

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ziane Achour de Djelfa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

جامعة الجلفة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الكهربائية



POLYCOPIÉ DE COURS

Par :
Dr. Obeidi Thameur

Du module :
«ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT»

Destiné aux étudiants de :
Deuxième année Licence

Filière :
Electronique et Télécommunication

Année universitaire 2023 / 2024

Avant-propos:

Ce cours «ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT» est un module semestriel (3^{er} semestre), destiné aux étudiants de la deuxième année Licence Electronique et Télécommunication

Le but de ce cours est d'initier les étudiants aux différentes énergies existantes (fossiles et renouvelables), leurs sources et l'impact de leurs utilisations sur l'environnement. Pour cela, le cours (dans son ensemble), est présenté sous forme d'une description détaillée des ressources d'énergies « sources, technologies, avantages, inconvénients, consommations, réserves et techniques de stockage impacte de pollutions ,... ».

Puisque le défi mondial actuel est la production de l'énergie non polluante, nous nous focalisons dans ce cours, sur les énergies renouvelables, en tenant en compte du programme officiel.

Notre cours comporte sept chapitres :

Chapitre 1: Généralité Énergie & Environnement

Chapitre 2: Les différentes ressources d'énergie

Chapitre 3: Stockage de l'énergie

Chapitre 4: Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

Chapitre 5: Les différents types de pollutions

Chapitre 6: Détection et traitement des polluants et des déchets

Chapitre 7: Impact des pollutions sur la santé et l'environnement.

Table des matières

Avant-propos:	I
Table des matières	II
Chapitre 1	
Généralité Énergie & Environnement	
1. L'énergie,	4
1.1. Définitions	4
1.2. Caractéristiques de l'énergie.....	4
1.3. Formes d'énergie	8
2. L'environnement,	10
2.1. Définitions	10
2.2. Sciences de l'environnement	10
2.3. Gestion de l'environnement	11
Chapitre 2	
Les différentes ressources d'énergie	
1. Introduction.....	12
2. Ressources énergétiques.....	13
2.1. Ressources fossiles	13
2.2. Ressources fissiles	13
- Le charbon.....	13
- Le pétrole	14
- Le gaz naturel.....	14
2.3. Vent (Énergie éolienne)	14
2.4. Biomasse	16
2.5. Terre (Énergie géothermique)	22
2.6. Soleil (Énergie solaire)	24
2.7. Eau	28
2.8. Marées	30
Chapitre 3	
Stockage de l'énergie	
1. Introduction.....	32
2. Définitions	33
3. Pourquoi stocker l'énergie électrique ?	33
4. Comment stocker l'énergie électrique ?	33
5. Techniques de choix des technologies de stockage	34
6. Grandes formes de stockage.....	34
6.1. Stockage sous forme d'énergie chimique	34
6.2. Stockage sous forme d'énergie mécanique	35
6.3. Stockage d'énergie calorifique.....	35
Chapitre 4	
Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie	
1. Introduction.....	36
2. Consommation énergétique mondiale	36
2.1. Consommation énergétique selon le type d'énergie utilisé	37
2.2. Consommation énergétique selon le secteur	37
2.3. Consommation d'énergie par habitant	38
3. Réserves des ressources d'énergie	39

4.	Évolutions des ressources d'énergie	40
5.	Statistique mondiale de développement d'énergie renouvelables	41
Chapitre 5		
Les différents types de pollutions		
1.	Définitions	43
2.	Causes de la pollution	43
3.	Sources de la pollution de l'air anthropique	43
4.	Emission et immission	43
5.	Types de pollution	44
6.	Classification de pollution	44
Chapitre 6		
Détection et traitement des polluants et des déchets		
1.	Introduction	46
1.1.	Dans l'eau et dans les sols	46
1.2.	Téledétection de gaz atmosphériques	46
1.3.	Système de mesure de la concentration particulaire à l'émission pour les cheminées industrielles	47
2.	Classement des différentes techniques de dépollution	48
3.1.	Classement en fonction de la nature des procédés employés	48
3.2.	Classement en fonction du lieu de traitement	49
3.3.	Classement en fonction du devenir des polluants	49
Chapitre 6		
Impact des pollutions sur la santé et l'environnement		
1.	Introduction	50
2.	Effets de la pollution	50
3.	Impact sur la santé	51
3.1.	Appauvrissement de la biodiversité	51
3.2.	Maladies cardio-vasculaires	51
3.3.	Cancers	51
3.4.	Maladies respiratoires	52
3.5.	Allergies	52
4.	Quantification	53
5.	Impact sur l'environnement	53
	Bibliographie	56

Chapitre 1

Généralité Énergie & Environnement

1. L'énergie,

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...) . Les besoins mondiaux en énergie ont augmenté de façon considérable au cours du vingtième siècle et le développement des pays émergents comme la Chine permet de prévoir une augmentation encore plus rapide dans les prochaines décennies. L'Agence Internationale de l'Énergie prévoit que la demande des vingt-cinq prochaines années nécessitera une production égale à celle des cent cinquante années d'exploitation des combustibles fossiles. Mais les ressources ne sont pas inépuisables : ces produits sont formés par une succession de mécanismes biologiques et géologiques qui mettent des millions d'années à s'accomplir, ces ressources ne sont donc pas renouvelables à une échelle de temps humaine

1.1. Définitions

Plusieurs définitions peuvent être attribuées au terme « énergie », selon le domaine ou/et le contexte d'étude. Par exemple, les définitions suivantes données par la littérature peuvent être citées :

- L'énergie est tout ce qui permet d'agir : sans elle, rien ne se passe, pas de mouvement, pas de lumière, pas de vie.
- Autrement dit, l'énergie caractérise la capacité à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité.
- En outre, la réalisation de plusieurs phénomènes naturels n'est permise que par l'énergie : croissance des plantes, vent, courants des rivières, vagues, chute d'objets, ...
- Un tel terme est utilisé également en technologie et en économie afin d'évoquer les ressources énergétiques (consommation, développement, épuisement et impact écologique).

1.2. Caractéristiques de l'énergie

1.2.1. Énergies primaires

Les énergies primaires sont celles que l'on trouve dans la nature (à l'état brut) comme par exemple :

- L'énergie des muscles ou encore l'énergie musculaire issue de la nourriture.
- L'énergie hydraulique fournie par le mouvement de l'eau.
- L'énergie du vent ou encore l'énergie éolienne.
- L'énergie des combustibles (pétrole, gaz naturel, charbon, biomasse ..)

Cependant, l'électricité statique et l'électricité des éclairs, ne sont pas des énergies primaires, car elles ne sont pas exploitables par l'homme.

A l'échelle industrielle, les énergies primaires sont réparties en :

- Énergies Renouvelables (soleil, eau, vent, ..).
- Énergies non renouvelables (énergies fossiles : pétrole, charbon, gaz et énergie nucléaire).

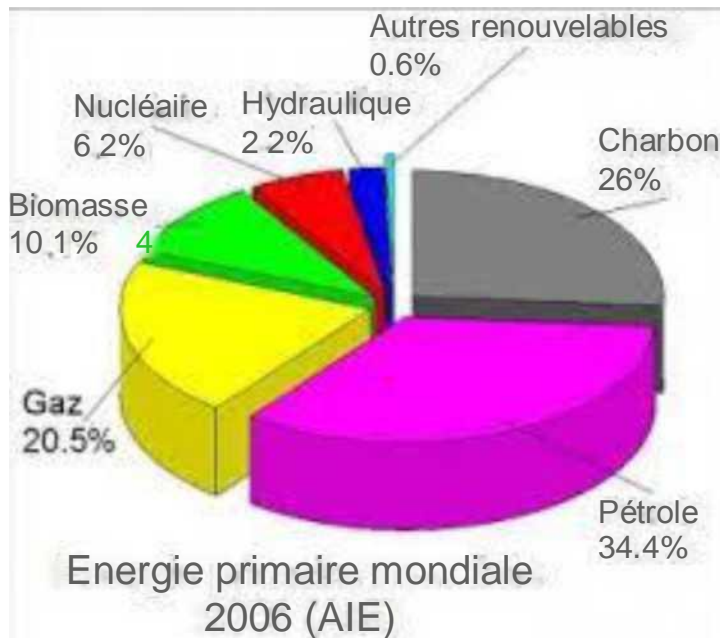


Figure 1. Énergie primaire mondiale 2006. (Source : AIE)

1.2.2. Énergies secondaires

Les énergies secondaires résultent des transformations faites par l'être humain sur les énergies primaires comme par exemple :

- L'électricité : produite à partir du gaz, du charbon, de l'eau, du vent ou du soleil.
- Les carburants.

Il faut ensuite noter, que l'énergie secondaire est transformée en énergie finale, telle que la lumière, la chaleur et l'énergie mécanique.

1.2.3. Quantité d'énergie

L'importance de la quantité d'énergie renfermée par une matière est fonction des caractéristiques de cette dernière (position, masse, forme, vitesse, ...).

Par exemple :

- En comprimant un ressort, la quantité d'énergie est proportionnelle à son allongement.
- En plaçant un corps à une hauteur donnée par rapport au sol, la quantité d'énergie est proportionnelle à élévation.

- En déplaçant un corps, la quantité d'énergie renfermée par ce dernier est d'autant plus importante que sa vitesse est élevée.

1.2.4. Transmission de l'énergie et son transformation

En réalité, l'énergie contenue dans la matière n'est pas visible mais par contre la lumière, le mouvement, le vent et les vagues, par exemple, peuvent se manifester d'une manière ou d'une autre, pour la mettre en évidence et par suite la rendre visible. Parmi les propriétés de l'énergie, il y a sa transmission d'un corps à un autre, souvent par transformation, mais elle n'est jamais créée ni détruite : lorsque l'on parle de production d'énergie, il ne s'agit pas d'une création, mais d'une transformation. L'énergie se présente sous plusieurs formes (thermique, cinétique, électrique...) et l'une de ses propriétés essentielles est de pouvoir être convertie d'une forme en une autre. En effet, toute action ou changement d'état nécessite que de l'énergie soit échangée.

Elle est obtenue par :

- Combustion de carburants.
- Utilisation de l'électricité
- Utilisation de forces naturelles.

1.2.5. Unités de l'énergie

L'énergie exprime la force des phénomènes physiques, c'est une quantité mesurable.

- Le joule (J) est l'unité de mesure de l'énergie de référence selon le système international d'unités (SI).

Par définition, le joule est le travail d'une force d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force. Il représente une quantité d'énergie perçue comme petite dans l'activité courante d'un être humain, ce qui handicape son usage dans certaines circonstances. Aussi est-il parfois utilisé au travers de ses multiples en milliers : kilojoule (kJ), mégajoule (MJ), gigajoule (GJ), ...

$$1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J}$$

- British Thermal Unit (Btu ou BTU) : unité d'énergie anglo-saxonne définie comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Fahrenheit une livre anglaise d'eau dans une atmosphère d'un bar, la thermie (th) qui est une unité ancienne d'énergie etc.

$$1 \text{ BTU} = 1055 \text{ J}$$

$$1 \text{ th} = 10^6 \text{ cal} = 4\,185.5 \cdot 10^3 \text{ J}$$

- **tonne d'équivalent pétrole (tep)** : énergie calorifique d'une tonne de pétrole « moyen ». Cette unité est particulièrement utilisée par les économistes de l'énergie .

$$1 \text{ tep} = 4,186 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

- **électron-volt (eV)** : énergie cinétique gagnée par un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt, elle correspond à l'ordre de grandeur de l'énergie d'un électron au sein d'un atome.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- **erg (erg)** : unité d'énergie constitutive d'un système différent du Système international, appelé CGS (dont les unités de base sont le centimètre, le gramme et la seconde).

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

- **calorie (cal)** : C'est une quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Celsius la température d'un kg d'eau. Cette définition imprécise a été par la suite spécifiée et déflatée d'un coefficient 1 000 en indiquant qu'il s'agissait de la quantité de chaleur nécessaire pour élever un gramme d'eau dégazée de 14,5°C à 15,5°C sous un bar de pression atmosphérique.

$$1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$$

Remarques

Il est parfois fait usage dans le monde de la réfrigération d'une unité « négative » la frigorie (fg) : 1 fg = -1 cal.

La notion de Grande calorie (Cal ou kcal) est utilisée principalement en diététique : 1 Cal = 1 kcal = 10^3 cal = 4 185,5 J

La thermie (th) est une unité ancienne d'énergie : 1 th = 10^6 cal = $4 185,5 \cdot 10^3$ J

- **kilowattheure (kW.h ou kWh)** : Energie consommée par un appareil de 1 000 watts pendant une durée d'une heure. Cette unité est particulièrement utilisée dans les applications électriques.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

- **tonne de TNT** : énergie libérée lors de l'explosion d'une tonne d'un explosif appelé TNT. Sa valeur est susceptible de varier suivant les conditions de l'explosion.

$$1 \text{ tonne de TNT} = 4,184 \cdot 10^9 \text{ J}$$

- **barils de pétrole** : Dans le même esprit que la tonne d'équivalent pétrole, il est fait parfois référence à une **unité d'énergie équivalente à un baril de pétrole**. La valeur en est fixée de manière conventionnelle.

$$1 \text{ tep} = 7,33 \text{ barils de pétrole}$$

- **tonne d'équivalent charbon** : Avant la référence au pétrole, pour définir une unité énergétique d'un point de vue économique et industriel, il était fait référence à **la tonne d'équivalent charbon (tec)**. Par ailleurs, suivant les circonstances industrielles, sont également utilisées les tonnes d'autres produits énergétiques : essence, fioul lourd, gaz, lignite, etc.

$$1 \text{ tec} = 2,930 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

1.3. Formes d'énergie

On parle souvent de deux genres ou formes d'énergie : le travail (noté W) et la chaleur (notée Q).

Le travail : est un transfert ordonné d'énergie entre un système et le milieu extérieur, La chaleur : est un transfert désordonné d'énergie entre le système et le milieu extérieur.

En outre, différentes formes d'énergie peuvent être distinguées :

- Énergie de position : cinétique et mécanique (associée au mouvement).
- Énergie potentielle chimique.
- Énergie lumineuse.
- Énergie thermique.
- Énergie électrique.
- Énergie électromagnétique.
- Énergie potentielle.

1.3.1. Énergie mécanique

L'énergie mécanique est la somme des énergies cinétique et potentielle, soit :

$$E_{\text{mécanique}} = E_{\text{cinétique}} + E_{\text{potentielle}}$$

- Énergie cinétique (E_c) qui est l'énergie des corps en mouvement. Comme l'énergie des cours d'eau (énergie hydraulique) et celle du vent (énergie éolienne). Elles peuvent être transformées en énergie mécanique (moulin à eau, moulin à vent, pompe reliée à une éolienne) ou en électricité, si elles entraînent un générateur.
- Énergie potentielle (E_p) qui est l'énergie stockée dans les corps immobiles. Elle dépend de la position de ces derniers. Comme son nom l'indique, elle existe potentiellement, c'est-à-dire qu'elle ne se manifeste que lorsqu'elle est convertie en énergie cinétique.

1.3.2. Énergie thermique (ou calorifique)

C'est la chaleur ou encore l'énergie calorifique. Elle est causée par l'agitation, au sein de la matière, des molécules et des atomes en représentant donc l'énergie cinétique d'un ensemble au repos.

- Dans une machine à vapeur : elle est transformée en énergie mécanique.
- Dans une centrale thermique : elle est convertie en électricité.

> Le sous-sol renferme de l'énergie thermique (géothermie), qui est utilisée soit pour produire du chauffage, soit pour générer de l'électricité.

1.3.3. Énergie chimique

C'est l'énergie associée aux liaisons entre les atomes constituant les molécules. Certaines réactions chimiques sont capables de briser ces liaisons, ce qui libère leur énergie ; de telles réactions sont dites exothermiques comme la combustion par exemple.

Lors de la combustion, le pétrole, le gaz, le charbon (biomasse) convertissent leur énergie chimique en chaleur et souvent en lumière (Flamme).

Dans les piles, les réactions électrochimiques donnent de l'électricité.

1.3.4. Énergie rayonnante

C'est l'énergie transportée par les rayonnements telle que l'énergie lumineuse et le rayonnement infrarouge émis, par exemple, par le soleil ou les filaments des ampoules électriques.

L'énergie des rayonnements solaires peut être récupérée et convertie en électricité (énergie photovoltaïque) ou en chaleur solaire (solaire thermique).

1.3.5. Énergie nucléaire

C'est l'énergie stockée dans les atomes (dans les liaisons entre les protons et les neutrons au niveau du noyau). En transformant les noyaux atomiques, les réactions nucléaires s'accompagnent d'un dégagement de chaleur.

Dans les centrales nucléaires, on réalise des réactions de fission des noyaux d'uranium, et une partie de la chaleur dégagée est transformée en électricité.

1.3.6. Énergie électrique

Il s'agit de l'énergie transférée d'un système à un autre grâce à l'électricité. Les systèmes pouvant fournir ces transferts électriques sont par exemple les alternateurs et les piles.

Les systèmes receveurs de ces transferts sont par exemple les résistances, les lampes et les moteurs électriques.



Figure 2. La foudre illustre généralement l'énergie à l'état naturel. Paradoxalement elle en contient assez peu. Sa violence vient surtout de la rapidité et de l'extrême localisation du phénomène. (Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/meteorologie-orages-sont-ils-difficiles-prevoir-9134/>)

2. L'environnement,

2.1. Définitions

Plusieurs définitions, trouvées dans la littérature, peuvent être attribuées au terme "Environnement", en effet :

- Environnement = Ensemble des éléments (biotiques ou abiotiques) qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins.
- Environnement = Ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques).
- Environnement = Ensemble des éléments objectifs (qualité de l'air, bruit, etc.) et subjectifs (beauté d'un paysage, qualité d'un site, etc.) constituant le cadre de vie d'un individu.
- Environnement = Ensemble des éléments qui constituent le voisinage d'un être vivant ou d'un groupe d'origine humaine, animale ou végétale et qui sont susceptibles d'interagir avec lui directement ou indirectement.
- Environnement = Contexte écologique global, c'est-à-dire l'ensemble des conditions physiques, chimiques, biologiques climatiques, géographiques et culturelles au sein desquelles se développent les organismes vivants, et les êtres humains en particulier. L'environnement inclut donc l'air, la terre, l'eau, les ressources naturelles, la flore, la faune, les hommes et leurs interactions sociales.

2.2. Sciences de l'environnement

La science a connu un développement considérable au cours du dernier siècle. Les connaissances scientifiques ont beaucoup progressé, en particulier dans le domaine de l'environnement. Certaines disciplines spécialement dédiées à l'environnement, qui n'existaient pas jusque-là sont même apparues récemment, l'écologie peut en être l'exemple.

La mise au point de nouveaux moyens techniques, d'instruments de mesures et d'observation, a fait considérablement avancer la connaissance que nous avons de l'environnement, que ce soit au niveau du fonctionnement des êtres vivants et des interactions avec leur milieu, des écosystèmes. Les avancées de la physique et de la chimie nous ont permis de comprendre le fonctionnement des végétaux et plus globalement des corps vivants. L'avancée de la science a entraîné une plus grande mesurabilité des impacts humains sur l'environnement, d'où provient également une plus grande prise de conscience.

Les problématiques environnementales sont passées de problèmes locaux, comme la protection d'une espèce, à des problèmes mondiaux comme :

- Le trou dans la couche d'ozone.

- Le réchauffement de la planète.

2.3. Gestion de l'environnement

La gestion de l'environnement consiste à :

- identifier les besoins et les contraintes de systèmes d'études déterminés.
- chercher de nouvelles solutions pour la gestion quotidienne de l'environnement. Par conséquent,

il faut savoir :

- identifier les aspects ainsi que les impacts environnementaux liés à toute activité.
- analyser les exigences légales.
- aider à mettre en place puis à faire vivre des systèmes de management de l'environnement adaptés qui permettent de :
 - pallier les impacts ou d'en limiter les effets ?
 - réduire les émissions polluantes dans les différents compartiments environnementaux (eau, air, bruit, déchets, ...)
 - d'optimiser les outils de production et leur rapport à l'environnement.

Chapitre 2

Les différentes ressources d'énergie

1. Introduction

Une source d'énergie est obtenue soit :

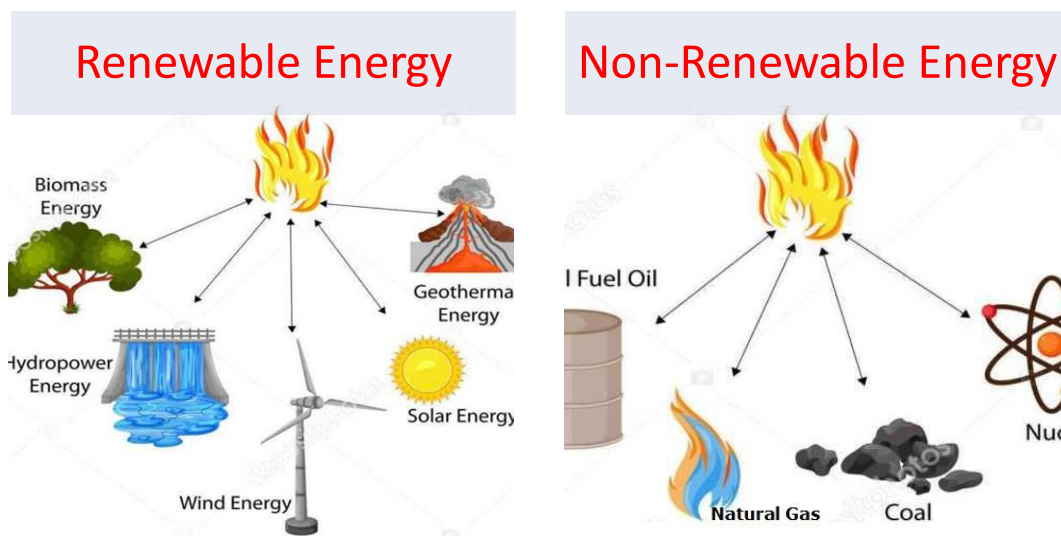
> d'un élément naturel : l'eau, le vent, le soleil, la chaleur du sous-sol.

soit :

> d'un phénomène naturel : la combustion, la fission nucléaire, l'activité musculaire.

Le résultat est la production d'une énergie mécanique, thermique ou électrique.

Les principales ressources énergétiques sont :



- Énergies fossiles : gaz naturel, charbon, pétrole.
- Énergie hydroélectrique.
- Énergie éolienne.
- Énergie nucléaire.
- Énergie solaire.
- Énergie géothermique.

On qualifie également l'énergie selon la source d'où elle est extraite ou le moyen par lequel elle est acheminée, en effet il y a :

- Les énergies fossiles.
- L'énergie nucléaire.
- L'énergie de masse.
- L'énergie solaire.

- L'énergie électrique.
- L'énergie chimique.
- L'énergie thermique.
- L'énergie d'origine biomassique.

Il existe des sources d'énergie qui sont régénérées par des processus naturels dans la mesure où on les exploite sans dépasser les limites de cette capacité de régénération : Ce sont les énergies renouvelables.

Les ressources énergétiques renouvelables sont exploitables sans limite de durée à l'échelle humaine. Toutes les autres ressources énergétiques sont des ressources non renouvelables.

2. Ressources énergétiques

Les ressources énergétiques (sources d'énergie) sont des réserves naturelles d'une forme d'énergie donnée.

2.1. Ressources fossiles

Il s'agit du pétrole, du charbon, et du gaz naturel qui sont des ressources d'énergie appelées fossiles. Les stocks ont été constitués à l'ère primaire (il y a 250 millions d'années). Pendant des dizaines de millions d'années, le rayonnement solaire a permis le développement des plantes et de la biomasse en général; lorsqu'une petite partie de cette biomasse (moins de 1%) s'est trouvée enfouie, elle a pu évoluer jusqu'à former du pétrole, du gaz et du charbon. Le transfert d'énergie à partir de ces ressources nécessite de les brûler : cette combustion est à l'origine de l'augmentation des gaz à effet de serre (CO₂ en particulier) dans l'atmosphère.

Ces ressources assurent actuellement environ les trois quarts de nos usages d'énergie à l'échelle mondiale.

2.2. Ressources fissiles

Il s'agit principalement de l'uranium dont les atomes constituent une ressource d'énergie car leur fission libère de l'énergie. Ils sont extraits d'un minerai.

La quantité d'uranium est donc limitée, les réserves sont estimées à environ 100 ans. Si la fusion nucléaire (ayant lieu dans les étoiles) venait à être maîtrisée et rentable, il serait possible d'avoir une nouvelle ressource d'énergie nucléaire constituée d'atomes tels que le deutérium et le tritium (isotopes de l'hydrogène).

- Le charbon

Le charbon est une variété particulière de kérogène formée à partir de matière organique de végétaux supérieurs (arbres, fougères...). Sa pyrolyse va conduire à des composés de plus en plus riches en carbone (le bois est constitué d'environ 50% de carbone) : la tourbe

(50 à 55%), le lignite (55 à 75%), la houille (75 à 90%) et l'anthracite (> 95%) qui est le charbon proprement dit (voir la figure suivante). Comme pour les autres kérogènes, la pyrolyse du carbone génère du pétrole et du gaz naturel, c'est ce dernier qui est responsable du « coup de grisou » dans les mines de charbon.

- Le pétrole

La composition de chaque gisement est unique et dépend de son passé biologique et géologique. On y trouve plusieurs milliers de molécules différentes, essentiellement des hydrocarbures. Les pétroles sont classés en trois catégories principales en fonction de leur constituant majoritaire :

Le pétrole brut, c'est à dire avant raffinage, contient également des éléments autres que le carbone et l'hydrogène : le soufre est le plus abondant (à hauteur de 0,2 à 5%), viennent ensuite l'azote et l'oxygène (de 0 à 1%). On trouve également des cations métalliques complexés (vanadium, nickel).

- Le gaz naturel

À grande profondeur, les hydrocarbures formés par pyrolyse peuvent subir des réactions de craquage. Ils sont alors transformés en alcanes de plus en plus légers, jusqu'au méthane CH₄ : le plus simple des alcanes et principal constituant du gaz naturel (70 à 95%) (Voir la figure suivante). D'un gisement à l'autre, on peut trouver des quantités variables en

- éthane, propane et butane : alcanes gazeux à température et pression ambiante
- alcanes de 5 à 8 atomes de carbone qui se liquéfient à température ambiante et pression atmosphérique pour former le condensat de gaz naturel
- sulfure d'hydrogène. Le gisement de Lacq, en France, contenait 15% de sulfure d'hydrogène, ce qui a justifié la construction d'une unité de récupération et d'exploitation de ce gaz
- diazote, dioxyde de carbone

Il faut noter que le cinquième des réserves de gaz naturel est formé, non pas par la pyrolyse du kérogène, mais par la décomposition de la matière organique par des bactéries. On parle alors de gaz biogénique par opposition au gaz thermogénique.

2.3. Vent (Énergie éolienne)

Le vent est un déplacement de l'air dans l'atmosphère. Il résulte, sous l'effet du rayonnement solaire, d'une inégale répartition des conditions de température et de pression dans l'atmosphère ainsi que de la rotation de la terre sur elle-même.

Le vent est en fait une énergie d'origine solaire.

En effet, le rayonnement solaire réchauffe inégalement la surface de la terre et crée ainsi des zones de températures, de densités et de pressions différentes. Les vents sont des déplacements d'air entre ces différentes zones.

L'énergie cinétique du vent va être convertie en énergie mécanique, elle même généralement transformée en énergie électrique au moyen d'une éolienne.

Une éolienne est composée d'une tour (hauteur de 40 à 120m) surmontée d'un rotor constitué d'un axe horizontal portant (2 ou) 3 pales et actionnant un générateur par le biais d'un multiplicateur de vitesse.

La vitesse du vent est plus élevée en hauteur, puisqu'elle n'est alors plus freinée par les rugosités (arbres, bâtiments,..) du sol. C'est ce qui explique la hauteur de la tour.

Entre l'hélice et le générateur électrique se trouve un multiplicateur de vitesse, car l'hélice tourne à des vitesses d'environ 10 à 60 tours/minute alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1000 à 1500 tours/minute.

La puissance d'une éolienne ($P=1/2\rho SV^3$, ρ étant la densité de l'air, S étant la surface et V étant la vitesse) étant proportionnelle à la surface balayée par l'hélice, le diamètre de l'hélice peut atteindre de 80 à 90 mètres.

Comme la puissance est aussi proportionnelle au cube de la vitesse du vent, il est important de choisir des endroits bien exposés au vent pour l'implantation de l'éolienne. (En pratique, les vents dépassant en moyenne 5m/s sont considérés comme bons.)

Cependant, en pratique on ne recueille qu'un pourcentage de cette puissance théorique. En effet :

- l'éolienne laisse forcément passer une partie du vent (40%) (loi de Betz).
- les turbulences se développant à l'arrière de l'éolienne dissipent de l'énergie.
- le multiplicateur de vitesse et le générateur électrique n'ont pas un rendement de 100%, mais de 90 à 95%.
- l'éolienne ne capte pas tous les vents : elle ne démarre qu'à partir d'une certaine vitesse du vent (3 à 5 m/s) et elle s'arrête pour ne pas s'emballer en cas de trop grand vent.

Bref, le rendement par rapport à l'énergie initiale du vent est seulement de 12 à 30%.

Les pales de l'éolienne sont légèrement obliques par rapport au vent, afin que le vent les soulève et les fasse tourner autour de leur axe.

L'éolienne est orientable, de manière à être toujours face au vent, pour produire l'énergie maximum.

Elle est aussi équipée d'un système qui permet de réguler sa vitesse, afin qu'elle ne s'emballer pas lorsque le vent est trop fort .

Il existe aussi des éoliennes à axe vertical.

Elles offrent des avantages : machinerie électrique au sol ; pas besoin de les orienter en fonction de la direction du vent ; peu bruyantes car tournant à faible vitesse.

Par contre, leur rendement est moindre.

Les éoliennes ont deux usages principaux :

- le pompage de l'eau (au moyen de pompes mécaniques ou électriques) à usage domestique ou pour l'irrigation ou pour le bétail.

Cela se pratique principalement aux Etats-Unis, en Afrique du Sud, en Argentine et en Australie.

- la production d'électricité :
 - dans un site éloigné de tout réseau de distribution : il s'agit de petites éoliennes dans des lieux isolés de pays industrialisés ou dans des villages du Tiers Monde.
 - dans un site raccordé au réseau électrique : il s'agit de grandes éoliennes qui vont fournir de l'électricité au réseau.

Avantage :

- énergie non polluante.
- son coût devient compétitif.
- la période de haute productivité (vents plus forts), en hiver, correspond à la période pendant laquelle la demande est plus forte.
- une éolienne est entièrement démontable et remplaçable.

Inconvénients :

- le vent est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- des vents trop faibles ou trop forts ne sont pas exploitables.
- les sites les plus venteux sont souvent éloignés des endroits où l'électricité doit être consommée.
- les éoliennes sont souvent jugées inesthétiques.
- les éoliennes génèrent du bruit.
- les pales des éoliennes sont dangereuses pour les oiseaux, surtout migrateurs.

La production d'électricité éolienne est en pleine expansion en Europe et en Inde.

Des éoliennes sont aussi installées en mer : elles sont arrimées au fond des mers jusqu'à 50 mètres de profondeur et distantes de la côte de plusieurs kilomètres .

Elles peuvent ainsi profiter de vents plus forts et évitent les réticences environnementales.

2.4. Biomasse

La biomasse est l'ensemble des matières organiques, essentiellement d'origine végétale, qui peuvent donner lieu à des combustions ou permettent des combustions après transformations chimiques (le méthane formé dans certains cas par la matière organique en l'absence de dioxygène est un bon combustible). Même s'ils sont issus de transformations chimiques de matière organique, les agrocarburants (ou biocarburants) entrent également dans cette catégorie.

On entend par biomasse toute matière organique contenant de l'énergie emmagasinée sous forme

d'énergie chimique, généralement au sein de composés de carbone. Elle s'obtient généralement à partir de bois, de fumier, de résidus de récoltes et d'ordures ménagères.

La biomasse est l'énergie renouvelable la plus développée dans le monde, représentant 11% de la production énergétique totale.

A) L'énergie des végétaux ou houille verte.

La houille verte est une énergie d'origine solaire, les plantes poussant grâce à la lumière du soleil et au processus de photosynthèse qui en résulte .

A.1. Utilisation du bois comme combustible.

Le bois est le principal combustible végétal.

Il peut être transformé en énergie par :

- carbonisation : on obtient du charbon de bois, qui présente 2 avantages :
 - il est plus concentré en énergie que le bois et est donc plus économique à transporter.
 - il dégage moins de fumées que le bois. Son utilisation est donc plus commode.

C'est pourquoi le charbon de bois est le combustible privilégié des grandes agglomérations des pays en développement.

- *gazéification* : le procédé étant coûteux, il n'est économiquement envisageable que dans des lieux où la matière première est quasi gratuite (ex : scieries).

Ce procédé convient bien pour la production d'électricité.

- combustion :

- pour la cuisson : surtout dans les pays du Tiers Monde.
- pour le chauffage : principalement dans les pays industrialisés et surtout pour l'habitation individuelle.
 - soit il chauffe l'air ambiant :
 - feux ouverts : rendement de 10 à 15 %.
 - foyers fermés : rendement proche de 70%.
 - soit il chauffe de l'eau ou de la vapeur d'eau, dans une chaudière à bois.

Le rendement d'une bonne chaudière à bois est de l'ordre de 75%, ce qui est un peu inférieur aux rendements obtenus avec le charbon, le fioul et le gaz.

- pour la production d'électricité : il alimente une chaudière dont la vapeur fait tourner une turbine, qui entraîne elle-même un générateur électrique. (C'est le principe de la centrale électrique, déjà développé précédemment).

Cela est intéressant dans l'industrie du bois ou du papier, générant de grandes quantités de résidus.

Des centrales électriques à bois existent cependant dans certains pays (principalement d'Amérique du Nord et d'Europe), mais la production d'électricité représente moins de 1% de la production électrique mondiale.

Avantage :

- le prix du bois est inférieur à celui du *fioul* ou du gaz.
- quand on cumule les coûts du combustible, d'installation et de fonctionnement, le chauffage au bois est intéressant.
- valorisation des déchets de bois.
- utilisation de terres en friche pour de nouvelles cultures spécifiques :
- exemples : eucalyptus au Brésil.

Saule, peuplier, miscanthus en Europe.

Inconvénients :

- le prix de l'installation d'une chaudière à bois est de 2 à 3 fois plus cher que celui d'une chaudière à fioul.
- pour être efficace, le bois doit être sec : pour cela, il faut attendre 1,5 à 2 ans (après la coupe).
- le pouvoir calorifique du bois (sec) est nettement inférieur à celui du charbon ou du fioul.
- le bois pollue (particules de fumées, hydrocarbures, autres gaz contribuant à l'effet de serre).

Le chauffage au bois pollue cependant nettement moins que celui au charbon, au fioul ou même au gaz.

Quant au CO₂ qu'il dégage, il est réabsorbé par la végétation qui repousse, du moins pour autant que celle-ci soit reconstituée dans les mêmes proportions que la végétation utilisée.

- l'argument de la déforestation (particulièrement en Amérique Latine et en Afrique) est à nuancer : en effet, dans beaucoup de zones du Tiers Monde, ce n'est pas l'excès de consommation de bois de feu qui détruit la forêt mais plutôt sa conversion en terres de culture ou de pâturage.

A.2. Production de biocarburants.

- Le bioéthanol (en substitution de l'essence) : alcool produit par fermentation des sucres contenus :
 - soit dans des plantes riches en sucre (betteraves, topinambours, cannes à sucre, .)
 - soit dans des plantes riches en amidon (pommes de terre, céréales,.)
 - soit dans des plantes ligneuses (bois, pailles,.)

On peut aussi produire un éther dérivé de l'éthanol : l'ETBE (ethyl-tertio-butyl-éther) .

Ces deux biocarburants peuvent être utilisés dans les moteurs, soit purs, soit à 85 %. Cela

nécessite d'adapter les moteurs (surcoût faible : 200€) et les stations-service (coût important : 20000 à 40000 € par station) .

Ils peuvent aussi être incorporés dans l'essence à moindre dose. (En Europe, 5 % d'éthanol ou 15% d'ETBE sont autorisés.)

- Les biodiesels (en substitutions du gazole) :

Esters d'huiles obtenus par estérification d'huiles de colza, tournesol, palme, soja, arachide,...

(Les huiles peuvent aussi être utilisées brutes, mais avec de moins bons résultats.)

Le plus prisé aujourd'hui est l'ester méthylique d'huile de colza.

Des taux variables d'incorporation d'ester dans le gazole ont été expérimentés (de 5 à 100 %).

Dans les deux cas, seule une fraction (± 50 %) de la plante est utilisée pour la production de carburant. Les résidus peuvent être utilisés pour l'alimentation animale.

En 2005, deux pays produisaient à eux seuls 70 % de la production mondiale de bioéthanol : les Etats-Unis (à partir du maïs) et le Brésil (à partir de la canne à sucre). En Europe, les leaders sont l'Espagne, la Suède et l'Allemagne.

Quant au biodiesel, l'Europe est la principale région du monde à avoir développé cette filière .

Avantage :

- bon rendement énergétique.
- nettement moindre pollution des véhicules utilisant ces carburants.
- développement :
 - de l'agriculture.
 - de l'emploi en milieu rural.

Inconvénients :

- coût de production élevé (rendant le prix du biocarburant supérieur à celui du carburant d'origine pétrolière).
- risques de :
 - pollutions agricoles.
 - déforestation tropicale.
- concurrence entre les cultures alimentaires et les cultures énergétiques, alors que la population croît sans cesse, conduisant à une augmentation du prix des matières premières pour l'alimentation.
- rendement à l'hectare faible.

La recherche s'intéresse à des biocarburants dits de la seconde génération , issus de matières ligneuses (bois, paille, .) ou d'algues, qui n'entreraient pas en concurrence avec les cultures alimentaires, dont le coût serait plus faible, le rendement énergétique encore meilleur , et l'impact écologique moindre.

La houille verte apparaît comme une énergie particulièrement consommatrice d'espace et d'eau.

A.3. L'énergie des déchets

Les deux principales façons de produire de l'énergie avec les déchets sont la fermentation et l'incinération.

A.4. La fermentation des déchets, formant le biogaz.

La fermentation est un processus biologique par lequel des bactéries décomposent des matières organiques. Elle conduit à la formation d'un biogaz, composé d'un mélange de gaz carbonique (inerte) et de méthane (inflammable), et d'un résidu. Le méthane est en fait le même gaz que le gaz naturel. Le résidu peut être utilisé comme engrais pour les sols .

Le processus se déroule dans une cuve, recouverte d'un couvercle, nommée fermenteur ou réacteur ou digesteur. Le gaz s'y accumule et en est soutiré.

La fermentation (ou « méthanisation ») s'applique :

- aux déchets d'élevage :

Il s'agit principalement des lisiers de porcs (mélange d'urines et d'excréments), des déjections bovines (bouses dans les prairies et fumier dans les étables) et des fientes de volailles.

La Chine et l'Inde utilisent cette ressource énergétique à grande échelle depuis des dizaines d'années.

- aux effluents industriels :

Principalement dans l'industrie agroalimentaire (brasseries, sucreries, distilleries d'alcool, laiteries) et les papeteries.

- aux boues des stations d'épuration urbaines :

Les eaux usées urbaines, après décantation, produisent en effet des boues.

- aux ordures ménagères :

Il s'agit des déchets humides, provenant de la cuisine ou du jardin.

Les ordures ménagères allant en décharge produisent elles aussi, lors de leur décomposition, du biogaz. Celui-ci peut être récupéré.

C'est ce que fait, par exemple, la ville de New York :

la majorité des déchets est enterrée dans de profondes fosses, tapissées de films en plastique. Le gaz produit lors de la décomposition est récolté par un réseau de conduites placées dans le tas d'ordures. Il est ensuite dirigé vers des réservoirs de stockage, puis vers une centrale électrique reliée au réseau national.

Le biogaz peut être utilisé pour :

- produire de la chaleur :

C'est son utilisation la plus fréquente (malgré un manque de débouché en été). Son

pouvoir calorifique est cependant moindre que celui des autres gaz (naturel, propane, butane).

- produire de l'électricité :

Mais c'est une solution très coûteuse (à cause des frais d'investissement et de maintenance des groupes électrogènes).

- comme carburant :

Le biogaz, une fois épuré de son CO₂, de son eau et de son H₂S, est quasi identique au gaz naturel pour véhicules.

Il en a les avantages et inconvénients, à savoir : faible pollution de l'air, faible bruit, mais autonomie réduite (car volumineux).

C'est un carburant idéal pour les transports urbains.

- être réinjecté dans les réseaux de gaz naturel :

Cela nécessite l'épuration préalable du biogaz.

La relative pauvreté en méthane du biogaz fait qu'il n'est guère rentable de le transporter loin. Il faut donc lui trouver des débouchés proches.

A.5. L'incinération des déchets.

L'énergie produite par l'incinération des déchets ménagers, industriels ou agricoles peut être récupérée sous forme de chaleur ou d'électricité.

L'incinération des ordures ménagères a pour but premier d'éliminer les déchets. En Europe, chaque habitant « produit » environ 1 kilo d'ordures ménagères par jour (le double en Amérique du Nord). 70% de ces déchets sont combustibles : papiers, cartons, déchets putrescibles de cuisine ou de jardin et plastiques. Par contre le verre et les métaux ne le sont pas .

Le pouvoir calorifique d'une tonne d'ordures ménagères est en moyenne de 8MJ/kg, ce qui signifie que 5 à 7 tonnes de déchets ménagers équivalent à 1 tonne de fioul.

C'est dans les fumées de sortie du four qu'on peut récupérer l'énergie. Les fumées cèdent leur chaleur à travers un échangeur, à l'intérieur duquel circule soit de l'eau surchauffée, soit de la vapeur.

Si l'on veut produire de la chaleur, l'eau surchauffée suffit. Le rendement d'échange est très bon (70 à 80 %).

La chaleur peut être utilisée pour alimenter des usines ou des réseaux de chaleur urbains, situés à proximité.

Si l'on veut produire de l'électricité, on utilise la vapeur (>turbine, ^génératrice électrique).

Le rendement est de l'ordre de 25%.

Une partie est consommée pour les propres besoins de l'usine tandis que le reste peut être vendu au réseau électrique.

L'électricité peut être valorisée toute l'année, contrairement à la chaleur.

On peut aussi produire de l'électricité et de la chaleur simultanément (« *cogénération* ») en utilisant la chaleur résiduelle de la vapeur qui sort de la turbine (voir annexe 6).

Cependant, l'incinération des ordures ménagères peut engendrer une pollution atmosphérique. Les fumées contiennent en effet des poussières, des acides, de la dioxine et des métaux lourds. Toutefois, la législation prévoit des filtres sur les cheminées des usines d'incinération, limitant cette pollution. L'incinération produit des déchets (1/3 de résidus ultimes), mais permet d'éliminer 2/3 des ordures.

D'autres déchets sont intéressants à incinérer :

- la paille (de blé, maïs, riz) :

Son pouvoir calorifique équivaut à celui du bois. Par contre, elle est plus volumineuse à stocker et à transporter.

Le Danemark, par exemple, a développé des centrales électriques à paille.

- la bagasse (une partie de la tige de la canne à sucre) :

Son pouvoir calorifique équivaut aussi à celui du bois.

- les coques d'arachide, de noix de coco, du palmier à huile
- les farines animales (provenant des déchets du bétail).
- les fientes des poulaillers

2.5. Terre (Énergie géothermique)

Notre planète est un système chaud dont la température est sans cesse maintenue grâce aux éléments radioactifs qu'elle contient. En effet, la terre s'est formée à partir des vestiges d'étoiles ayant explosé à la fin de leurs vies. Parmi les poussières d'étoiles qui se sont accumulées pour former la terre, certaines étaient constituées d'atomes radioactifs.

Les transformations nucléaires spontanées libèrent de l'énergie qui est responsable d'un important échauffement des couches géologiques situées sous la croûte terrestre.

La chaleur de la Terre provient de sa radioactivité naturelle (désintégration de l'uranium, du thorium ou du potassium) qui maintient le magma à haute température.

Le flux de chaleur géothermique à la surface du globe est trop faible que pour être capté.

Ce que l'on va exploiter, c'est la chaleur accumulée dans certaines parties du sous-sol, en général dans des nappes d'eau souterraines .

La température du sous-sol à 1000 mètres est en général de 30°C ;

Néanmoins, le flux de chaleur est beaucoup plus fort que la moyenne dans certaines régions à haute activité géothermique (situées sur les pourtours des plaques tectoniques). Là, la température à 1000 mètres de profondeur peut atteindre plusieurs centaines de degrés.

Si des hautes températures (plus de 150°C) sont généralement nécessaires pour fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie géothermique, des températures plus faibles sont suffisantes pour produire uniquement de la chaleur.

Mais l'extraction de l'eau chaude stockée en sous-sol va dépendre de la perméabilité de la roche. Si la roche n'est pas assez perméable, on peut la fracturer (en envoyant de l'eau sous pression) [39].

Et si la roche est sèche (faute d'infiltration d'eau de pluie), on peut y injecter artificiellement de l'eau à réchauffer. L'exploitation des roches chaudes sèches permettra sans doute de ne plus limiter la *géothermie* aux seules formations rocheuses renfermant des eaux souterraines naturelles. Cela augmenterait considérablement le potentiel géothermique.

A) la géothermie « basse énergie » (chauffage)

Les ressources géothermales dites de « basse énergie » se caractérisent par une température comprise entre 30 et 100°C.

Elles se rencontrent à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 mètres, dans des formations rocheuses et perméables remplies d'eau, situées principalement dans des bassins sédimentaires de très grandes dimensions.

L'eau chaude peut être envoyée directement dans des radiateurs lorsqu'elle est suffisamment pure et lorsqu'elle n'est pas à trop haute température, ni à trop haute pression. C'est le cas, par exemple, en Islande. Mais, lorsque ce n'est pas le cas, des *échangeurs* sont nécessaires. L'eau chaude souterraine du circuit primaire communique sa chaleur (à travers des plaques ou des tubes) à l'eau d'un circuit secondaire qui, elle, est envoyée dans des radiateurs.

Parfois la température de l'eau est trop basse (20 à 40 °C) pour être directement utilisée en chauffage. On utilise alors la technique de la *pompe à chaleur*.

Les deux principaux usages de la géothermie « basse énergie » sont d'une part les bains et les piscines, et d'autre part le chauffage de logements ou de bâtiments.

Les cinq principaux producteurs sont la Suède, la Chine, les Etats-Unis, l'Islande et la Turquie.

B) la géothermie « moyenne et haute énergie » (^électricité).

La géothermie « moyenne énergie » exploite des gisements d'eau chaude sous pression dont la température est comprise entre 90°C et 180°C.

Ces gisements sont présents en de nombreux endroits [40].

La géothermie « haute énergie » exploite des gisements de vapeur à des températures allant de 200 à 350°C environ et situés à des profondeurs de 1000 à 3000 mètres dans des zones à haute activité géothermique.

Soit la vapeur est sèche : elle est envoyée vers une turbine génératrice électrique.

Les gisements de vapeur sèche sont extrêmement rares.

Soit la vapeur est humide (mélange eau + vapeur) :

Après avoir séparé l'eau de la vapeur, cette dernière est dirigée vers une turbine génératrice d'électricité. Ce type de vapeur est plus fréquent.

Avantage :

- énergie peu polluante.
- coûts de fonctionnement bas.

Inconvénients :

- coût d'investissement important.
- les gaz (souvent) contenus dans l'eau ou la vapeur géothermales peuvent polluer l'atmosphère. l'eau géothermale, rejetée dans la nature après avoir cédé sa chaleur, peut polluer les rivières en raison des sels et métaux qu'elle contient.

2.6. Soleil (Énergie solaire)

Le Soleil est une étoile naine jaune qui a mis environ 100 millions d'années à se former il y a 4.5 milliards d'années, à partir des nuages d'hydrogène d'une nébuleuse. Au sein du Soleil ont lieu des réactions de fusion nucléaire (l'hydrogène se transforme en hélium) qui libèrent de l'énergie par transfert thermique et par rayonnement.

On prévoit que ce mécanisme se poursuivra encore pendant 5 milliards d'années environ jusqu'à épuisement du stock d'hydrogène et transformation du soleil en géante rouge.

Le soleil possède une température de surface de 6000°C, maintenue par de la fusion nucléaire qui s'opère en son sein. Une grande partie de cette énergie est perdue dans l'espace, mais les radiations qui parviennent sur Terre représentent une source constante d'énergie. Ajoutons que l'énergie solaire est l'énergie renouvelable la plus importante.

Elle peut être convertie en chaleur ou en électricité [19].

A. L'énergie solaire convertie en chaleur pour la production d'eau chaude, à usage sanitaire ou pour le chauffage :

Pour ces usages, l'eau ne nécessite pas d'être chauffée à plus de 50 à 60° C.

Le rayonnement solaire est intercepté par des capteurs. Ceux-ci sont constitués d'une surface plane absorbante en métal, dans laquelle sont sertis des tubes où circule soit de l'air, soit de l'eau à réchauffer (dans les pays où il ne gèle pas), soit un liquide « caloporteur » (qui transférera sa chaleur à l'eau à travers un « échangeur »). La surface métallique est en général noircie pour absorber au maximum le rayonnement et en réémettre le moins possible. La plaque absorbante et ses tubes sont en général inclus dans un caisson vitré, de manière à emprisonner la chaleur dans ce caisson (effet de serre).

L'eau ainsi chauffée peut être dirigée vers :

a) un ballon ou chauffe-eau:

La circulation de l'eau ou du fluide caloporteur vers le ballon peut se faire grâce à une pompe. Celle-ci n'est pas nécessaire si le ballon est situé plus haut que le capteur (en effet, le fluide chauffé monte, car il est plus léger).

Il existe aussi des systèmes où le capteur et le ballon forment un bloc. Ils sont généralement installés sur des toits-terrasses, dans des pays chauds, tels Israël, la Grèce, la Turquie,...

Dans les pays où les toits sont inclinés, ces systèmes monoblocs pèsent trop lourd sur la charpente et sont en outre jugés inesthétiques.

Quand le soleil n'est pas là, le chauffe-eau a besoin d'une énergie d'appoint pour fonctionner.

Sous notre climat, la surface de capteurs nécessaires à un chauffe-eau est de 3 à 5 m² pour une maison moyenne (4 personnes) .

b) un plancher chauffant:

Le fluide des capteurs solaires (en général de l'eau, mélangée à de l'antigel) est envoyé dans des tubes en plastique serpentant dans un épais plancher. Celui-ci chauffe non seulement pendant les heures d'ensoleillement, mais aussi durant les premières heures de la nuit, la chaleur ayant été stockée dans l'épaisse dalle (12 à 15cm).

Si cette dalle emmagasine plus de chaleur que nécessaire, celle-ci peut être dirigée vers un ballon d'eau chaude sanitaire. On parle alors de système combiné (chauffage + eau chaude sanitaire).

En l'absence de soleil, un chauffage d'appoint est nécessaire. Celui-ci peut être branché sur le plancher chauffant, à condition que ce dernier soit un plancher solaire à appoint intégré. On évite alors le coût de radiateurs, poêles, convecteurs, .

Cependant un tel plancher est coûteux (deux fois plus qu'un plancher solaire normal ou qu'un chauffage traditionnel).

La surface des capteurs nécessaires est d'1 m² pour 10 m² de surface habitable.

L'énergie solaire thermique ne représente, à l'échelle mondiale, au début du 21^{ème} siècle, que 0,04 % de la consommation d'énergie .

B. L'énergie solaire convertie en électricité.

B.1. Indirectement après conversion en chaleur puis en énergie mécanique dans les centrales thermiques solaires.

La chaleur solaire est concentrée, par focalisation des rayons solaires, pour atteindre une température de plusieurs centaines de degrés.

Elle est ensuite convertie en énergie mécanique, elle-même convertie en énergie électrique, suivant le même principe de fonctionnement que celui d'une centrale électrique thermique classique (voir

annexe 4) :

La chaleur est transmise à un circuit dont elle transforme l'eau en vapeur. Cette vapeur (à haute température et à haute pression) actionne soit un piston (qui est ainsi poussé), soit une turbine (qu'on fait ainsi tourner).

Le mouvement linéaire du piston (converti en mouvement rotatif) ou le mouvement rotatif de la turbine fait ensuite tourner un générateur électrique.

La chaleur a donc fourni une énergie mécanique, elle même convertie en énergie électrique.

Plus la chaleur fournie au départ est élevée, plus le rendement final de ces transformations est élevé.

Il existe différents types de centrales solaires se distinguant surtout par la manière dont les rayons solaires sont focalisés .

Le *rendement* des centrales solaires est de 15 à 20%. On estime qu'il pourrait atteindre 30% et donc se rapprocher du rendement des centrales à charbon ou à fioul, qui est de 35%.

Ces centrales solaires ne conviennent que dans des régions où le rayonnement du soleil est très important : Australie, Inde, pourtour de la Méditerranée, une bonne partie de l'Afrique et de l'Amérique. Dans ces pays, elles semblent promises à un très grand développement.

De plus, ces centrales nécessitent de grandes et plates surfaces de terrain. Il faut aussi que ces surfaces ne soient pas trop loin des réseaux électriques existants ou des zones de consommation .

B.2. Directement par effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque, découvert par le physicien *Becquerel* en 1839, permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité.

Lorsque les photons (particules de lumière) frappent certains matériaux, ils délogent et mettent en mouvement les électrons des atomes de ces matériaux. Or le courant électrique n'est rien d'autre qu'un mouvement d'électrons.

Des cellules photovoltaïques ou photopiles transforment directement la lumière du soleil en électricité.

Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs (généralement du *silicium*) qui ont la propriété de convertir la lumière qu'ils reçoivent en charges électriques (voir annexe 3).

Des photopiles sont connectées en série. Ces séries de cellules sont montées en parallèle et intégrées entre deux feuilles de verre serties sur leur pourtour dans un cadre en aluminium ou en acier. Le tout forme un panneau rectangulaire : un module photovoltaïque .

Une installation peut en comprendre plusieurs.

Ces modules photovoltaïques doivent être installés dans des endroits où il n'y aura pas d'ombre.

L'énergie solaire étant intermittente, il faut pouvoir stocker l'énergie produite dans des batteries, ou

être relié à un réseau de distribution électrique.

Avantage :

- énergie disponible partout à la surface de la Terre.
- usage non polluant.
- les cellules n'ont pas de partie mécanique et ne nécessitent guère d'entretien.

Inconvénients :

- le soleil est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- le coût de production des cellules photovoltaïques est très élevé. (En effet, le silicium est cher (et l'est de plus en plus en raison d'une forte augmentation de la demande)).
- la fabrication des cellules dégage du CO₂.

Les systèmes photovoltaïques sont principalement utilisés :

- dans de petits appareils : montres, calculettes, gadgets,. (1% du marché).
- dans des équipements électriques éloignés de tout réseau,
 - qu'il s'agisse d'équipements publics ou professionnels :
 - ex. : - l'éclairage de monuments isolés.
 - l'électricité nécessaire à :
 - des balises lumineuses (ex. : bouées maritimes).
 - des toilettes mobiles.
 - des installations de chantiers mobiles.
 - ou qu'il s'agisse d'habitations ou de villages isolés, surtout dans les zones rurales des pays en voie de développement.
- dans la production d'électricité raccordée à un réseau de distribution :
 - soit par des toits ou murs photovoltaïques.
 - ex. : mur antibruit près de l'aéroport d'Amsterdam.
 - soit par des centrales électriques photovoltaïques.
 - ex. : aux Etats-Unis, en Italie, au Japon, en Espagne, en Allemagne, en Suisse.

Ce marché est en pleine croissance depuis 20 ans .

Les principaux pays fabriquant des modules photovoltaïques (Japon, Allemagne, Etats-Unis, Espagne) ont veillé à développer chez eux des systèmes photovoltaïques reliés au réseau, qui leur servent ainsi de démonstration et de vitrine à l'exportation.

L'électricité photovoltaïque est 5 à 10 fois plus chère environ que l'électricité « traditionnelle ».

Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est de 10 à 15% en pratique, et presque de 30% en labo .

En 2005, l'électricité d'origine photovoltaïque ne représentait que 0,02% de la production mondiale d'électricité.

2.7. Eau

L'évaporation de l'eau, par l'action du rayonnement solaire, permet le déplacement de quantités importantes d'eau sous la forme de nuages. Les précipitations permettent de stocker de l'eau en altitude à l'aide de retenues mais aussi d'alimenter les cours d'eau et les lacs. L'eau libérée ou celle des cours d'eau peut faire tourner des turbines dans des centrales hydroélectriques et permettre la production d'électricité (énergie électrique).

L'énergie hydraulique est indirectement d'origine solaire, le soleil, responsable de l'évaporation, étant à l'origine du cycle de l'eau.

A) L'énergie des rivières et des fleuves.

L'énergie potentielle de l'eau (son énergie de chute) va être captée et transformée en énergie mécanique (par une turbine) qui sera elle-même transformée en énergie électrique (par un générateur).

Cela nécessite :

- un cours d'eau
- un barrage qui créera :
 - une hauteur de chute
 - un réservoir :
 - pour palier à l'irrégularité éventuelle du cours d'eau.
 - pour moduler la puissance à délivrer.
 - une centrale (turbines et générateurs).

La puissance de l'eau ($P=9,81QH$, Q étant le débit d'eau en mètres cubes/seconde, H étant la hauteur de chute en mètres) dépend du débit d'eau et de la hauteur de la chute.

Pour une même puissance, une centrale hydraulique peut donc être alimentée soit par un faible débit tombant d'une grande hauteur de chute, soit par un débit important d'une faible hauteur.

On peut donc installer des centrales hydroélectriques :

- sur des cours d'eaux de montagne, offrant d'importants dénivelés, mais un débit faible.
- sur des cours d'eau à débit assez abondant, avec des dénivelés moyens ($\pm 100m$).
- sur des grands fleuves offrant un débit très important et un dénivelé très faible (10 à 15 m).

Avantage :

- énergie non polluante.
- l'eau peut être stockée dans des réservoirs (ce qui n'est pas le cas du soleil et du vent)
- les centrales munies d'un réservoir peuvent s'adapter rapidement aux variations

(pics horaires) de la demande en électricité : on ouvre les vannes quand il y a une pointe dans la demande en électricité.

(Les centrales thermiques, classiques ou nucléaires, n'ont ni cette rapidité, ni cette souplesse.)

- énergie rentable. Bien qu'elle soit coûteuse en investissement, elle l'est assez peu en fonctionnement et en maintenance
- grande longévité des équipements.
- haut rendement : 90%

Inconvénients :

- la construction d'un grand réservoir en amont d'un barrage nécessite parfois le déplacement de populations (occupant les terres à submerger). Ex. : barrage chinois des Trois Gorges : déplacement d'environ un million de personnes.
- risque pour la population vivant en aval du réservoir, en cas de rupture du barrage (pouvant survenir lors d'un séisme, de trop grandes crues, ou par vieillissement).
- au point de vue environnemental :
 - perturbation, de la faune et de la flore présente dans le cours d'eau à l'endroit transformé en réservoir.
 - le barrage est un obstacle à la migration des poissons (descente ou remontée).
 - le barrage arrête partiellement le flot des matières solides en suspension dans l'eau, privant de nourriture les êtres vivants en aval du barrage.
 - le barrage arrête aussi de fertiles limons, dont il prive l'agriculture en aval du barrage.
 - la décomposition des végétaux inondés (dans le réservoir) entraîne une production de méthane, un gaz à fort effet de serre.

A coté de la « grande hydraulique » des grands barrages, se développent de petites centrales hydroélectriques, au fil de l'eau, c'est-à-dire dépourvue de réservoir de stockage. Elles sont généralement installées dans des lieux isolés non desservis par un réseau et sont réalisées par des particuliers ou des collectivités locales.

Etant donné qu'elles sont tributaires des variations de débit des cours d'eau (puisque'il n'y a pas de réservoir), elles nécessitent la présence d'un générateur électrique d'appoint (fonctionnant au diesel, par exemple) en cas de faible *hydraulicité*.

Cette « petite hydraulique » représente environ 3 à 4% de l'hydraulique mondiale.

Actuellement, deux pays sur trois dans le monde exploitent l'énergie hydraulique, mais de manière très inégale. Les quatre plus gros producteurs (Chine, Canada, Brésil, Etats-Unis) représentent, à eux quatre, presque la moitié du total mondial (d'hydroélectricité).

Si l'Europe et l'Amérique du Nord ont déjà exploité environ 60% de leurs possibilités, l'Asie (20%),

l'Amérique du Sud (20%) et l'Afrique (7%) sont très loin d'avoir exploité toutes les leurs [1].

Dans le monde, en 2005, l'hydroélectricité représentait 16,2% de la production totale d'électricité, mais seulement 2% de la production totale de l'énergie mondiale .

2.8. Marées

Les marées sont les mouvements montants et descendants de l'eau des mers et des océans causés par les interactions gravitationnelles entre ces masses d'eau et la lune et le soleil.

Comme pour l'eau des cours d'eau, l'installation de centrales hydroélectriques dans les zones de forts déplacements d'eau permet la production d'électricité. Marées et courants sous-marins sont les seuls cas de ressources qui ne désignent pas de la matière mais un évènement.

L'énergie des marées

Les marées sont une variation périodique du niveau de la mer, qui monte et qui descend. Elles sont provoquées par l'attraction exercée par le soleil et par la lune sur la masse des océans. Une période d'une demi-journée (exactement 12h25 min) sépare deux pleines mers consécutives ou deux basses mers consécutives .

L'amplitude des marées, c'est-à-dire la différence de niveau entre la basse mer et la haute mer, varie selon les régions. Elle est très faible dans les mers fermées, comme la mer Méditerranée, mais elle est très forte, par exemple, dans la baie du Mont Saint Michel en France ou dans la Manche.

L'énergie des marées peut être exploitée de 2 manières différentes :

- par des centrales marémotrices :

On ferme la baie ou l'estuaire par un barrage muni de *pertuis*. Lorsque la marée monte, les pertuis sont ouverts et l'eau monte dans le bassin. Avant que la mer ne redescende, on ferme les pertuis. L'eau du bassin est ensuite libérée vers des turbines, génératrices d'électricité.

Avantage :

- si l'énergie des marées est variable, elle peut-être prévue (des années) à l'avance.
- énergie non polluante
- les barrages peuvent constituer une protection contre les raz de marée.
- coût d'exploitation faible.

Inconvénient:

- investissement très coûteux.
- risque de dommages aux poissons traversant le barrage.
- par des hydroliennes :

Des hélices ou des turbines sont installées au fond de la mer, dans des zones à forts courants marins.

Cette technologie est en plein développement. Elle se heurte toutefois à 2 problèmes :

- *L'abrasion* des pales des hélices ou des turbines par les sables.
- La difficulté de l'ancrage du dispositif dans les fonds marins.

B.2. L'énergie des vagues :

C'est une énergie créée par le vent qui frappe la surface de la mer.

L'énergie des vagues peut être récoltée sur la côte elle-même, mais cela présente deux inconvénients :

- la vague, approchant la côte, a perdu de son énergie à cause de la friction avec le fond.
- aspect inesthétique des installations.

Aussi, installe-t-on aussi des centrales flottantes.

Actuellement, des centrales fixes fonctionnent en Grande-Bretagne, en Scandinavie, au Portugal, en Espagne, au Japon, en Australie, pays dont les mers sont souvent agitées et où le coût de ces installations a de fortes chances d'être amorti.

Il est encore un peu tôt pour juger de l'avenir de cette énergie à la technologie récente.

B.3. L'énergie thermique des océans.

Les océans absorbent une quantité considérable d'énergie solaire. Dans les régions tropicales notamment, le soleil peut réchauffer la surface de l'eau jusqu'à 25°C, tandis que la température des eaux profondes ne dépasse pas les 5°C.

Un mécanisme (appelé OTEC) a été développé pour convertir cette différence de température en électricité. Mais le faible rendement énergétique et la lourdeur des installations en font une énergie très coûteuse (pour des décennies encore).

Chapitre 3

Stockage de l'énergie

1. Introduction

Le stockage de l'énergie est le placement d'une quantité d'énergie en un lieu donné pour une utilisation ultérieure. Cela est nécessaire pour une valorisation efficace qui concerne les énergies alternatives, sûres et renouvelables mais intermittentes (éolien et solaire). Afin de stabiliser les réseaux énergétiques et de lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, l'alimentation énergétique de sites insulaires ou isolés, le stockage de l'énergie calorifique ou électrique est quasiment nécessaire.

Dans un souci qui concerne l'avenir et la planète, l'humanité doit puiser son énergie à d'autres puits que ceux de pétrole. Mais cette nécessaire transition vers les sources renouvelables, qui fait actuellement l'objet d'un débat national, ne s'opérera qu'à une condition : parvenir à stocker l'énergie. En effet, s'il est aujourd'hui plus ou moins simple de produire de l'électricité, de la chaleur et même de l'hydrogène, stocker durablement ces trois vecteurs d'énergie reste une véritable gageure scientifique et technologique.

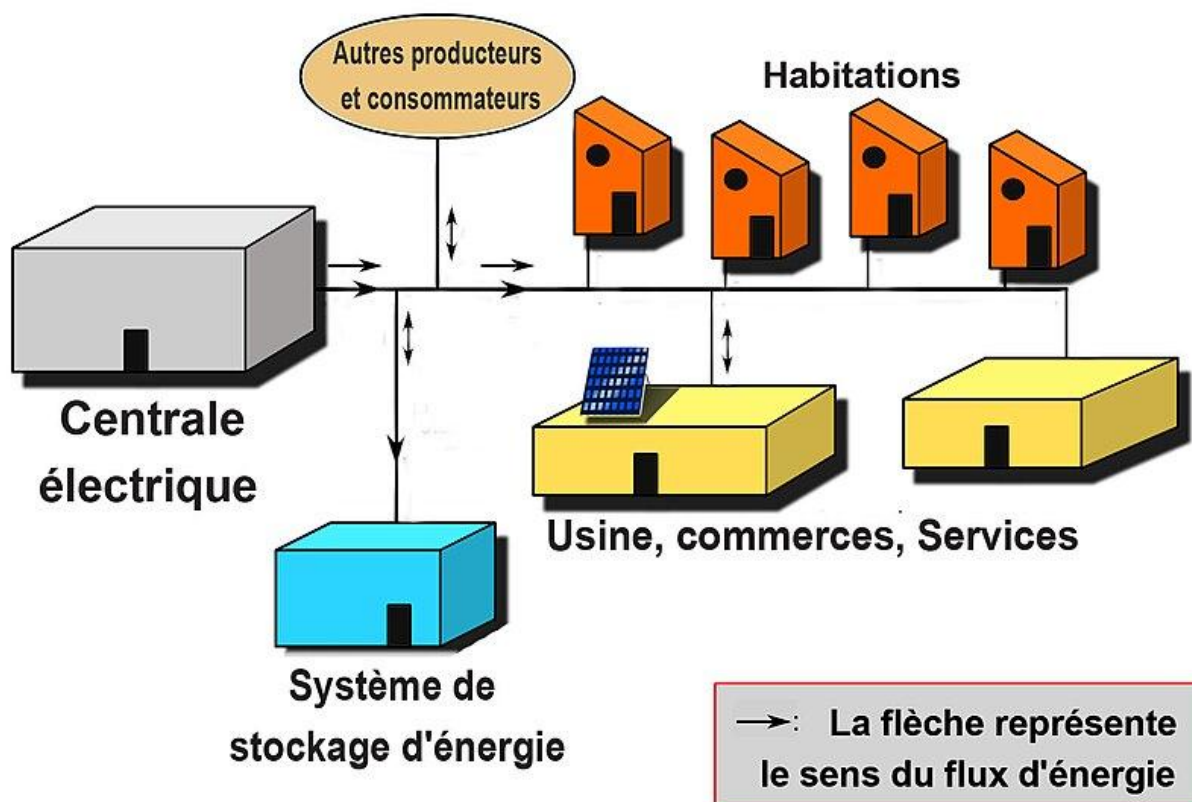


Figure 6. Schéma simplifié et de principe d'un système intégré de stockage dans un réseau électrique, de type « Grid energy storage » (Source : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Stockage_d%27%C3%A9nergie_de_r%C3%A9seau)

Le stockage d'énergie de grille (ou stockage à grande échelle d'énergie) est une collection des méthodes employées pour stocker l'énergie électrique à grande échelle au sein d'un réseau électrique. L'énergie électrique est stockée pendant les périodes où la production (en particulier des centrales électriques intermittentes telles que les sources d'électricité renouvelables comme l'énergie éolienne, la marée et l'énergie solaire) dépasse la consommation et est retournée au réseau lorsque la production tombe en dessous de la consommation.

2. Définitions

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.

Par extension, le terme « stockage d'énergie » est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie.

La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes. 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.

3. Pourquoi stocker l'énergie électrique ?

- Pour pallier l'intermittence de la production d'électricité : à partir du soleil, du vent, des marées et des vagues,
 - Pour lisser les pointes de consommation,
 - Pour ne pas réduire le facteur de puissance
 - Améliorer et sécuriser la gestion du réseau électrique,
 - Pour garantir la fourniture d'électricité aux consommateurs, • Pour disposer d'électricité en l'absence de sources : (sites isolés, véhicules, navires, . etc.).

4. Comment stocker l'énergie électrique ?

- Direct sans transformation : condensateurs, batteries, ... etc.
- Par transformation en énergie mécanique,
- Par transformation en énergie chimique,
- Par transformation en énergie thermique..

5. Techniques de choix des technologies de stockage

Pour comparer les technologies de stockage et déterminer les plus pertinentes pour un usage particulier, plusieurs facteurs techniques 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).

6. Grandes formes de stockage

Le stockage est directement lié à l'usage qu'on fait de l'énergie. On peut citer les sections suivantes.

- Stockage de combustible.
- Stockage électrochimique.
- Stockage de calories.
- Stockage mécanique.
- Stockage sous forme d'énergie potentielle de pesanteur.

6.1. Stockage sous forme d'énergie chimique

Le stockage sous forme d'énergie chimique est très utilisé mais ne représente pas le mode de stockage le plus important en termes de MWh.

- Énergie chimique de la biomasse : issue de l'énergie solaire
- Potentiel électrochimique et stockage de l'électricité
- Gaz
- Méthane
- Hydrogène

Stockage d'hydrogène gazeux

Stockage d'hydrogène liquide

Stockage sous forme de composés physiques ou chimiques (libération facile du gaz).

6.2. Stockage sous forme d'énergie mécanique

Le stockage sous forme d'énergie mécanique consiste à transformer l'énergie excédentaire sous forme d'énergie potentielle ou cinétique.

- Stockage sous forme d'énergie potentielle
- Stockage hydraulique
- Masses solides
- Air comprimé
- Azote liquide
- Stockage sous forme d'énergie cinétique

6.3. Stockage d'énergie calorifique

Le stockage de chaleur peut être réalisé à travers deux phénomènes différents associés aux matériaux qui assurent le stockage. On parle alors de stockage par chaleur sensible et de stockage par chaleur latente.

- Le stockage par chaleur sensible
- Le stockage par chaleur latente.

Chapitre 4

Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

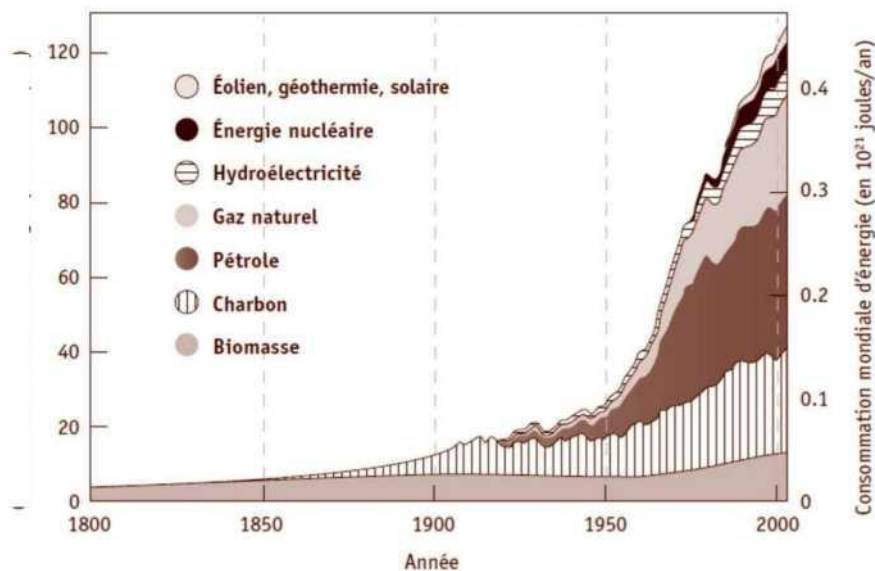
1. Introduction

Les réserves mondiales prouvées d'énergies non renouvelables (fossiles et uranium) pouvaient être estimées en 2015 à 946 milliards de tonne d'équivalent pétrole (tep), soit 80 ans de production au rythme actuel. Cette durée est très variable selon le type d'énergie : 51 ans pour le pétrole, 53 ans pour le gaz naturel, 114 ans pour le charbon. La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2015, selon BP, de 13306 Mtep, en progression de 48% depuis 1998 ; elle se répartissait en 32.8% de pétrole, 28.8% de charbon, 24% de gaz naturel, 4.4% de nucléaire et 10% d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6.7%, éolien 1.4%, biomasse et géothermie 0.9%, biocarburants 0.6%, solaire 0.4%).

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a progressé de 122% en 40 ans, de 1973 à 2013. En 2009, à la suite de la crise de 2008, elle n'avait augmenté que de 1%. La consommation énergétique mondiale (énergie primaire) était en 2013, selon l'Agence internationale de l'énergie de 13.59 milliards de tep (6.1 en 1973).

2. Consommation énergétique mondiale

En 2013, environ 28% de l'énergie mondiale finale est consommée par l'industrie, 27% par les transports, et 36% par le résidentiel, le tertiaire et l'agriculture. Les 9% restants correspondent essentiellement au pétrole utilisé pour produire du plastique et au charbon utilisé pour produire de la fonte.



2.1. Consommation énergétique selon le type d'énergie utilisé

Une part importante des énergies primaires sont converties en électricité et donc consommées sous forme d'électricité ou de chaleur. L'Agence internationale de l'énergie fournit les estimations suivantes :

Tableau 1. Production et consommation finale d'énergie selon le type d'énergie utilisé.

(Source : <https://fr.wikipedia.org>)

Type d'énergie	Production d'énergie primaire 1990	Consommation finale 1990	Part dans la consommation. 1990	Production d'énergie primaire 2021	Consommation finale 2021	Variation consom. 2021/1990	Part dans la consommation. 2021
Pétrole	135 717	109 181	41,8 %	179 349	164 356	+51 %	38,9 %
Gaz naturel	70 658	39 547	15,1 %	146 322	71 609	+81 %	17,0 %
Charbon	93 115	31 461	12,0 %	167 782	38 210	+21 %	9,1 %
Nucléaire	22 002	-	-	30 660	-	+39 %	-
Hydroélectricité	7 699	-	-	15 456	-	+101 %	-
Éolien, solaire, géoth.	1 534	144	0,06 %	16 826	2 680	× 18,6	0,6 %
Biomasse et déchets	37 041	31 996	12,2 %	57 851	43 767	+37 %	10,4 %
Électricité	-	34 923	13,4 %	-	86 957	+149 %	20,6 %
Chaleur	4	14 072	5,4 %	72	14 538	+3 %	3,4 %
Total	367 769	261 324	100 %	614 319	422 118	+62 %	100 %

2.2. Consommation énergétique selon le secteur

L'Agence internationale de l'énergie fournit les estimations suivantes :

Tableau 2. Consommation énergétique selon le secteur.

(Source : <https://fr.wikipedia.org>)

<u>Pétajoule</u>	Consomma tion finale 1990	Part dans la consomma tion	Consomma tion finale 2021	Variation consomma tion 2021/1990	Part dans la consomma tion
<u>Industrie</u>	75 216	28,8 %	127 139	+69 %	30,1 %
<u>Transport</u>	66 071	25,3 %	112 628	+70 %	26,7 %
<u>Secteur résidentiel</u>	63 500	24,3 %	90 646	+43 %	21,5 %
<u>Secteur tertiaire</u>	18 674	7,1 %	33 497	+79 %	7,9 %
Agriculture+pêch e	7 100	2,7 %	9 329	+31 %	2,2 %
Non spécifié	10 796	4,1 %	7 213	-33 %	2,0 %
Usages non énergétiques	19 968	7,6 %	41 665	+109 %	9,9 %
Total	261 324	100 %	422 118	+62 %	100 %

2.3. Consommation d'énergie par habitant

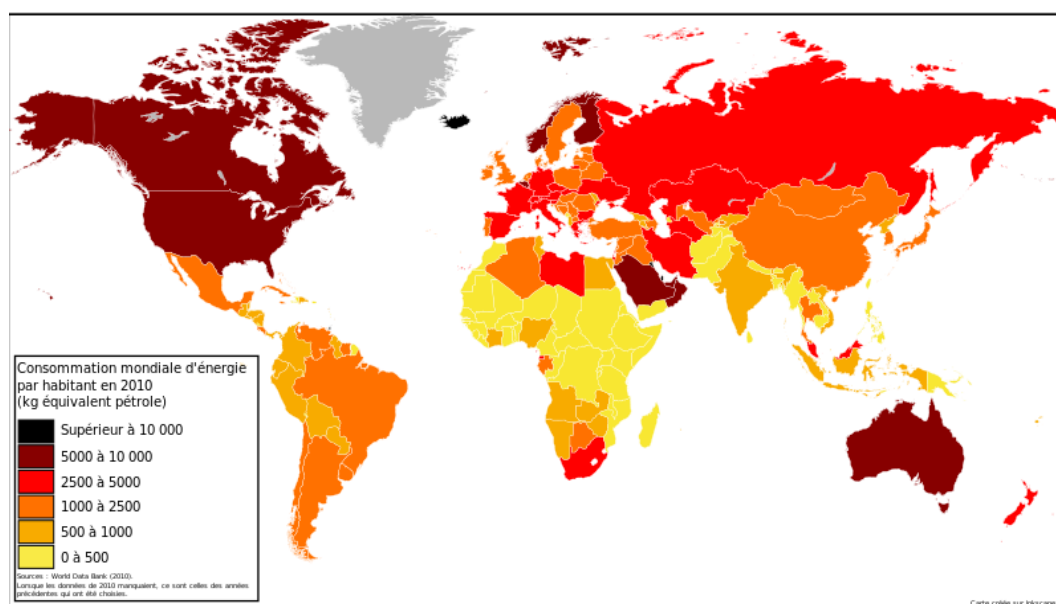


Figure 7. Consommation d'énergie mondiale en 2010 (kg équivalent pétrole par habitant). (Source : World Data Bank 2010)

3. Réserves des ressources d'énergie

Il importe de distinguer les réserves qui sont les quantités que l'on peut produire techniquement et économiquement des ressources qui sont les quantités totales existantes mais qui ne sont pas forcément exploitables. 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.. Aujourd'hui, les réserves prouvées représenteraient 40 ans de consommation.

Les ressources ou réserves mondiales en énergie peuvent être considérées comme inépuisables si l'on considère que :

- l'énergie solaire reçue en un jour par notre planète est environ trente fois supérieure à notre consommation annuelle totale,
- l'énergie nucléaire pourrait devenir quasiment inépuisable si l'on utilisait les filières de surgénération ou de fusion.

Cependant :

- L'énergie solaire est très peu concentrée ce qui pose des problèmes économiques de rentabilité et d'espace ; de plus, l'irrégularité de sa production pose le problème du stockage d'énergie ;
- L'énergie nucléaire pose des défis techniques et des problèmes de sûreté et de pollution (déchets) qui suscitent des oppositions.

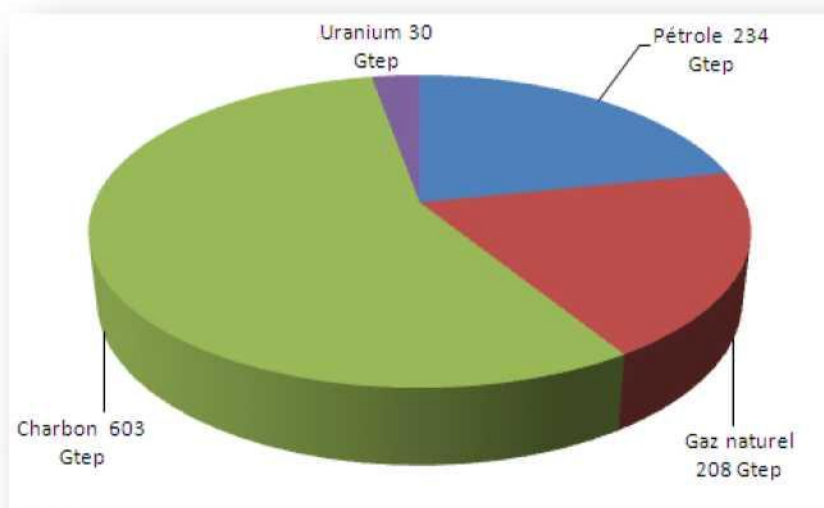


Figure 8. Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2014 par sources d'énergie. (Source : <https://fr.wikipedia.org>)

Tableau 3. Réserves mondiales d'énergies et production annuelle par sources d'énergie.

(Source : <https://fr.wikipedia.org>)

	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en Gtep)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années de production à ce
Pétrole	1 698 Gbbl	239	25%	4.4	51
Gaz naturel	187 Tm ³	168	18%	3.2	53
Charbon	892 Gt	431	46%	3.83	114
Uranium	5.9 Mt	52	6%	0.58	90
Thorium	6.4 Mt	56	6%	ns	ns
Total conventionnel		946	100%	11.8	80
Hydroélectrique	8.9 PWh	2,0		0.89	Ns
Énergie éolienne	39 PWh	8,8		0.15	Ns
Solaire	1 070 000 PWh	92 000		0.03	Ns
Biomasse	3 10 ²¹ J	70		1.38	Ns

4. Évolutions des ressources d'énergie

- La croissance économique détermine la consommation d'énergie. En moyenne l'économie mondiale devrait croître d'environ 3% d'ici 2020 mais les disparités sont importantes.
- La Chine et l'Inde se situant aux alentours de 5%.
- Les pays en développement de l'ordre de 4 % et les pays de l'OCDE aux environs de 2%.
- L'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) demeurerait la plus riche avec 42% de la richesse mondiale en 2020.
- La croissance économique est liée à la démographie. Les hypothèses de croissance de la population sont de l'ordre de 1% par an. Là encore avec des disparités importantes, la croissance serait beaucoup plus importante dans les pays en développement que dans celle de l'OCDE.
- Les questions démographiques évoluent. La maîtrise de la procréation a entraîné une transformation culturelle de première grandeur dont les effets n'ont probablement pas fini de se faire sentir.
- En Europe, par exemple en Espagne et en Italie, la croissance démographique était encore forte dans les années 50, elle a beaucoup diminué ces dernières années entraînant des changements dans les modes de vie.
- Ce phénomène se développe dans les pays méditerranéens et pourrait s'étendre. Il est prévu une population de 7.4 milliards en 2020...et en 2050 : 8 ou 10 milliards ?

5. Statistique mondiale de développement d'énergie renouvelables

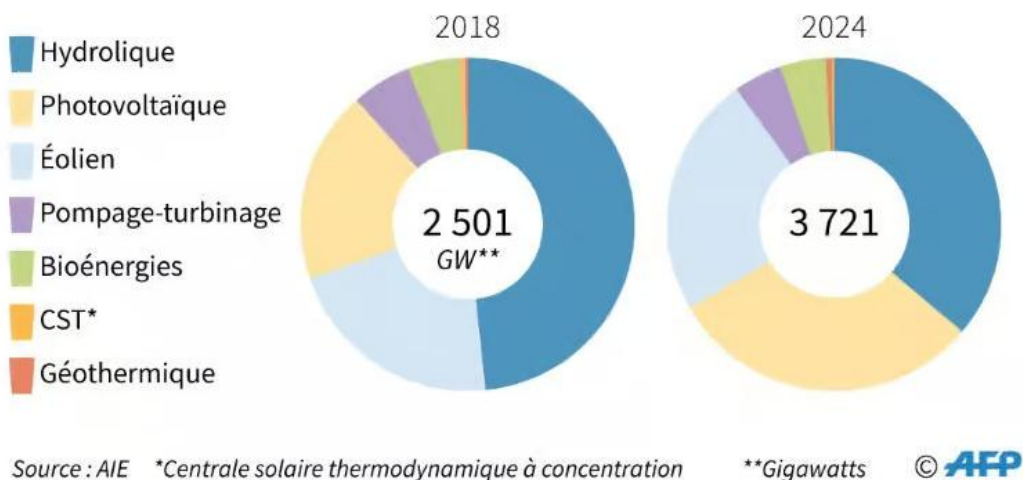


Figure 3. Énergies renouvelables dans le monde en 2018

(Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-energies-renouvelables-ont-avenir-radieux-grace-petites-unites-solaires-78013/>)

Développement des énergies renouvelables en 2020

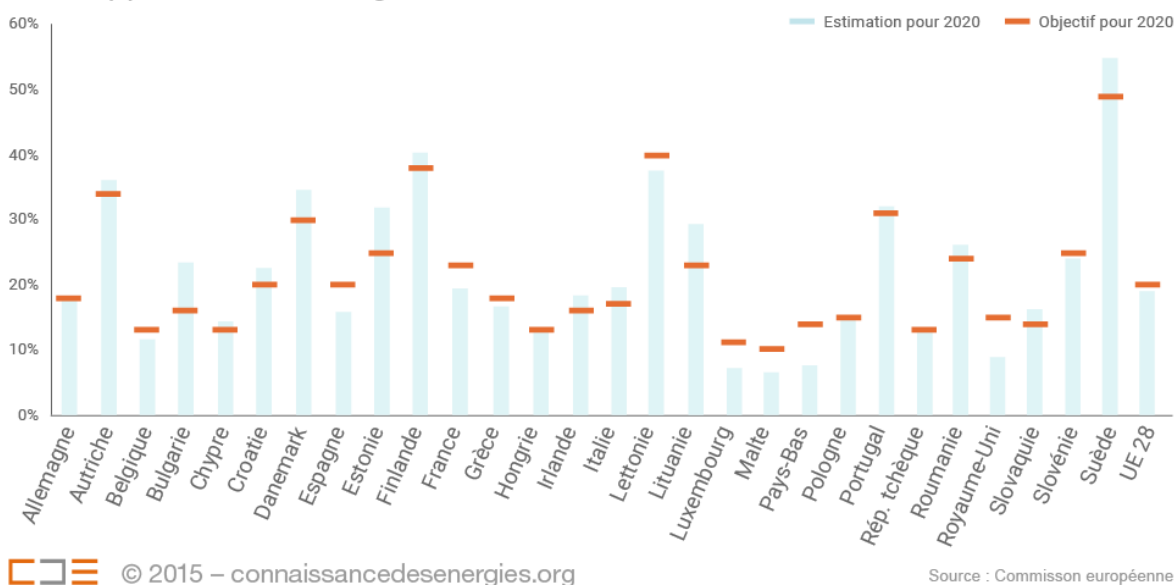


Figure 4. Le développement des Énergies renouvelables en 2020 : objectifs et projections actuelles par pays. (Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/energies-renouvelables-lue-va-t-elle-remplir-ses-objectifs-dici-2020>)

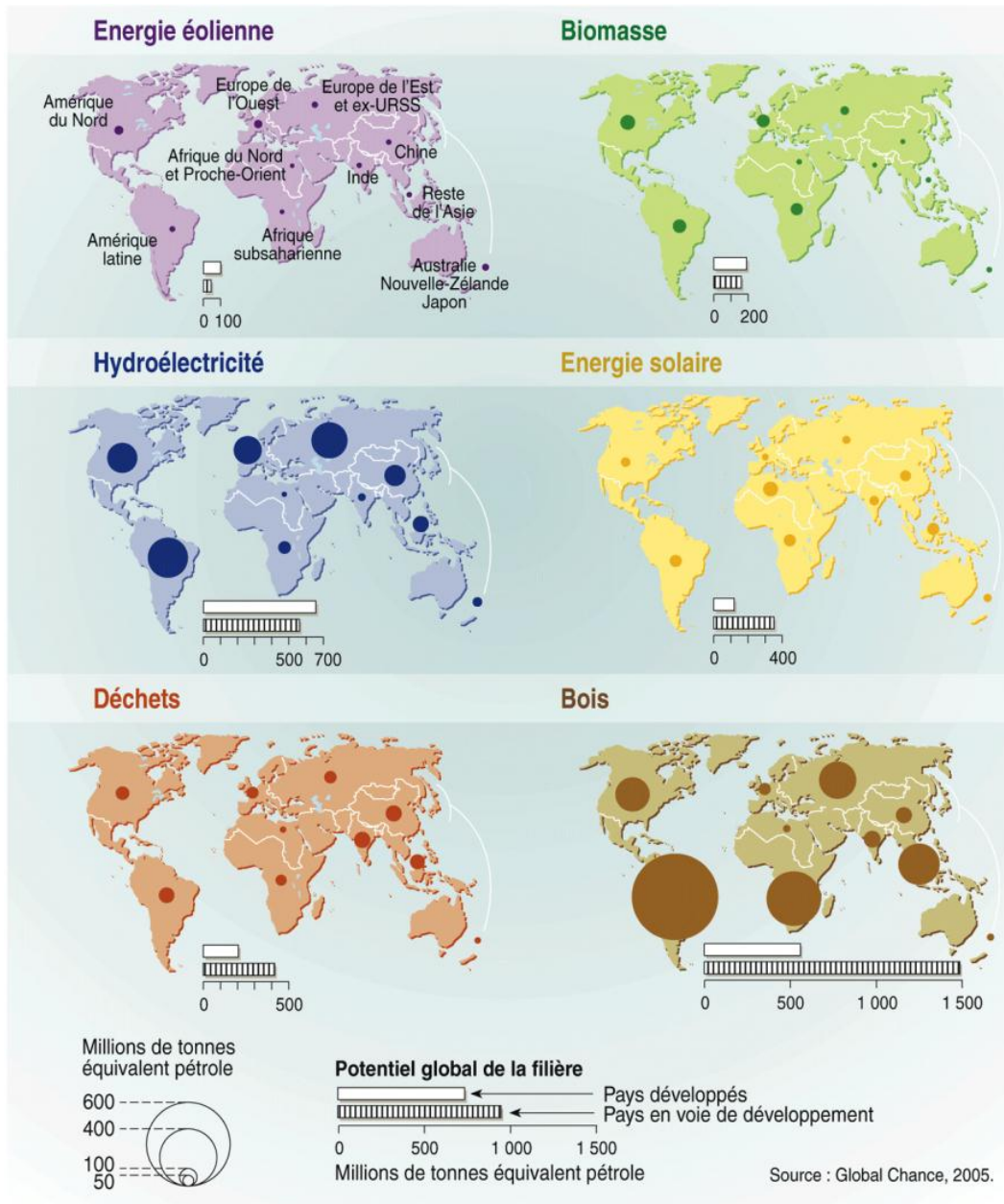


Figure 5. Energies renouvelables, potentialités et limites

(Source : https://www.monde-diplomatique.fr/publications/l_atlas_geopolitique/a53312)

Chapitre 5

Les différents types de pollutions

1. Définitions

- On appelle pollution une dégradation ou une altération de l'environnement, en général anthropique c'est-à-dire liée à l'activité humaine par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Outre ses effets sur la santé humaine et animale, peuvent avoir pour conséquences la migration ou l'extinction de certaines espèces qui sont incapables de s'adapter à l'évolution de leur milieu naturel.
- Définition de la pollution donnée par la Directive européenne 2000/60/CE du 23/10/2000 : "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".

2. Causes de la pollution

La principale cause de la pollution que les humains génèrent est l'utilisation des énergies fossiles dans :

- Les centrales électriques.
- L'industrie.
- Les transports.

Dans les villes des pays industrialisés, ce sont cependant les transports qui sont la première cause de la pollution.

3. Sources de la pollution de l'air anthropique

La pollution d'origine humaine est émise par la combustion des énergies fossiles dans :

- Les centrales électriques.
- Les systèmes de chauffage individuels et collectifs.
- Le trafic automobile.
- L'industrie.
- L'agriculture.

4. Emission et immission

Dans les zones urbaines il y a de nombreuses sources de pollution, mais les polluants qu'on

retrouve peuvent provenir de plusieurs endroits différents. Les gaz et les particules peuvent être transportés par le vent loin de leur point d'émission. Lorsque l'on mesure la concentration d'une substance dans l'air, on parle d'immission, c'est à dire qu'en regardant la quantité du polluant on considère le fait que la substance mesurée en un point précis peut provenir de multiples sources et endroits différents.

5. Types de pollution

On distingue plusieurs types de pollutions :

Pollution industrielle,

Pollution radioactive,

Pollution électromagnétique,

Pollution thermique,

Pollution lumineuse,

Pollution spatiale.

Les industries sont particulièrement touchées par ces mesures. Pour limiter la pollution dont elles sont responsables, elles tentent de :

- réduire leurs émanations toxiques,
- utiliser des moyens de transports moins polluants et des fournisseurs moins éloignés.

Les différentes formes de pollution selon que l'on s'intéresse au milieu pollué ou aux types de polluants : Pollution acoustique - Pollution atmosphérique - Pollution biologique - Pollution chimique - Pollution chronique - Pollution diffuse - Pollution de l'eau - Pollution électromagnétique - Pollution industrielle - Pollution intermittente Pollution lumineuse - Pollution organique - Pollution radioactive - Pollution du sol - Pollution sonore - Pollution spatiale - Pollution tellurique - Pollution thermique – Pollution .

6. Classification de pollution

6.1 Les polluants primaires

Ce sont les substances présentes dans l'atmosphère telles qu'elles ont été remises, certaines ont une importance particulière: Le dioxyde de soufre (SO₂): émis par certains procédés industriels (notamment dans la papeterie ou le raffinage) et surtout par l'utilisation de combustibles fossiles soufrés. Il est l'un des principaux responsables des retombées acides en raison de sa transformation, dans l'atmosphère, en acide sulfurique (H₂SO₄);on peut encore citer : Les oxydes d'azote (NO_x), et notamment de dioxyde d'azote (NO₂), Les hydrocarbures aromatiques poly cycliques (HAP), Les composés organiques volatils (COV), Le méthane et Les métaux lourds (plomb, mercure, Arsenic cadmium,

6.2 Les polluants secondaires

Ce sont des substances dont la présence dans l'atmosphère résulte de transformations chimiques liées à l'interaction de composés dits précurseurs, L'ozone est le principal polluant secondaire. Sa transformation résulte d'un processus photochimique en présence de certains polluants primaires (monoxyde de carbone, oxydes d'azote et composés organiques volatils). Il s'agit d'un gaz naturellement présent dans l'atmosphère à des concentrations faibles et à une altitude A élevée. À plus basse altitude, en revanche, l'évolution de sa concentration résulte essentiellement des activités humaines.

6.3 Les polluants solides

Les particules fines, d'un point de vue sanitaire, sont susceptibles de servir de vecteurs à d'autres substances, tels par exemple les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) cancérigènes, ce qui est particulièrement préoccupant compte tenu de la capacité des particules les plus fines (inférieur à 1 micromètre) à se développer dans les alvéoles pulmonaires, voire à pénétrer dans le sang, Globalement, d'après l'OMS, plus de 7 millions de morts sont attribuables en 2012 aux effets des pollutions de l'air extérieur et domestique, et les régions de l'Asie et du Pacifique sont les plus touchées L'atmosphère de la terre est un mélange de gaz. La composition de l'air jusqu'à une hauteur de 75km est homogène. L'air est composé d'environ 78% de nitrogène et 21% d'oxygène. Le 1% restant est composé de plusieurs gaz, dont le CO₂ et le méthane(CH₄) sont les plus importants la vapeur d'eau est aussi présente avec une quantité qui varie largement :

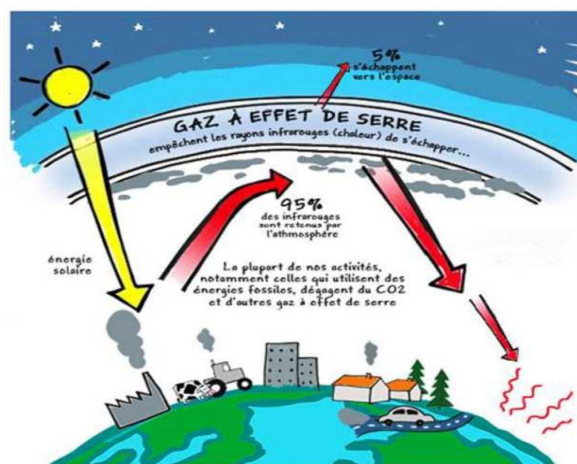
- 0% dans les régions désertiques ■ 4% dans les régions tropicales humides.

Le dioxyde de carbone (CO₂) compose 0.003% de volume atmosphérique seulement, environ 300 parts pour chaque million de partie de l'atmosphère, alors que le méthane (CH₄) ne présente que 0.00017% du volume atmosphérique. Ces gaz avec la vapeur de l'eau interagissent fortement avec les radiations et leur effet est très important sur le climat.

Ce sont les gaz à effet de serre.

L'effet de serre

Les gaz à effet de serre sont les gaz qui absorbent les radiations à température relativement faible comme la température de la terre et de son atmosphère, Mais n'absorbent pas les radiations à haute température comme les radiations issues du soleil.



Influence de l'effet de serre sur la palnette

Chapitre 6

Détection et traitement des polluants et des déchets

1. Introduction

La maîtrise de la source de pollution doit être la première option de gestion envisagée car, non seulement, elle participe à la démarche globale de réduction des émissions de substances responsables de l'exposition chronique des populations, mais encore, elle participe à la démarche globale d'amélioration de la qualité des milieux. Par ailleurs, sans maîtrise des sources, il n'est économiquement ou techniquement pas pertinent de chercher à maîtriser les impacts. Si il est impossible d'enlever complètement la source de pollution (après prise en garantir que les impacts provenant des sources résiduelles sont maîtrisés et acceptables pour les populations et l'environnement.



1.1. Dans l'eau et dans les sols

Pour la détection des toxiques dans l'eau, des sociétés mettent au point des outils d'alerte basés sur la mesure du stress de bactéries phosphorescentes. La diminution ou la perte de fluorescence indique la présence d'un toxique. Elle est mesurée automatiquement toutes les minutes pendant un quart d'heure: la pente de la courbe délivrée indique la concentration du toxique.

Pour la mesure de la pollution des sols, les sociétés lancent quatre détecteurs : pour les explosifs, les hydrocarbures, les isolants de transformateur de type PCB et les polycycles aromatiques. Les kits permettent d'effectuer les tests en moins d'une demi- heure.

1.2. Télédétection de gaz atmosphériques

Il ya des laboratoires qui disposent d'un système de télédétection des gaz atmosphériques par émission infrarouge de type scanner. Ce dispositif de détection à distance, le SIGIS 2 (Scanning Infrared Gas Imaging System - Bruker, Ettlingen- Allemagne) fonctionne en mode passif. Celui-ci ne nécessite pas de source infrarouge artificielle puisqu'il utilise, en tant que source, l'émission naturelle des corps gazeux. Le SIGIS 2 permet la détection à distance (jusqu'à

quelques kilomètres), l'identification ainsi que la quantification de tout panache gazeux présent dans l'atmosphère.

Actuellement, la plupart des détecteurs de gaz utilisés sont des capteurs spécifiques fixes, qui n'autorisent que des mesures ponctuelles (en un seul point) et ne permettent de détecter qu'un seul gaz (détecteurs monogaz).

L'avantage du SIGIS2 est d'être un système mobile permettant de détecter spatialement et simultanément plusieurs gaz présents dans un panache (détecteur multi gaz). Grâce à une caméra infrarouge, le SIGIS 2 peut être également utilisé pour des mesures nocturnes.

L'utilisation combinée de 2, voire 3 SIGIS 2, ouvre la voie à la reconstruction en 3 dimensions d'un panache gazeux.

Ce dispositif peut être destiné à tout type d'entreprise ou de site urbanisé ayant la nécessité de contrôler des émissions gazeuses, que ce soit dans une finalité de surveillance environnementale ou dans une finalité de sécurisation de site.



Figure 9. Dispositif de détection des gaz atmosphériques SIGIS 2 Bruker. (Source: <https://www.bruker.com/fr/products-and-solutions/infrared-and-raman/remote-sensing/sigis-2-gas-imaging-spectrometer.html>)

1.3. Système de mesure de la concentration particulaire à l'émission pour les cheminées industrielles

La limitation de plus en plus sévère des niveaux admissibles pour les rejets industriels conduit de plus en plus à remettre en cause les moyens métrologiques utilisés jusqu'à présent sur les cheminées industrielles.

C'est dans ce cadre que l'on a mis au point un nouveau moyen de mesure utilisable par l'industrie afin de rendre la surveillance des émissions à l'atmosphère plus efficace et ainsi de mieux contrôler les process industriels ; L'enjeu est de proposer aux industriels un système capable de mesurer, à la fois les niveaux anormalement élevés mais également les niveaux très faibles, parfois de l'ordre de la centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en offrant ainsi la possibilité d'anticiper toute dérive par une intervention très en amont. Cette sensibilité élevée permet également d'optimiser les périodes de maintenance et donc les coûts associés.

Types d'entreprises concernées :

- Incinérateurs d'ordures ménagères
- Incinérateurs de déchets spéciaux
- Cimenteries
- Papeteries
- Verreries
- Usines de production

2. Classement des différentes techniques de dépollution

Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction :

- de la nature des procédés employés,
- du lieu de traitement,
- du devenir des polluants.

Il faut noter que la réhabilitation d'un site mettra souvent en œuvre différentes techniques.

3.1. Classement en fonction de la nature des procédés employés

Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction de la nature des procédés employés, à savoir :

- Les procédés physiques : le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser.
- Les procédés biologiques : ils consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants.
- Les procédés thermiques : ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'isoler (ex : désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (ex : vitrification, etc.).

- Les procédés chimiques : ils utilisent les propriétés chimiques des polluants pour, à l'aide de réactions appropriées, les inerte, les détruire ou les séparer du milieu pollué.

3.2. Classement en fonction du lieu de traitement

Les techniques de dépollution peuvent aussi être classées en fonction du lieu de traitement. On distingue les traitements suivants :

- Traitements hors site (ou ex situ) : ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).
- Traitements sur site (ou on site) : ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le site même.
- Traitements in situ (ou en place) : ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol.
- Confinement : il consiste à empêcher / limiter la migration des polluants.

3.3. Classement en fonction du devenir des polluants

Les techniques de réhabilitation peuvent être classées en fonction du devenir des polluants. Il existe deux possibilités :

- > L'immobilisation : elle met en jeu des techniques qui permettent de modifier la mobilité et / ou la toxicité des polluants par deux types de processus :
 - Modification du polluant (changement du comportement, de la toxicité) en agissant sur le niveau d'oxydoréduction, la complexation, la précipitation.
 - Modification du milieu récepteur : réduction de la perméabilité et de la porosité : par solidification ou stabilisation ou par confinement,
- > La destruction (totale ou partielle) par les procédés chimiques, thermiques, physiques et biologiques précédemment cités.

Chapitre 6

Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

1. Introduction

De nombreuses activités humaines (industrielles, chimiques, agricoles, voire 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.

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 cardiovasculaires et respiratoires, diminution de la qualité de vie et du bien-être, ..

2. Effets de la pollution

Les effets de la pollution dépendent de la sensibilité personnelle de l'individu exposé : âge, état de santé, tabagisme, prédispositions.

Selon les experts, ils dépendent également des facteurs suivants :

- Exposition individuelle aux différentes sources de pollution.
- Durée d'exposition à ces niveaux.
- Débit respiratoire au moment de l'exposition.
- Interaction avec d'autres composés présents dans l'atmosphère comme par exemple les pollens, les spores fongiques .

Il est donc difficile de prévoir l'effet de tel niveau de pollution sur la santé de telle personne.

Il existe toutefois des personnes a priori plus sensibles que d'autres aux effets de la pollution de l'air. Ainsi, les enfants, les personnes âgées, les personnes affectées de maladies respiratoires ou cardiovasculaires et les femmes enceintes constituent en règle générale des populations dites sensibles.

En matière de pollution atmosphérique, il n'existe pas de seuil en deçà duquel les polluants sont sans effet pour la santé. Certaines personnes sont affectées par des niveaux très bas. Il existe un lien statistique à court terme entre les niveaux quotidiens de pollution, couramment observés dans les grandes agglomérations et certains indicateurs de santé publique (hospitalisations,

arrêts de travail, mortalité anticipé, etc.).

Face à ces enjeux sanitaires, les pouvoirs publics définissent des niveaux de pollution au-delà desquels des actions temporaires ou permanentes de réduction des émissions sont mises en œuvre. Il s'agit des seuils d'alerte et des valeurs limites.

3. Impact sur la santé

3.1. Appauvrissement de la biodiversité

Cette transformation du milieu se traduit en général par un appauvrissement de la biodiversité (La biodiversité, au sens étymologique du terme, évoque la diversité du vivant, c'est-à-dire tous les processus, les modes de vie ou les fonctions qui conduisent à maintenir un organisme à l'état de vie. Ce terme est beaucoup trop large pour avoir une véritable connotation scientifique) puis par la perturbation du fonctionnement des écosystèmes (caractérisant un milieu dans lequel les conditions physicochimiques sont relativement homogènes et permettent le développement d'un ensemble d'organismes vivants. Dans un milieu, les conditions climatiques (comme la température, le rayonnement solaire, l'humidité), géologiques...).

L'affaiblissement et la disparition des services écologiques rendus par ces écosystèmes (mécanismes d'épuration, stabilisation des sols, etc.) génèrent une dégradation généralisée du milieu de vie aussi bien pour les organismes que pour l'homme et ses activités.

3.2. Maladies cardio-vasculaires

L'HTA (Hypertension Artérielle), l'hypercholestérolémie et le tabagisme sont les principaux facteurs de risque identifiés dans les maladies cardiovasculaires. D'autres facteurs comme l'obésité, l'inactivité physique, une alimentation trop riche en graisses entrent également en interaction. Toutefois, il semble que les facteurs environnementaux ne jouent pas un rôle prépondérant dans l'apparition de maladies cardiovasculaires, à l'exception de l'exposition au monoxyde de carbone qui pourrait favoriser des arythmies cardiaques et l'aggravation de symptômes angineux. Une exposition excessive et prolongée au bruit auprès de personnes sensibles peut engendrer de l'HTA, des ischémies cardiaques (OMS-1999).

3.3. Cancers

L'apparition des maladies cancéreuses est particulièrement accentuée par différents facteurs à savoir :

Le mode de vie (alcool, tabac, alimentation).

Les fonctions génétiques

Les fonctions hormonales.

Cependant, il ne faut pas négliger d'autres facteurs dont le rôle est moins prépondérant tels que

ceux liés à l'environnement, surtout auprès de certaines populations ou/et certaines régions.

Trois sources de contamination majeure sont à citer et sont détaillées ci-dessous (via la consommation d'aliments, via l'air ou via les radiations) :

Source 1 : Les aliments (pesticides, polychlorobiphényles, dérivés chlorés,...)

Source 2 : L'air (pesticides, hydrocarbures polycycliques aromatiques, tabagisme, benzène, amiante, .)

Source 3 : Les radiations (ionisantes, non ionisantes, .)

3.4. Maladies respiratoires

Les maladies respiratoires sont particulièrement accentuées par différents facteurs et plusieurs causes à savoir :

Les particules en suspension

L'oxyde d'azote

Le dioxyde de soufre

L'ozone troposphérique

La pollution à l'intérieur des bâtiments

3.5. Allergies

Les pollens (voir figure 10)

Les moisissures

Les acariens (voir figure 11)

Les animaux domestiques, les nuisibles et les insectes rampants

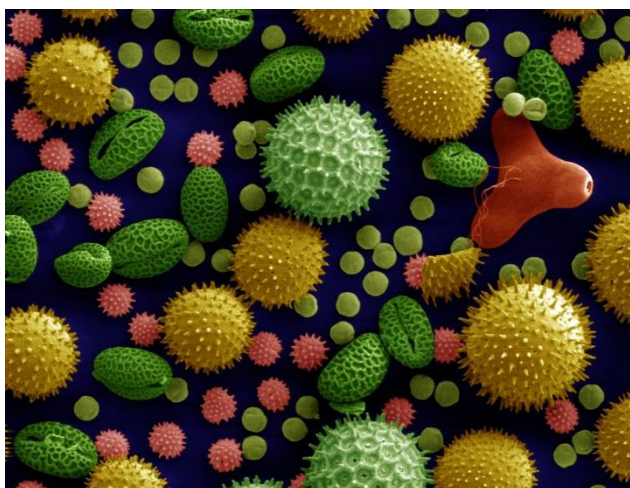


Figure 10. Pollen de plusieurs plantes : tournesol (*Helianthus annuus*), *Ipomoea purpurea* (cf. *volubilis*), *Sidalcea malviflora*, *Lilium auratum*, onagre (*Oenothera fruticosa*) et ricin commun (*Ricinus communis*) .

(Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollen>)



Figure 11. Photo d'un acarion.

(Source : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/9930/acarien>)

4. Quantification

En termes de chiffres, le nombre de décès prématurés (ou surmortalité) sont :

- 3.7 millions de décès prématurés en 2012 dans le monde dus à la pollution ambiante de l'air extérieur dans les zones urbaines et rurales (Source : OMS) ;
- 420 000 décès prématurés causés en 2010 par la pollution atmosphérique dans l'UE (Source : Commission Européenne).
- 21400 décès prématurés en UE-25 en 2000 causés par l'ozone troposphérique.
- 13000 décès prématurés par an, dont 24 enfants, causés par les PM_{2.5} en Belgique en 2000.
- 350 000 décès prématurés (dont 680 enfants) causés par les PM_{2,5} dans la population de l'UE-25. S'ajoutent à cela des centaines de milliers de cas de bronchites, des milliers d'hospitalisations ainsi que des millions de journées de médication (Source : Programme CAFE).
- Une augmentation à long terme de 10 p.g/m des concentrations de PM_{2,5} dans l'air ambiant provoquerait un accroissement (Source : OMS) :
 - de 6% des risques de mortalité
 - de 12% des risques de maladies cardiovasculaires
 - et de 14% des risques de cancers des poumons
- 7.3% de la mortalité totale serait attribuable à l'exposition chronique aux concentrations en PM₁₀ supérieures à 20 µg/m³ à Liège en 2004 (Source : APHEIS).

5. Impact sur l'environnement

Il y a beaucoup d'effets de la pollution sur l'environnement, on peut citer :

- Marée noire qui est dangereuse pour les animaux marins.

- Pollution de l'air qui est causée par les pots d'échappement et les fumées d'usines.
- Les C.F.C. (Les chlorofluorocarbures) qui font des trous dans la couche d'ozone.

Qu'elles soient chimiques, physiques ou biologiques, les pollutions entraînent des modifications du milieu. Suivant leurs natures, les pollutions affectent la physiologie et le comportement des organismes exposés ou les caractéristiques des biotopes (milieu de vie délimité géographiquement dans lequel les conditions écologiques (température, humidité, etc.) sont homogènes, bien définies, et suffisent à l'épanouissement des êtres vivants qui y résident (appelés biocénose), avec lesquels ils forment un écosystème...) et donc la composition et la structure des populations.

- Conséquences du trou dans la couche d'ozone

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (CFC, HCFC, HBFC, halons, CCl₄, CH₃CCl, ClfBr,...) ont des répercussions indirectes sur la santé humaine. En effet, la destruction de cette couche induit une augmentation du rayonnement UV-B nocif au niveau du sol et son trou pourrait contribuer d'une manière ou d'une autre au réchauffement climatique.

- L'augmentation des UV-B au niveau du sol conduit chez l'homme possède :

- Une augmentation des cancers de la peau.
- Un risque accru d'être atteint de cataracte.
- Un possible affaiblissement du système immunitaire tant chez les individus à peau claire que foncée, avec comme conséquence une vulnérabilité plus grande aux attaques des maladies infectieuses.

- Altération des milieux

Autrement-dit, les substances chimiques (métaux lourds, perturbateurs endocriniens, etc.) et les effets physiques (chaleur, lumière, radioactivité) d'une part affaiblissent les organismes et leur capacité à se reproduire et d'autre part altèrent les conditions du milieu (pH, oxygène, ultra-violets...).

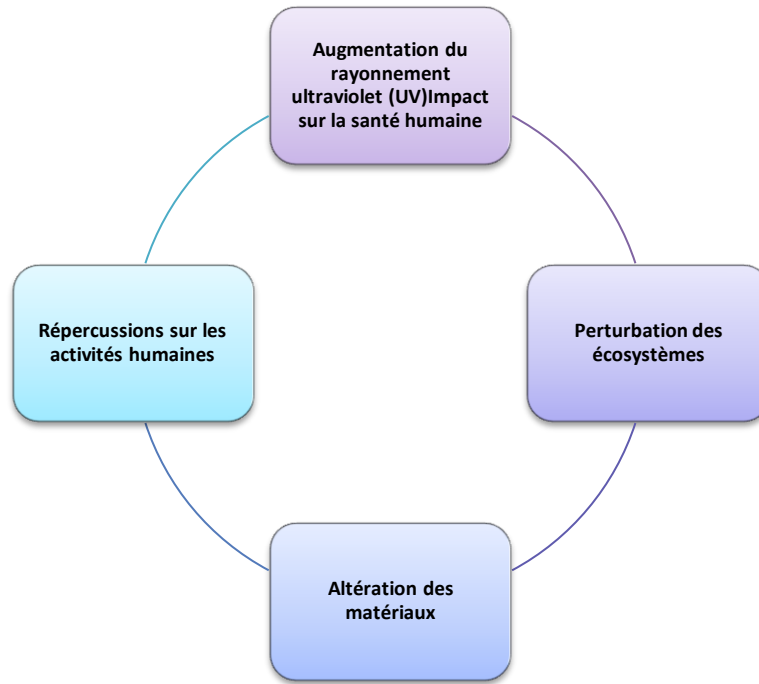


Figure 12. Trou d'ozone : les conséquences sur la terre.

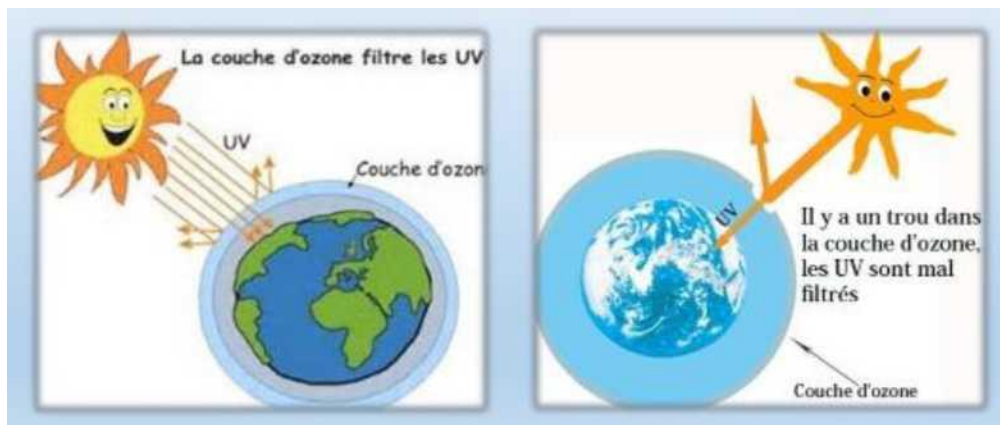


Figure 13. Conséquences de l'appauvrissement de la couche d'ozone.

(Source : <https://fr.slideshare.net/chainreactionfr/prsentation-lyce-episcopal-saintetienne-equipe-2>)

Bibliographie

1. Jenkins & coll., *Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération*, Dunod, 2008.
2. Crastan, 'Centrales électriques et production alternative d'électricité', Lavoisier, 2009.
3. *Stockage de l'énergie* : https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_r%C3%A9nergie.
4. Labouret & Viloz, 'Énergie solaire photovoltaïque', 4eed, Dunod, 2009.
5. <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie>
6. '*Ressources énergétiques - Web Sciences*' : www.web-sciences.com/documents/premiere/pedo15/peco15.php
7. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Environnement>
8. Sylvain David, 'La problématique des sources d'énergie du futur'. CNRS Institut de Physique Nucléaire d'Orsay sdavid@ipno.m2p3.fr.
9. D. Doumont & F. Libion, 'Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme ?' Série de dossiers techniques, Service Communautaire de Promotion de la Santé avec le soutien de la Communauté française de Belgique en collaboration et pour le cabinet de la Ministre de l'Enfance, de l'Aide à la Jeunesse et de la Santé.
10. 'Déchets Énergie Environnement : Etude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020', Les cahiers du clip N ° 5 - Juillet 1996.
11. Bernard Durand, 'Énergie et environnement les risques et les enjeux d'une crise annoncée', EDP Sciences 17, avenue du Hoggar Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112 91944 Les Ulis Cedex A - France.
12. <http://www.japprends-lenergie.fr/upload/enjeux/ressources/japprendslenergie-energie-definitions-et-principes.pdf>.
13. http://www.lyc-vinci-st-witz.acversailles.fr/IMG/pdf/chapitre17_ressources_energetiques_corrige_.pdf.
14. *Environnement - Wikipédia* : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Environnement>.
15. *Toupictionnaire : le dictionnaire de politique*, <http://www.toupie.org/Dictionnaire/Environnement.htm>
16. *Le salon online de l'industrie* : <http://www.directindustry.fr/prod/bruker-optics/product-57234-841975.html>
17. C. Caboot, A. Kerckhoven et L. Verstraeten. 'Catégorie Paramédicale SECTION Soins infirmiers - Méthodologie de la Recherche - 3e Bac. en Soins Infirmiers' (2012/2013), Haute Ecole Libre de Bruxelles - Ilya PRIGOGINE.
18. Kumar A, Kandpal TC. Potential and cost of CO2 emissions mitigation by using solar photovoltaic pumps in India. *Int J Sustain Energy* 2007;26(3):159-66.
19. Kralova I, Sjoblom J. Biofuels-renewable energy sources: a review. *J Dispers Sci Technol* 2010;31(3):409-25.
20. Iorente L, Alvarez JL A', Blanco D. Performance model for parabolic trough solar thermal power with thermal storage: comparison to operating plant data. *Sol Energy* 2011;85:2443-60.
21. Gaudiosi G. Offshore wind energy prospects. *Renew Energy* 1999;16(1-4):828-34.
22. Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2002;6:3-65.
23. M. Anisse chiali. Polycopié de cours. Du module : « introduction aux énergies renouvelables ».

Destiné aux étudiants de : troisième année. École supérieure en sciences appliquées de Tlemcen 2018 / 2019

26. Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA, et al.
27. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 2006;311(5760):484-9.
28. Wydrzynski TJ, Satoh K. (editors). *Photosystem II: The Light-Driven Water: Plastoquinone Oxidoreductase*, *Advances in Photosynthesis and Respiration*;
29. 2006; 87. p. 331-5.
30. International Energy Agency. *Renewables in global energy supply. An IEA facts sheet* OCED; 2007.
31. J. Crus Ed. *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. Springer: Berlin; 2008
32. Vining JG, Muetze A. Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion. *IEEE Trans Ind Appl* 2009;45(2):547-54.
33. Takahashi P, Trenka A. *Ocean thermal energy conversion*. New York: Wiley; 1996.
34. Pelc Robin, Fujita Rod M. *Renewable energy from the ocean*. *Mar Policy* 2002;26:471-9.
35. Gareth P, Harrison , Robin Wallace A. Climate sensitivity of marine energy. *Renew Energy* 2005;30:1801-17.
36. Shields a Mark A, Woolf DK. The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment *Ocean & coastal management. Mar Renew Energy* 2011;54:2-9.
37. Boehlert Gorge W, Gil An drew B. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development. *Oceanography* 2010;23(2):68-81.
38. Wright Glen. Marine governance in an industrialized ocean: a case study of the emerging marine renewable energy industry. *Mar Policy* 2015;52:77-84.
39. Kerr Sandy, Colton John, Johnson Kate, Wright Glen. Rights and ownership in sea country: implications of marine renewable energy for indigenous and local communities. *Mar Policy* 2015;52:108-15.
40. Quirapas Ann Joy Robles, Lin Htet. Ocean renewable energy in Southeast Asia: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;41:799-817.
41. Lewis A, Estefen S, Huckerby J, Musial W, Pontes T, Torres-Martinez J. *Ocean energy. IPCC Spec Rep Renew Sources Clim Change Mitig* 2011, [chapter 6].
42. OES, *Annual report on implementing agreement on ocean energy systems*; 2014
43. Flavin C, O Meara M. Financing solar electricity. *World Watch* 1997;10(3):261-74.
44. Ricardo Guerrero-Lemus, Jose' Manuel Martinez-Duart. *Renewable Energies and CO2* (2012 Edition). pp 9-31