation matière, valorisation énergétique) ou élimination (stockage) [25].

V. 3. 1. Valorisation

La valorisation est définie comme toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets [26].

V. 3. 1. 1. Valorisation matière

Toute opération de valorisation autre que la valorisation énergétique. Elle comprend notamment la préparation en vue de la réutilisation, le recyclage, le

remblayage et d'autres formes de valorisation matière telles que le retraitement des déchets en matières premières secondaires à des fins d'ingénierie dans les travaux de construction de routes et d'autres infrastructures.

Ce type de valorisation comprend :

Recyclage

Toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblayage ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage ;

Exemple : Refonte de bouteilles pour en faire des neuves.

Réemploi

Nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation. Dans le langage courant, le réemploi est associé aux objets dits d'occasion ou de seconde main.

Exemple : Consigne des bouteilles

Régénération

La régénération est basée sur des procédés de raffinage d'un fluide ou d'un solide, impliquant l'extraction de la fraction polluante ou indésirable contenue dans le déchet. La régénération peut concerner les huiles, solvants, les gaz fluorés, les plastiques, les catalyseurs, etc. Elle peut s'opérer par filtration, déshydratation sous vide, raffinage, etc.

Réutilisation

La réutilisation est définie comme une opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau. L'opération de réutilisation est toujours précédée d'une opération de préparation, à minima, par une opération de contrôle.

Exemple : Pneu réutilisé pour protéger la coque des bateaux

V. 3. 1. 2. Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à utiliser le pouvoir calorifique du déchet en le brûlant et en récupérant cette énergie sous forme de chaleur ou d'électricité.

On peut distinguer deux sortes de valorisation énergétique :

- La valorisation par traitement thermique (incinération, co-incinération, pyrolyse et gazéification);
- La valorisation du biogaz issu notamment des installations de stockage de déchets non dangereux et de la méthanisation des déchets organiques.

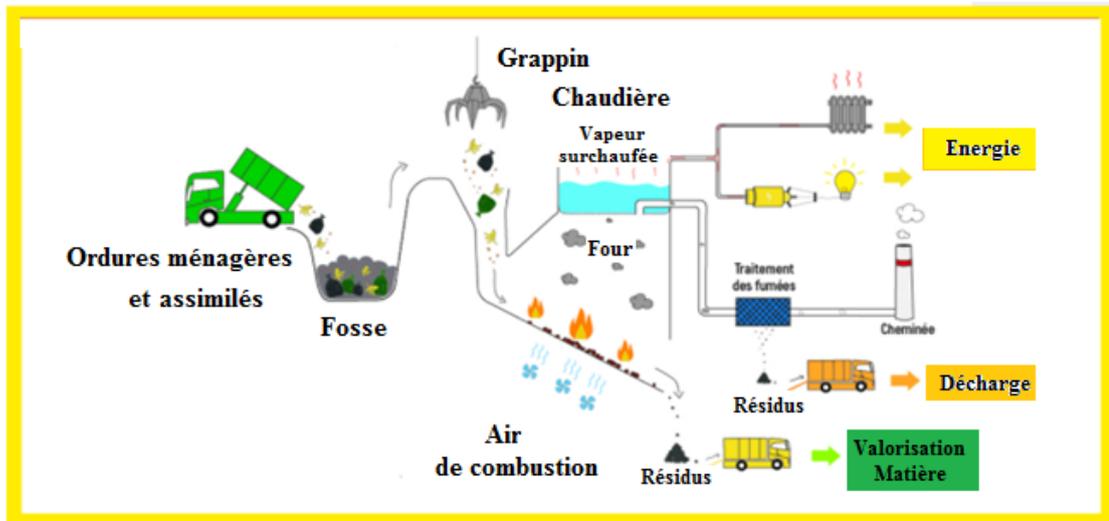


Figure V. 3. Cycle de valorisation énergétique

V. 3. 2. Stockage

Si le déchet ne peut être valorisé, il est alors stocké dans des centres de stockages adaptés à sa dangerosité : les Centres Stockage des Déchets Ultimes (CSDU), anciennement Centre d'Enfouissement Technique (CET).

V. 4. Conclusion

L'augmentation incessante du volume et le caractère dommageable des déchets sont devenus des préoccupations majeures de la politique de l'environnement et de la lutte pour l'amélioration de notre cadre de vie.

La gestion des déchets est une solution utilisée afin d'assurer la préservation de l'environnement. Le traitement de déchets est bénéfique pour l'environnement, et permet de réduire la pollution. L'avantage de ce traitement est la possibilité d'utiliser les produits recyclés de nouveau.



VI. 1. Introduction

De nombreuses activités humaines, qu'elles soient industrielles, chimiques, agricoles ou domestiques, sont responsables de dégradations de l'environnement (réchauffement de la planète, changements climatiques et perturbations des écosystèmes, diminution de la couche d'ozone, pollution des sols et des eaux mais également de l'air, etc.). Ces « menaces environnementales » constituent un risque majeur pour la santé de l'homme (apparition et/ou recrudescence de pathologies diverses : maladies cancéreuses, maladies infectieuses, malformations congénitales, pathologies cardio-vasculaires et respiratoires, diminution de la qualité de vie et du bien-être, etc.). Sur le plan éthique et politique, « le droit à une vie saine » est reconnu comme un droit fondamental de l'être humain, aux plans international comme national: « Chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de sa santé ». Le droit de chacun à un « environnement permettant la réalisation du niveau le plus élevé de santé et de bien-être » ainsi que le devoir de chacun de « contribuer à la protection de l'environnement dans l'intérêt de sa propre santé et de la santé de chacun ».

VI. 2. Principaux risques actuels pour l'environnement et la santé des populations [27]

Deux types de risques sont abordés:

- Les risques pour la santé liés à la dégradation de la qualité de l'environnement quotidien et en particulier des différentes parties de la biosphère (l'air, l'eau, les sols)
- Les risques liés à des phénomènes de grande ampleur, plus visibles, que les précédents, de type «catastrophiques » mettant en péril les populations et les biens.
- Les polluants sont absorbés puis accumulés et concentrés dans les organismes animaux et végétaux.

VI. 2. 1. Effet sur l'atmosphère

Les effets des polluants sur l'atmosphère sont de plus en plus évidents et se matérialisent essentiellement par :

VI. 2. 1. 1. L'accroissement de l'effet de serre

Commençons par définir et présenter l'effet de serre. Il s'agit d'un effet naturel, à l'origine, bénéfique à la vie humaine puisqu'il permettait à l'eau de rester dans l'état liquide et minimisait le risque de glaciation. Il s'agit des gaz contenus à l'état de trace dans l'atmosphère (vapeur d'eau, CO₂, méthane, composés sulfurés et composés azotés). L'augmentation de la concentration en Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère, due à l'activité humaine conduit à la présence d'effet de serre additionnel. Pour évaluer la croissance rapide des (GES), il suffit d'observer la croissance actuelle des éléments qui le constituent.

L'effet de serre additionnel a pour effet un réchauffement global de la planète. Depuis 1990, la planète a connu une hausse globale de sa température, passant de 0,3 à 0,7°C en 20 ans. Le groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat GIEC nous annonce une augmentation moyenne de la température allant de 1,4 à 5,8°C de la température moyenne du globe. Cette augmentation n'est pas uniforme bien au contraire, on va assister à des événements extrêmes (tempête, cyclone, canicule, sécheresse, coup de froid, etc). Le cycle de l'eau va être modifié ce qui conduira à une sécheresse accrue dans certaines zones ; inondation et crues dans d'autres. Ils préconisent certains déséquilibres si la température augmente de 2,5° d'ici la fin de ce 21^{ème} siècle [28] :

- Augmentation moyenne de 65cm des niveaux marins (inondation et disparition de certaines zones côtières ;
- Fonte de 50% des glaciers mondiaux
- Changement dans les débits des rivières et les niveaux des lacs
- Augmentation générale des températures et des précipitations, favorisant le développement des maladies et des parasites.

VI. 2. 1. 2. L'affaiblissement de la couche d'ozone stratosphérique

Se trouvant à près de 90% dans la stratosphère, la couche d'ozone se trouve entre 15 et 40 km d'altitude. Il s'agit d'un dérivé de l'oxygène qui joue un rôle important pour la biosphère en absorbant une partie du rayonnement solaire ultraviolet et en éliminant les courtes longueurs d'onde étant comprises entre 240 et 300 nanomètres. Ces rayonnements et ces ondes sont reconnus à l'origine de maladies cancérogènes et mutagènes, susceptibles de détruire les cellules vivantes. En 1985, on découvre un trou dans l'ozone d'une surface supérieure à celle des États-Unis d'Amérique au-dessus du pôle sud. Les premiers accusés dans l'apparition de ce trou sont les CFC (Chlorofluorocarbure), gaz très utilisé dans l'industrie avant 1987, remplacé par le HCFC moins nocifs [28].

VI. 2. 2. Effet sur le sol et sur les milieux aquatiques

L'homme, par ses fonctions biologiques, rejette des déchets organiques qui seront éliminés dans les milieux récepteurs. Ces déchets, plus ou moins naturels, peuvent être toxiques dans le cas d'une grande population et d'un manque de traitements appropriés. Les activités industrielles sont beaucoup plus polluantes à cause de la consommation et de la production de produits chimiques. Les déchets évacués sont de plus en plus toxiques, leur stockage dans le milieu récepteur est nocif aussi bien pour l'environnement que pour l'homme. Citons à titre d'exemples, l'effet du déversement d'une grande quantité de cyanure dans la rivière hongroise Tisza puis dans le fleuve du Danube en mars 2000 et ce, sur des centaines de kilomètres.

On peut aussi citer le cas de la fuite d'isocyanate de méthyle dans une usine de Bhopal, en Inde. Cet accident a tué 3500 personnes et en a blessé plusieurs centaines de milliers. Autres exemples d'effets nocifs des produits chimiques mais cette fois à long terme (durant plus de trois décennies) est celui du rejet de mercure d'une usine à Minamata, au Japon qui a causé la mort et les maladies neurologiques. On peut aussi citer les Polluants Organiques Persistants (POP) à qui on lie généralement le phénomène de bioconcentration. Ces substances se lient généralement à la graisse des tissus animaux et donc plus ils vieillissent plus ils sont contaminés. Ils peuvent même se concentrer dans les chaînes alimentaires et constituer une menace pour les grands prédateurs (cas d'un Ours blanc qui mangerait des poissons contaminés à l'un des POP) [27].

Beaucoup de désastres écologiques menacent l'équilibre des systèmes et les rendent vulnérables.

VI. 2. 3. Effet sur la santé humaine

Les premières préoccupations environnementales sont relatives aux atteintes à la santé humaine, bien plus qu'à la destruction des milieux ou la réduction de la biodiversité. Une morbidité importante (la fumée des usines, l'émission des tanneries, etc.) générée par certains processus de production est apparue avant même la révolution industrielle. De même, les déchets des villes et les égouts furent rapidement identifiés comme une source de maladies. Grâce au progrès de la médecine, la santé humaine s'est beaucoup améliorée et l'espérance de vie a augmenté. Il faut reconnaître toutefois, que plusieurs maladies infectieuses ont apparu ainsi que la propagation du cancer sous ses différentes formes.

L'activité industrielle, l'émission des gaz toxiques, des déchets liquides et solides dans l'environnement expliquent l'apparition de plusieurs maladies et cancers. La recherche médicale a permis de vaincre certaines de ces maladies, d'en réduire l'effet d'autres et elle demeure incapable de résoudre d'autres cas plus compliqués. L'effet le plus tangible de la pollution sur la santé humaine est celui de l'apparition de plusieurs formes d'allergies chroniques.

VI. 3. Les 10 sites les plus pollués au monde

Ces dix sites les plus pollués au monde qui se trouvent dans huit pays pollués menacent gravement la santé de centaines de milliers de personnes par inhalation directe, ingestion d'aliments ou contact cutané [28].

Parmi ces sites, figurent :

- Le fleuve Matenza- Riachuelo en Argentine. Sur 64 kilomètres, quelque 5 000 industries déversent leurs déchets entre Buenos Aires et le Rio de la Plata. Plus de 20000 personnes, la plupart vivant dans des bidonvilles, y respirent des composés organiques volatils (VOC), dont le toluène ;
- Les tanneries du cuir au Bangladesh, en particulier à Hazaribagh. 160 000 personnes y sont concernées en des installations vétustes ;

- Le fleuve Citarum, en Indonésie. Plus de 500 000 personnes, cinq millions indirectement, sont exposées à plusieurs produits chimiques (plomb, cadmium, chrome, pesticides) ;
- Les mines d'or de la province de Kalimantan en Indonésie. 225 000 personnes sont exposées au mercure ;



Figure VI.1. Exemples des sites de pollution u monde

- La décharge géante de matériel électronique d'Agbogbloshie, dans la banlieue d'Accra au Ghana 40000 personnes sont exposées à la pollution au plomb, au mercure et au cadmium ;
- La pollution du sol liée au pétrole dans le delta du Niger au Nigeria ;
- Les résidus en plomb de l'exploitation de mines (aujourd'hui fermées) à Kabwe, la seconde ville de Zambie ;
- La ville de Dzerzhinsk (Russie), centre de l'industrie chimique. Entre 1930 et 1998, quelque 300 000 tonnes de produits chimiques ont été traitées de manière impropre. Des traces de 190 produits toxiques y ont été identifiées dans la nappe phréatique, menaçant quelque 300 000 personnes ;
- La ville de Norilsk, en Sibérie (Russie), par l'extraction du nickel et du cuivre qui provoque une pollution de l'air ;
- La centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine. Dix millions de personnes sont toujours les victimes potentielles de l'explosion du réacteur nucléaire qui a eu lieu le 26 avril 1986.

VI. 4. Lutte contre la pollution

- Bon service d'assainissement ;
- Approvisionnement en eau ;
- Promotion de l'hygiène ;
- Réduction de la pollution de l'air (domestique et urbain) ;
- Drainage des eaux pluviales (et la prévention des inondations) ;
- Gestion des déchets solides ;
- Gestion des déchets hospitaliers et toxiques ;
- Contrôle et l'inspection des produits alimentaires ;
- Réglementation de la construction ;
- Éradication des vecteurs de maladie (rats, moustiques) ;
- Santé et la sécurité au travail ;
- Sécurité routière.

En conséquence, les mesures de réduction de la pollution de l'air conduisent aussi à la réduction du changement climatique. Les politiques de réduction de la pollution de l'air ont porté leurs fruits pour le dioxyde de soufre. Toutefois, des

mesures de réduction supplémentaires sont nécessaires pour l'azote réactif, pour les précurseurs de l'ozone et pour les particules.

VI. 5. Conclusion

L'énergie électrique est essentielle à la vie et au développement économique. Au niveau mondial, sa consommation a été augmentée, cela a permis d'accroître le niveau de vie et l'espérance de vie des habitants de la terre. Néanmoins, ces progrès fulgurants se sont faits avec un impact de plus en plus important sur l'environnement. La production, le transport et l'utilisation de l'énergie produit des déchets, des rejets et de multiples pollutions dans l'atmosphère, l'eau et le sol.

La surveillance des émissions et le contrôle de la pollution sont des priorités dans le monde entier pour aider à lutter contre le changement climatique. L'industrie essaie de minimiser la pollution et les déchets des procédés qu'elle utilise. Cette réduction peut être volontaire mais elle est aussi souvent imposée pour satisfaire à des normes. Si cette réduction est économiquement acceptable, l'industriel va modifier ses procédés ou les changer pour réduire pollution, rejets et déchets.

Le sujet du développement des énergies renouvelables et l'effet des énergies non renouvelables sur l'environnement occupe une place importante dans les plans d'études. Le secteur énergétique occasionne des problèmes environnementaux immenses, aiguise les changements climatiques et touche aussi des droits humains. Les agents énergétiques conventionnels (les énergies fossiles) ne sont pas adaptés à l'avenir, il est clair qu'ils ont contribué au grand avancement de notre monde moderne. Mais malheureusement, ceci a coûté cher à notre environnement, notre santé, et à notre vie. Un coût tellement cher, que nous n'avons plus les moyens de payer. Il est temps d'évoluer au-delà des sources d'énergies polluantes et dangereuses et de se tourner vers les énergies renouvelables, ce qui implique la nécessité d'une révolution énergétique, celle-ci est d'ailleurs déjà commencée. Il est possible aujourd'hui de relever le défi climatique en sortant du pétrole, du charbon et du nucléaire et en assurant à la planète un avenir énergétique durable grâce aux énergies renouvelables. Il s'articule autour de cinq principes clés : la justice et l'équité, le respect des limites naturelles, l'élimination des énergies polluantes, les énergies renouvelables et la décentralisation, la distinction entre croissance économique et utilisation des combustibles fossiles.

D'après les informations présentes dans ce document, les étudiants peuvent comprendre les liens entre l'énergie, les changements climatiques et l'économie. De plus, ils peuvent réfléchir d'une manière plus approfondie sur la question d'un approvisionnement énergétique adapté à l'avenir, réfléchir aussi sur leur comportement personnel (mobilité, électricité) et à le mettre en relation avec les visées d'un approvisionnement énergétique durable, et prendre conscience des moyens d'action au niveau individuel et collectif sous l'angle des changements climatiques.

- [1] J.L. LILIEN, “Transport et distribution de l’énergie électrique”, Cours, 2013.
- [2] L. Freris, D. Infield, “ Les énergies renouvelables pour la production d’électricité”, Technique et ingénierie, Dunod, 2019.
- [3] V. Crastan, “Centrales électriques et production alternative d’électricité”, Lavoisier, 2009.
- [4] J. P. Blugeon, “Produire son électricité avec les énergies solaire et éoliennes”, ULMER , 2008.
- [5] Labouret et villoz, Energie solaire photovoltaïque, 4ed, Dunod, 2009-10.
- [6] <http://tperama-energies-renouvelables.e-monsite.com>
- [7] N. Jenkins, M. Villos, “ Électrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération”, Dunod, 2008.
- [8] <https://www.asn.fr>
- [9] PC Crouse. Energy resources : Fossil fuels: oil. Mechanical Engineering Handbook. CRC Press. Frank Kreith, Boca Raton, 1999.
- [10] R. Reuther. *Energy resources : Fossil fuels: coal*. Mechanical Engineering Handbook. CRC Press. Frank Kreith, Boca Raton, 1999.
- [11] PC. Crouse, Energy resources: Fossil fuels: natural gas, Mechanical Engineering Handbook. CRC Press. Frank Kreith, Boca Raton, 1999.
- [12] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php/> stockage, “Le contexte de développement du stockage”.
- [13] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php>, Bernard Multon et Jacques Ruer, “*Stocker l’électricité : oui c’est indispensable et c’est possible*”.
- [14] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php/> stockage-technologies, Sénat, Commission d’enquête sur le coût réel de l’électricité.
- [15] <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php/> stockage-technologies, Regensys, Les différentes technologies stationnaires de stockage de l’électricité.
- [16] BP Statistical Review of world Energy, Juin 2020.
- [17] BP Statistical Review 2018.
- [18] I. Lakhehal, C. Toriki, 20^{ème} Journée de l’énergie, Alger 2016.
- [19] Resources, Production and demand, OECD Nuclear Energy Agency/ international Atomic Energy Agency, 2018.

- [20] C. Behloul, E.O. Merouani, N. Faradji, C.E. Chitour, “L’état des lieux de l’énergie en Algérie”, wordpress. 2018.
- [21] S. Ouali, A. Khellaf, “Etude géothermique du sud de l’Algérie”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 297 – 306.
- [22] L. Boualem, F. Guerroudj, S. Loun, 21^{ème} journée de l’énergie : Journée du Développement Humain Durable, Alger 2017.
- [23] Olivier Atteia, Chimie et pollutions des eaux souterraines, Ed. Lavoisier & Doc, 2015.
- [24] D. Zmirou, M. Beausoleil, et al., "Déchets et sols pollués", Edisem/Tec, 2003.
- [25] Noëlle Lacourt, Joëlle Perbet, Etienne Anquetil, Catherine Lenne, "POLLUTION DES SOLS ET GESTION DES DÉCHETS", Projet Partenarial École des Sciences - Entreprise Aubert et Duval, 2016-2017.
- [26] Article L541-1-1 du Code de l'environnement
- [27] <https://atmo-reunion.net/La-pollution-un-risque-pour-notre>
- [28] <http://www.topito.com/top-sites-plus-pollues-monde-toxique-radioactif>