

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



Polycopié de cours du module

« *Énergies et environnement* »

Destiné aux étudiants du Socle commun « 3^{eme} semestre »

Domaine Sciences et Technologies

Filières « Electronique et Electrotechnique »

Elaboré par :

S. Kouda

MCB à l'Université de M'SILA

Septembre 2017

Préambule

Ce cours « énergies et environnement » est destiné aux étudiants de la deuxième année licence en électronique et électrotechnique « la section A du domaine sciences et technologie ». Le but de ce cours est de faire connaître à l'étudiant les différentes énergies existantes, leurs sources et l'impact de leurs utilisations sur l'environnement. Pour cela, le cours est présenté sous forme d'une description détaillée des ressources d'énergies « avantages, inconvénients, consommations, réserves et techniques de stockage », ainsi les différents types de pollutions « voir la détection, le traitement des pollutions, le traitement des déchets et enfin leurs impacts sur la santé et sur l'environnement ». Puisque le défi mondial actuel est la production de l'énergie non polluante, nous nous focalisons dans ce cours, sur les énergies renouvelables, notamment « l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne », en tenant en compte la conformation au programme officiel.

Notre cours est divisé en huit parties :

La première partie « **Généralités sur l'énergie et l'environnement** » présente les notions fondamentales sur l'énergie et de l'environnement « relation entre l'énergie et la puissance, catégories d'énergies, définition de l'environnement,...etc. ».

La deuxième partie « **Energies non renouvelables** » décrit les deux familles des énergies non renouvelables ; les énergies fossiles « charbon, pétrole et gaz » et les énergies fissiles « fusion nucléaire et fission nucléaire ».

La troisième partie « **Energies renouvelables** » est consacrée aux différentes énergies renouvelables « énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, énergie biomasse, ...etc. ». Vue l'importance de ces énergies, et plus particulièrement l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque vis-à-vis les étudiants constituant la section A, et vue aussi la diversité de ces énergies, nous avons présenté plus de détails par rapport aux autres parties.

La quatrième partie « **Stockage d'énergie** » montre les techniques actuelles de stockage d'énergie et les principales caractéristiques de chaque technique. Nous présentons aussi les avantages/inconvénients et les chiffres de chaque technique.

La cinquième partie « **Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie** » présente les chiffres d'utilisation et de production d'énergie par type d'énergie et par zone « mondiale, continent et en Algérie ».

La sixième partie « **Différents types de pollutions** » définit les différentes sortes et catégories de pollutions, ainsi que les sources et les types des polluants.

La septième partie « **Détection et traitement des polluants et des déchets** » permet de citer les différentes techniques de détection des polluants et de gestion des déchets « traitement et valorisation ».

La dernière partie « **Impact des pollutions sur la santé et l'environnement** » est enfin pour objectif de présenter les risques et les conséquences préjudiciables à notre santé « maladies » et à l'environnement « écosystème » dues aux pollutions.

Contenu du cours

Partie 1 : Généralités sur l'énergie et l'environnement

I. 1.	Définition de l'énergie	1
I. 2.	Relation entre la puissance et l'énergie	1
I. 3.	Formes d'énergie	2
I. 4.	Convertisseurs énergétiques	3
I. 5.	Catégories énergétiques	3
I. 6.	Sources d'énergie	4
I. 7.	Définition de l'environnement	4
I. 8.	Environnement et activités humaines	4

Partie 2 : Energies non renouvelables

II.1.	Définition des énergies non renouvelables	6
II.2.	Energies fossiles	6
II. 2. 1.	Charbon :	6
II. 2. 2.	Carburants issus du pétrole	7
II. 2. 3.	Gaz naturel	9
II. 2. 4.	Energies fissiles	10

Partie 3 : Energies renouvelables

III. 1.	Définition des énergies renouvelables	12
III. 2.	Energie éolienne	12
III. 2. 1.	Différents types des éoliennes	12
III. 2. 2.	Chiffres clés	14
III. 2. 3.	Fonctionnement d'une éolienne	14
III. 2. 4.	Placement des éoliennes	16
III. 2. 5.	Conversion de l'énergie du vent	17
III. 2. 6.	Limite de Betz	18
III. 3.	Énergie solaire	20
III.3. 1	Énergie solaire thermique	20
III.3. 2	Électricité solaire thermodynamique	20
III.3. 3	Énergie photovoltaïque	21
III. 4.	Énergie hydraulique	26
III. 5.	Biomasse	27
III. 6.	Énergie géothermique ou aérothermique	28

Partie 4 : Stockage d'énergie

IV. 1.	Définition et généralités sur le stockage d'énergie	29
IV. 2.	Stockage de l'électricité	30
IV. 2. 1.	Stockage direct de l'électricité	30
IV. 2. 2.	Stockage indirect de l'électricité	31
IV. 3.	Stockage thermique « de la chaleur »	35
IV. 4.	Résumé des chiffres de stockage massif d'énergie	35

Partie 5 : Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

V. 1.	Consommation mondiale d'énergie	36
V. 2.	Part des énergies dans la consommation mondiale	36
V. 3.	Consommation d'énergie par région	38
V. 4.	Evolution de la demande énergétique mondiale	39
V. 5.	Evolution et perspectives de la production et la consommation d'énergie en Algérie	39

Contenu du cours

Partie 6 : Différents types de pollutions

VI. 1.	Introduction	44
VI. 2.	Types de pollution	44
VI. 3.	Sortes de pollutions	45
VI. 3. 1.	Pollution de l'air	45
VI. 3. 2.	Pollution de l'eau	47
VI. 3. 3.	Pollution du sol	50

Partie 7 : Détection et traitement des polluants et des déchets

VII. 1.	Introduction	52
VII. 2.	Modèles économiques pour protection de l'environnement	52
VII. 3.	Détection et mesure de pollution	53
VII. 4.	Gestion des déchets	54
VII. 5.	Catégories de déchets	55
VII. 6.	Triage et valorisation des déchets	56
VII. 7.	Gestion des déchets en Algérie	57

Partie 8 : Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

VIII. 1.	Introduction	58
VIII. 2.	Effets de la pollution sur la santé	58
VIII. 2. 1.	Effets de la pollution de l'air sur la santé	58
VIII. 2. 2.	Effets de la pollution de l'eau sur la santé	60
VIII. 2. 3.	Effets de la pollution du sol sur la santé	61
VIII. 3.	Effets de la pollution sur l'environnement	62

Partie 1 : Généralités sur l'énergie et l'environnement

I. 1. Définition de l'énergie

L'énergie est une base essentielle pour le développement social et économique. Le mot «énergie», d'usage très répandu, vient du mot grec « energia » qui signifie « force en action ». Elle existe sous plusieurs formes telle que, l'énergie mécanique, l'énergie chimique, l'énergie électrique, l'énergie rayonnante, l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire,...etc.

D'une manière générale, un système possède l'énergie, s'il est capable de produire une transformation de son énergie « exemple : l'énergie chimique de nos cellules est transformée dans nos muscles en énergie mécanique qui produit un mouvement » ou d'échanger de l'énergie « exemple : chaleur transmise par un radiateur ».

La mesure de l'énergie se fait ainsi à travers ses effets et ses variations. L'unité utilisée par les physiciens pour mesurer l'énergie est le joule (J). Les économistes utilisent plutôt la tonne d'équivalent pétrole (tep), les médecins nutritionnistes la calorie (cal). En électricité nous utilisons le wattheure (Wh) ou le kilowattheure (kWh).

Note : L'énergie ne se crée pas, ne se perd pas : elle se transforme". C'est le principe de la conservation de l'énergie. Lorsqu'un système n'a aucun échange avec le milieu extérieur, on admet que son énergie reste constante et on dit qu'il est isolé.

I. 2. Relation entre la puissance et l'énergie

La puissance n'est pas un synonyme de l'énergie, la relation entre l'énergie et la puissance se ressemble à la relation entre la distance et la vitesse. La différence entre la distance et la vitesse est que la vitesse est divisée par le temps. Lors des échanges d'énergies, on mesure la quantité d'énergie transférée ou transformée ainsi que la durée de son processus. Par contre, la puissance d'un système nous renseigne sur la rapidité avec laquelle l'énergie a été produite ou consommée.

<i>Exemple</i>	
1)	Vingt litres d'essence contiennent une quantité d'énergie de 250 kWh.
➤	Quelle est la puissance développée, si ces 20 litres sont consommés en 5 heures par une voiture ?
➤	Quelle est la puissance dégagée, s'ils sont brûlés en 10 secondes ?
2)	Quelle est l'énergie, consommée, qui augmente la facture d'électricité, par une ampoule de 100W allumée pendant 30 jours ?
<i>Solution</i>	
1)	
➤	$P = \frac{250KWh}{5h}$; $P = 50 kW$
➤	$P = \frac{250KWh}{0.0028h}$; $P \approx 90 MW$
2)	$E = 100 W * 24 h * 30 j = 72kWh$

I. 3. Formes d'énergie

L'énergie existe sous diverses formes, toutes liées et chaque forme peut être convertie ou modifiée dans une autre forme.

a) Énergie mécanique

L'énergie mécanique est due aux mouvements « énergie cinétique ; par exemple, l'énergie d'une feuille tombant d'un arbre ou d'une voiture qui provient de la combustion du fuel dans le moteur » ou due aussi à la position « énergie potentielle ; par exemple, l'énergie potentielle de l'eau dans un barrage ».

b) Énergie chimique

La création ou la rupture de liaisons chimiques se traduit par une libération d'énergie, généralement sous forme de chaleur. A titre d'exemple l'énergie chimique dérivée par le processus de respiration qui alimente le corps humain ou l'énergie dérivée de l'essence.

c) Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est une énergie libérée par des réactions nucléaires impliquant le noyau de certains atomes « d'un matériau radioactif », soit par fission ou fusion des noyaux. Par exemple l'énergie du soleil est produite à partir d'une réaction de fusion nucléaire dans laquelle les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium.

d) Énergie thermique

L'énergie thermique est due aux mouvements des atomes ou molécules d'un corps, on l'obtient de plusieurs sources : soleil, combustion du bois et des fossiles « charbon, pétrole, gaz » ou électricité « effet Joule ».

e) Énergie radiative « rayonnante ou lumineuse »

L'énergie radiative est très fréquente dans notre quotidien ; le soleil nous éclaire, un radiateur nous chauffe ou encore un four à micro-onde réchauffe nos aliments. Le soleil est une source importante de radiation reçue sur Terre. L'énergie radiative est la seule énergie qui peut se propager dans le vide, en l'absence de matière.

I. 4. Convertisseurs énergétiques

La conversion d'énergie est le processus de changement d'énergie d'une de ses formes à une autre. Cette conversion est nécessaire afin de rendre l'énergie compatible avec l'utilisation envisagée. Par exemple, pour chauffer une maison, le four brûle le carburant, donc une énergie chimique est convertie en énergie thermique, qui est ensuite transférée à l'air de la maison afin d'élever sa température.

Exemple	
Plantes (photosynthèse)	énergie rayonnante de la lumière → énergie chimique.
Corps humain (muscles)	énergie chimique → énergie mécanique
Télévision	Electricité → énergie lumineuse (images) et mécanique (sons).
Centrale nucléaire	énergie nucléaire → énergie thermique (réacteur) → énergie mécanique (turbine) → énergie électrique (alternateur).

I. 5. Catégories énergétiques

L'énergie primaire correspond à l'énergie avant transformation, c'est par exemple le cas du pétrole brut, du charbon ou l'énergie potentiel de l'eau d'un barrage. L'énergie secondaire est obtenue après transformation ; essence ou gasoil à partir du pétrole, charbon de bois à partir du bois, électricité à partir du gaz naturel... etc. L'énergie finale est celle utilisée par le consommateur comme l'électricité arrivant à domicile, ou le fioul domestique. Enfin, l'énergie utile est celle utilisée réellement pour l'usage requis.

Exemple
Quelles sont, les quatre catégories énergétiques, d'une ampoule alimentée par une électricité d'origine nucléaire ?
Solution
<ul style="list-style-type: none"> ➤ l'énergie primaire correspond à l'énergie potentiellement contenue dans l'uranium. ➤ l'énergie secondaire est l'électricité produite dans la centrale nucléaire (environ le tiers de l'énergie primaire). ➤ l'énergie finale est celle qui arrive au compteur d'électricité du consommateur (après les pertes dues au transport). ➤ l'énergie utile est l'énergie utilisée par l'ampoule (environ la moitié de l'énergie finale).

I. 6. Sources d'énergie

Les sources d'énergie sont soit des matières premières « pétrole, gaz, charbon, ... » soit des phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie « le soleil, le vent, », on peut classer ces sources en énergie non renouvelable et renouvelable.

➤ Energies non renouvelables

Une énergie non renouvelable est une énergie épuisable « qui disparaît quand l'on utilise », elle est constituée de substances qui mettent des millions d'années à se reconstituer. Il existe deux familles d'énergie non renouvelable

- ✓ L'énergie fossile
- ✓ L'énergie fissile

➤ Energies renouvelables

Il y en a plein des énergies renouvelables autour de nous, on s'en sert depuis des milliers d'années et si on respecte bien la nature, on continuera encore longtemps. Elles dépendent d'éléments que la nature renouvelle quotidiennement : le vent, le soleil, le bois, l'eau, la chaleur de la Terre. Mais certaines peuvent disparaître aussi si on ne les protège pas. Elles ont largement contribué au développement de l'humanité: moulins à eau, moulins à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile.

I. 7. Définition de l'environnement

L'environnement est évolué dans plusieurs conceptions ou représentations en fonction des individus ou des pays ; Les géologues appréhendent l'environnement par l'étude des sols, les écologues par l'activité des êtres vivants, les géographes par la gérance et l'occupation du territoire, les ingénieurs en fonction de leurs domaines, les économistes par la gestion des ressources naturelles, les juristes sous l'angle des contraintes réglementaires, les philosophes par la morale et l'éthique ...

L'environnement est constitué de l'ensemble des conditions naturelles ou artificielles « physiques, chimiques et biologiques » et culturelles « sociologiques » de la biodiversité terrestre et marine, susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines.

I. 8. Environnement et activités humaines

Les activités humaines dégradent l'environnement, prélèvement des ressources sans souci de leur renouvellement, déforestation, éradication des espèces animales et végétales, polluent « les eaux, les sols et l'air » et menacent la survie de tous.

Aujourd'hui, les ressources des énergies non renouvelables sont consommées de façon massive « dans la plupart du temps jusqu'à épuisement », de plus les étapes de l'exploitation et de la consommation de ces ressources sont extrêmement nocives pour l'environnement. Les rejets des gaz à effet de serre réchauffent progressivement notre planète et le niveau de pollution de la Terre est très inquiétant. Les habitats de la biodiversité sont majoritairement menacés.

Ainsi, afin de préserver ces ressources pour maintenir la vie sur terre, il a fallu qu'en mette en œuvre des actions au quotidien pour créer un équilibre entre l'utilisation des ressources naturelles et

la protection de l'environnement qui permet de réduire le gaspillage, limiter les pollutions, économiser les ressources, ...etc. Ceci, requiert une volonté politique, une implication forte des pouvoirs publics, des entreprises, de tous les citoyens, une évolution des mentalités et des changements de comportement de tous.

Partie 2 : Energies non renouvelables

II.1. Définition des énergies non renouvelables

Une ressource énergétique non renouvelable est une ressource qui détruite lors de son utilisation et/ou qui se renouvelle plus lentement que la vitesse avec laquelle on l'utilise.

II.2. Energies fossiles

Le terme « énergie fossile » désigne l'énergie produite à partir des matières premières que l'on trouve sous terre comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel. Ces matières premières sont issues de la décomposition de matières organiques « végétaux et organismes vivants ». Les énergies fossiles représentent aujourd'hui plus des trois quarts de la consommation mondiale d'énergie « transport, industries, chauffage,...etc. ».

II. 2. 1. Charbon

Le charbon est un terme générique qui désigne des roches sédimentaires d'origine biochimique et riches en carbone. Ces roches sont des combustibles fossiles qui se sont formées au Carbonifère, par lente transformation d'organismes morts sédimentés, sous l'action de la pression et de la température au cours des temps géologiques. Peu à peu, la tourbe constituée par les organismes morts se transforme ainsi en charbon, d'abord sous la forme de houille, puis de lignite et enfin d'antracite.

➤ Production d'électricité par le charbon

Le charbon fut la source d'énergie de la révolution industrielle du 18^{ème} siècle et ne fut supplanté comme source d'énergie principale en Occident qu'au 20^{ème} siècle, avec l'essor du pétrole.



Fig 1 : Centrale à charbon

Le charbon est une source d'énergie fiable, exploitée dans de nombreux pays dans la production de l'électricité, à travers des centrales thermiques. Le principe de fonctionnement de ces centrales est simple: l'électricité est produite par transformation de l'énergie générée par la combustion du charbon.

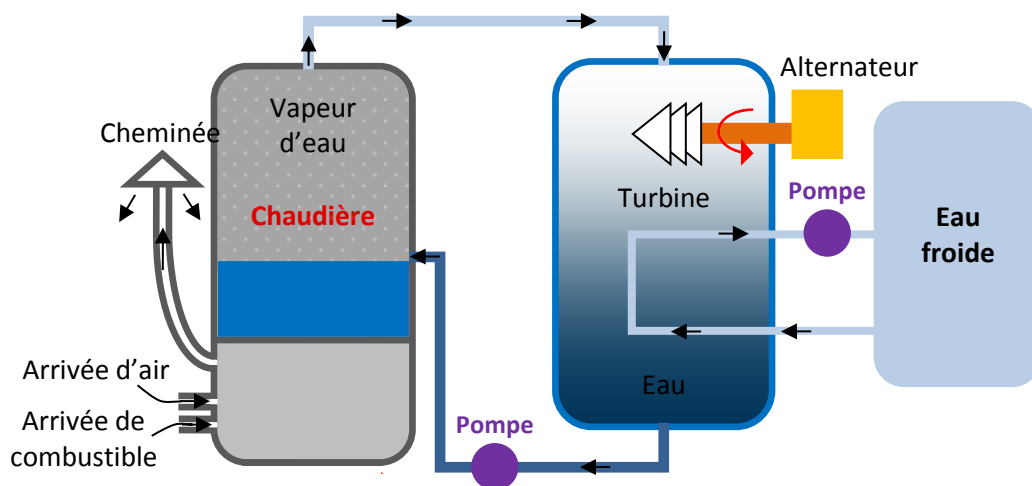


Fig 2 : Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

➤ Principe de fonctionnement d'une centrale thermique

La chaleur produite dans la chaudière par la combustion du charbon, gaz ou autre, vaporise de l'eau. Cette vapeur d'eau est alors transportée sous haute pression et sous haute température vers une turbine. Sous la pression, les pales de la turbine se mettent à tourner. L'énergie thermique est donc transformée en énergie mécanique. Celle-ci sera, par la suite, transformée à son tour en énergie électrique via un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur est retransformée en eau « condensation » au contact de parois froides pour être renvoyée dans la chaudière où le cycle recommence.

II. 2. 2. Carburants issus du pétrole

Le pétrole brut, est une huile minérale foncée et visqueuse qui viens du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non

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

La distillation du pétrole brut est réalisée en deux étapes complémentaires. Une première distillation dite atmosphérique permet de séparer les gaz, les essences et le naphta « coupes légères », le kérosène et le gazole « coupes moyennes) et les coupes lourdes. Les résidus des coupes lourdes subissent ensuite une distillation dite sous vide afin de séparer certains produits moyens.

L'essence contient des métaux comme le plomb, rejetés dans l'air en même temps que les gaz d'échappement. Les rejets de plomb sont nocifs pour la santé et l'environnement.

Le gazole est le carburant utilisé dans les moteurs Diesel. Le rendement énergétique du moteur Diesel est bien supérieur à celui du moteur à essence, il émet 14 fois plus de particules et il contient du soufre responsable de la formation de dioxyde de soufre SO_2 . Ces particules sont responsables de la pollution de l'air.

Le pétrole peut devenir aussi après transformation, du kérosène, ce carburant est un peu plus lourd que l'essence mais plus léger que le gazole, il est utilisé pour les avions.

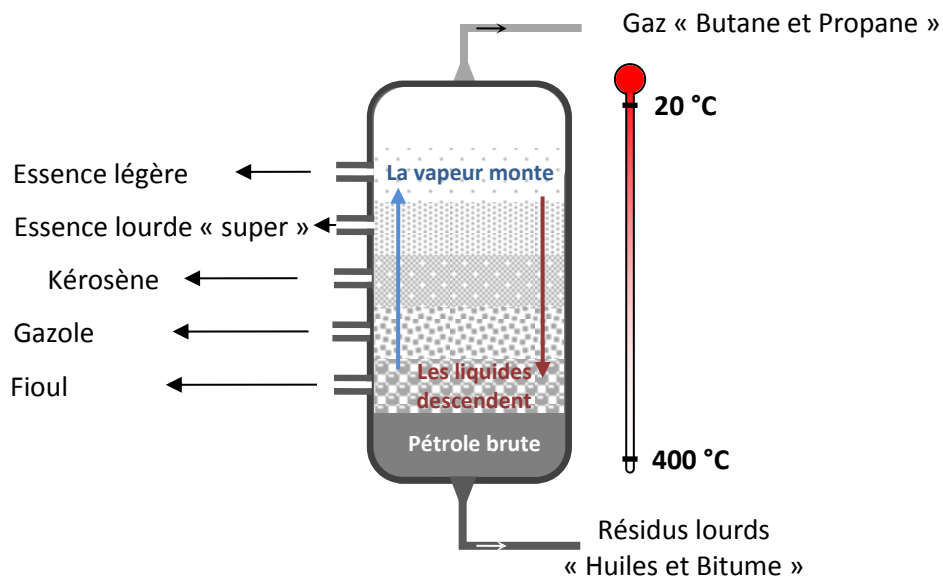


Fig 3 : Raffinage pétrolier

Le tableau 1 montre les opérations principales utilisées pour transformer le pétrole brut en produits finis, suivant des processus rigoureux.

Tab 1 : Opérations principales de transformation du pétrole brut en produits finis

1-Distillation		2-Unité de raffinage		3-Fabrication des produits
Pétrole brute		traitement	Amélioration de la qualité des coupes et fabrication des bases	Mélange des bases et contrôle de la qualité
Produits légers	Gaz (1%)	Gaz combustible		Four de raffinerie
		propane		Propane commercial
		butane		Butane commercial
Produits légers	Essence (22%)	Essence léger	Ethérification, Isomérisation, Alkylation	Carburant auto
		Essence lourd	Reformage et craquage catalytique	
Produits moyens	Kérosène (9%)		Adoucissement ou hydrotraitement	Kérosène Adouci (Avion)
	Gazole (27%)	Gazole léger	Hydrodésulfuration	Gazole (moteur fuel, domestique)
Gazole lourd				
Produits lourds	Coupes lourds (41%)	Distillats	craquage catalytique	Fuels lourds (usine, bateaux)
		Résidus sous-vide « fond du baril »	Viscoréduction	Fuels lourds et bitumes (pavage des routes)

II. 2. 3. Gaz naturel

Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air.

Le gaz est un très bon combustible qu'on utilise pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons, produire du chauffage,... etc. il se trouve dans des poches à des profondeurs entre 3 000 et 4 000 mètres sous la surface de la Terre.

Le gaz de schiste est un gaz naturel retenu à grande profondeur dans certains schistes des bassins sédimentaires. Il n'est donc pas retenu sous une couche imperméable, comme c'est le cas pour les gisements dits « conventionnels » de gaz ou de pétrole, mais emprisonné dans la roche elle-même. Pour l'en extraire, il faut opérer une fracturation de cette roche, obtenue par injection d'eau sous pression, mélangée à quelques additifs « on parle d'hydro-fracturation ».

L'exploitation de gaz de schiste est coûteuse par rapport au gaz conventionnel et présente des risques pour l'environnement, dans le sous-sol, dans les nappes phréatiques et en surface. La concentration en gaz est plus faible que dans les gisements conventionnels mais les zones concernées sont plus étendues. La potentialité de ces gisements, qui sont exploités depuis plusieurs années, surtout aux États-Unis, est énorme.

Le gaz naturel est utilisé dans certaines voitures en Algérie, elles sont appelées voitures au GPL « Gaz de propane liquéfié » et dans certains bus en Europe, appelés bus au GNV « Gaz naturel pour véhicule ».

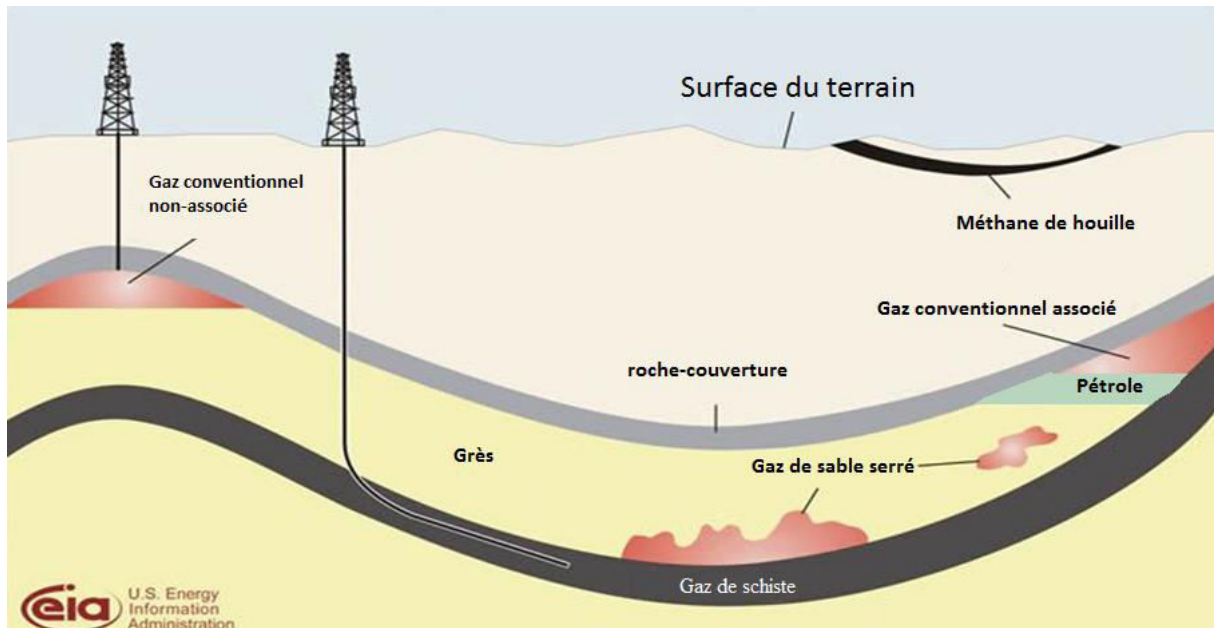


Fig 4 : Schématisation géologique des gisements d'hydrocarbures

Source : <https://www.eia.gov/>.

II. 2. 4. Energies fissiles

L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison entre les constituants du noyau d'atome. Ce noyau est un assemblage de protons, de charge positive, et de neutrons sans charge très fortement liés malgré la répulsion électrique entre protons. Le noyau est extrêmement compact « 10^{-12} mm », 100 000 fois plus petit que l'atome lui-même.

Dans les atomes lourds ; le noyau contient beaucoup de protons qui se repoussent. Certains de ces noyaux « par exemple d'uranium ou de thorium » peuvent devenir instables et se rompre en libérant une partie de leur énergie de liaison. C'est **la fission** de l'atome.

Dans les atomes très légers ; deux noyaux peuvent se fondre pour former un atome plus lourd mais plus stable en dégageant une énergie considérable. C'est **la fusion**, par exemple de noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. Les projets actuels pour ce type d'énergie sont des réacteurs de recherche, d'évaluateurs et de prototypes, étalés dans le temps, pourraient aboutir à la réalisation de réacteurs destinés à la production commerciale d'électricité vers 2100.

Une centrale nucléaire de production d'électricité utilise la chaleur libérée par l'uranium qui constitue le « combustible nucléaire ». L'objectif est de faire chauffer de l'eau afin d'obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permet de faire tourner à grande vitesse une turbine, laquelle entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

Ce principe de fonctionnement est le même que celui qui est utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon voire la figure 2, du pétrole ou du gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par l'uranium.

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire peut donc être schématisé comme suit :

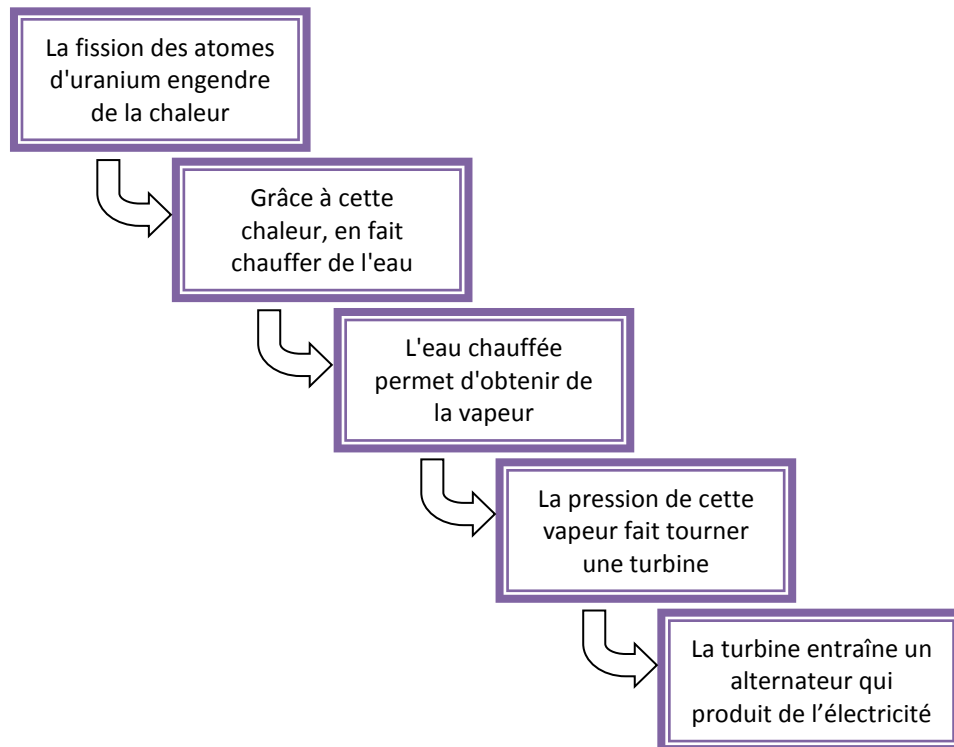


Fig 5 : schéma de principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire

Partie 3 : Energies renouvelables

III. 1. Définition des énergies renouvelables

Une ressource énergétique renouvelable est une ressource qui n'est pas détruite lors de son utilisation et/ou qui possède la capacité de se renouveler naturellement, au moins à la même vitesse qu'elle est utilisée. Il y en a plein autour de nous, au-dessus de nos têtes et même sous nos pieds ! Ces ressources dépendent d'éléments que la nature renouvelle en permanence : le vent, le soleil, le bois, l'eau, la chaleur de la Terre, ...etc. On s'en sert depuis des milliers d'années « elles ont largement contribué au développement de l'humanité: moulins à eau, moulins à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile » et on continuera encore longtemps si on respecte bien la nature « certaines peuvent disparaître aussi si on ne les protège pas ».

III. 2. Energie éolienne

Le mot « éolien » vient du grec Eole, le dieu des vents. Le terme signifie également « rapide », « vif » ou « inconstant ». L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

Le vent a été une des premières ressources naturelles à avoir été utilisée, avec l'eau et le bois, pour faciliter la vie de l'homme. En maîtrisant la force du vent, l'homme a pu naviguer et découvrir de nouvelles terres ou encore mouliner les grains avec des moulins à vent.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne, dite aussi aérogénérateur, permet de produire de l'électricité. L'éolienne, est une machine qui permet de transformer l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité.

Note : Lorsque l'on ne produit qu'une énergie mécanique, on parlera seulement d'éolienne de pompage d'eau.

III. 2. 1. Différents types des éoliennes

Il existe deux grands types d'éoliennes, caractérisées par la position de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent :

A- Les éoliennes à axe horizontal : Elles sont actuellement les plus répandues à travers le monde, du fait de leur meilleur rendement, elles sont orientables mais manquent de couple au démarrage. Elles sont constituées d'une à trois pales, plus souvent trois pales, car trois pales

constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

Amont: le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle, figure 6 (a).

Aval: le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle figure 6 (b).

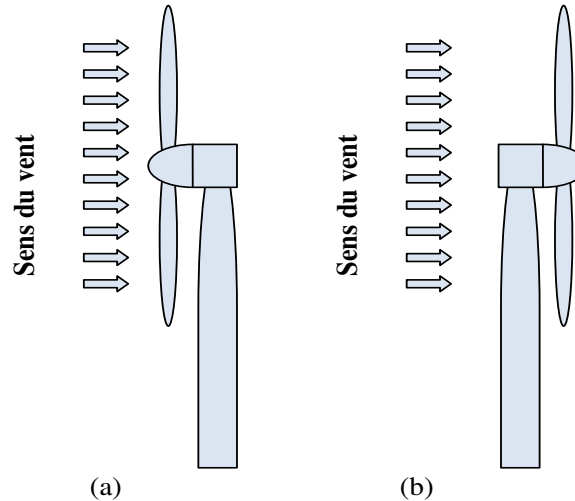


Fig 6 : Eolienne à axe horizontal (a) amont (b) aval

Note : l'éolienne à axe horizontal est plus en avance, car sa technologie est utilisée dans l'industrie aéronautique « dans la fabrication des hélices du rotor d'hélicoptère » et leur rendement aérodynamique est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical.

Eolienne horizontale

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ elle s'oriente d'elle même pour s'adapter à la direction du vent. ➤ facilité pour trouver un vendeur/installateur. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ moins résistante aux vents forts. ➤ nécessité d'être renforcée recours à des mâts haubanés, installation d'un frein au niveau du rotor.

B- Les éoliennes à axe vertical : Les pales de ces éoliennes tournent autour d'une tige positionnée verticalement. Elles ont une conception plus simple, un rendement plus faible, plus volumineuses, plus fragiles mécaniquement et d'un entretien plus difficile. Leur principal avantage est son capacité à capter des vents faibles, elle n'a donc pas besoin de vents puissants, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Cependant l'éolienne verticale démarre moins vite car le poids des rotors pèse sur l'axe, et provoque des frottements. Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical :

Darrius: A pales verticales, paraboliques ou hélicoïdales, les éoliennes de ce type utilisent la force de portance du vent, comme les éoliennes classiques.

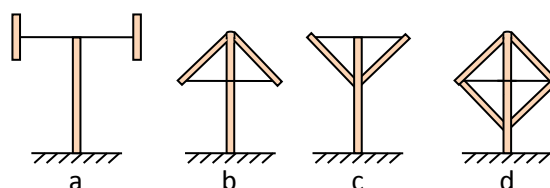


Fig 7 : Eolienne verticale « Darrieus », (a) H, (b) delta, (c) Y et (d) diamant

Savonius: formées de moitié de barils disposés en S, pivotant autour d'un axe vertical et démarrant facilement lors des vents faibles, ne supportant pas des vents violents.

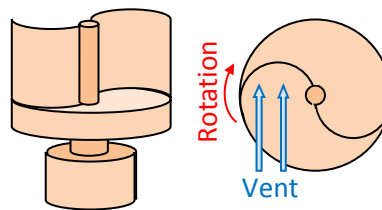


Fig 8 : Eolienne verticale savonius

Eoliennes verticale

Avantages	inconvénients
Darrieus	
<ul style="list-style-type: none"> - émet moins d'encombrement qu'une éolienne horizontale - occupe moins de place. - Intégrable au bâtiment. - génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles) Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement. 	<ul style="list-style-type: none"> - démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator - faible rendement.
Savonius	
<ul style="list-style-type: none"> - esthétique et la possibilité de l'installer sur une toiture - fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction - émet peu de bruit 	<ul style="list-style-type: none"> - le faible rendement. - la masse non négligeable. <p>le couple non constant au cours de la rotation.</p>

III. 2. 2. Chiffres clés

- ✓ une éolienne terrestre peut produire une puissance de quelques **kW à 3 MW**
- ✓ une éolienne en mer « offshore » peut produire une puissance de **3 à 6 MW**
- ✓ Une éolienne moderne nécessite un vent d'au moins **5m/s (18 km/h)**
- ✓ Une éolienne nécessite un vent à une vitesse minimale de **11 m/s (40 km/h)** pour avoir une puissance produite convenable.
- ✓ A partir de **25 m/s (90 km/h)**, l'éolienne doit être arrêtée car elle risquerait d'être endommagée

Note : Un parc éolien, composé de quatre à six éoliennes, de puissance **12 MW**, couvre les besoins de près de 12 000 personnes en consommation d'électricité et chauffage.

III. 2. 3. Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne ressemble à une hélice, elle est, généralement, constituée de 2 ou 3 pales. Elle se compose d'un mât « la tour sert à soutenir le rotor », d'un rotor « tourne sous la force du vent »,

d'une nacelle « contient les éléments pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique » et une boîte d'engrenages ainsi qu'une génératrice.

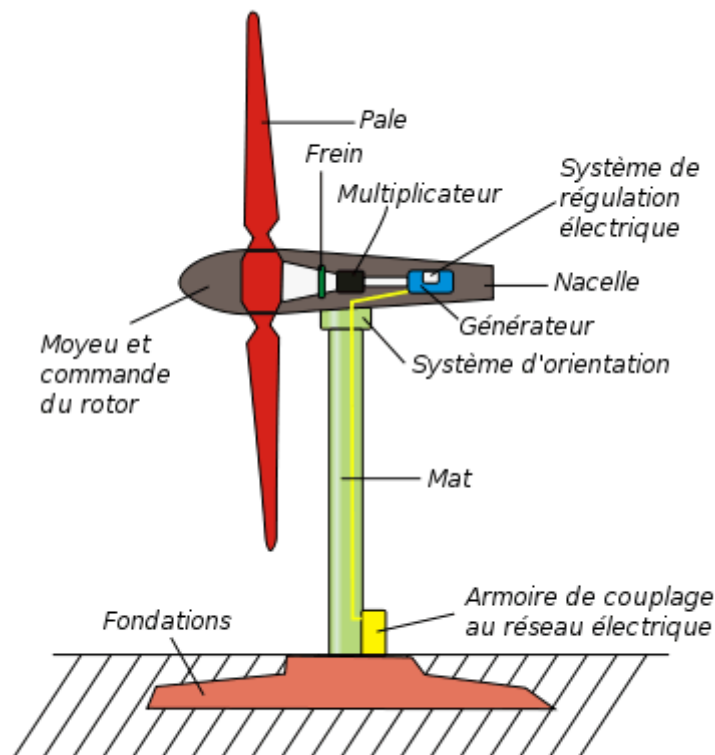


Fig 9 : Schéma d'une éolienne

Source : www.eolienne-particulier.info/

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, selon plusieurs étapes:

1. **transformation de l'énergie par les pales** : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
2. **accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur** : les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.
3. **production d'électricité par le générateur** : l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.
4. **traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur** : l'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique.

Note : Plus on augmente la taille des pales de l'éolienne, plus sa puissance augmente.

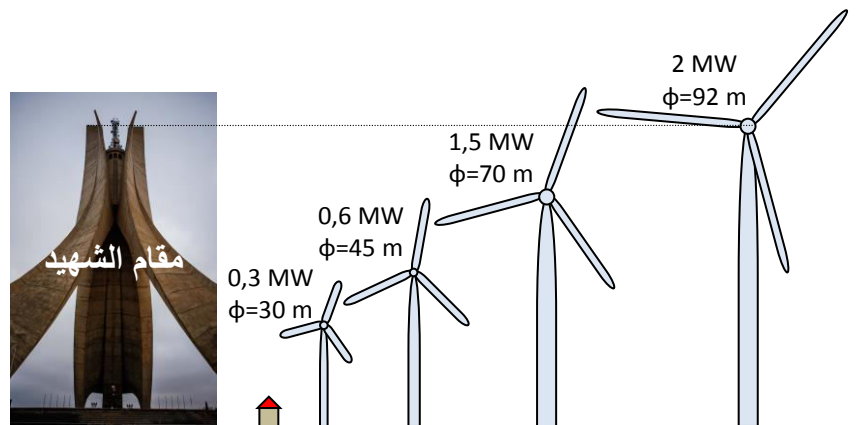


Fig 10 : Relation entre le diamètre du rotor de l'éolienne et sa puissance

Note :

- La théorie prévoit qu'en augmentant le nombre de pales, on augmente le rendement de l'éolienne. Mais en prenant en compte de critères supplémentaires « rigidité, esthétique, ...etc. », on arrive à un optimum pour 3 pales.
- Il est important sur un site donné, d'aller chercher le vent là où la vitesse sera la plus élevée, et donc de s'éloigner du sol. En effet, le sol ralentit le vent, d'où l'image classique de ces installations de pales en hauteur portées par un mât.

III. 2. 4. Placement des éoliennes

Les éoliennes peuvent être placées sur terre « **éolien terrestre** ». Mais elles peuvent aussi être placées en mer. On parle alors d'éolien maritime ou « **offshore** ».

La première étape, avant l'installation d'un parc éolien, est de faire une synthèse sur le site, où les éoliennes doivent être placées, y compris la hauteur optimale, les préoccupations environnementales et les coûts. Il est donc très important que notre site doit en particulier:

- ✓ être suffisamment venté. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Des études de vent sur le site sont donc indispensables;
- ✓ être facile à relier au réseau électrique de haute ou moyenne tension;
- ✓ être facile d'accès;
- ✓ ne pas être soumis à certaines contraintes « aéronautiques, radars,... etc. »;
- ✓ prendre en compte le patrimoine naturel, en particulier l'avifaune « faune animale des oiseaux » et la faune marine pour l'éolien maritime et éviter les zones protégées « telles que les réserves » ;
- ✓ ne pas prendre place dans des secteurs architecturaux ou paysagers sensibles « sites inscrits et classés, paysages remarquables...etc. » ;
- ✓ être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

Cependant, il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones. Mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole.

Les éoliennes en mer doivent être installées à moins de 30 m de profondeur et à plus de 30 km des côtes. Elles bénéficient de vents plus réguliers et plus forts.

III. 2. 5. Conversion de l'énergie du vent

Une éolienne permet de capturer et de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique « rotor qui tourne ». Pour pouvoir estimer la puissance électrique produite par une éolienne, il est nécessaire de connaître quelle est la puissance du vent, et quelle part de celle-ci sera récupérable par l'éolienne. Supposons une veine de vent passant à travers une éolienne.

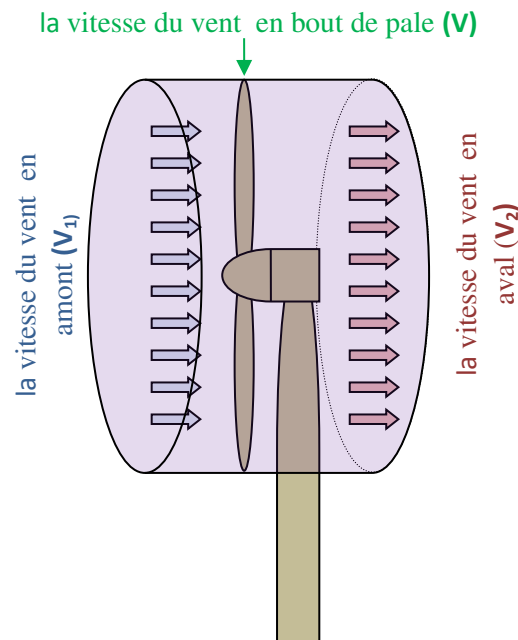


Fig 11 : Une veine de vent passant à travers une éolienne

Considérons une masse d'air m se déplaçant à la vitesse v . L'énergie cinétique E_c (en joules) de la masse d'air m (en kg) qui se déplaçant à la vitesse instantanée du vent V (en m/s) est égale à :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1)$$

En supposant que la vitesse est constante, la puissance récupérable P (en Watt) a comme expression :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 \quad (2)$$

Avec dm/dt est le débit massique, est peut s'exprimer comme :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V_{ol})}{dt} = \frac{d(\rho S L)}{dt} = \rho S \frac{d(L)}{dt} = \rho S V \quad (3)$$

Avec m la masse du volume d'air (en kg), ρ la masse volumique (en kg/m³), V_{ol} le volume d'air occupé (en m³), S la surface traversée par la veine de vent (m²) et L la distance parcourue (m) par le vent pendant le temps (dt). En combinant les équations (2) et (3), on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (4)$$

Note : L'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré de la longueur de la pale de l'éolienne.

Cependant on ne peut pas récupérer, par une éolienne, la totalité de l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique de rotation. Si vrais, pas de moindre souffle de vent ne passerait entre les pales du rotor. La vitesse du vent derrière ce dernier serait donc nulle. Cela signifierait que le vent stopperait sa trajectoire et qu'aucune autre quantité de vent ne circulerait à travers le rotor: l'éolienne aurait alors l'effet d'un mur. L'ingénieur allemand **Albert Betz** en 1919 a montré qu'il existait un rendement maximal théorique, pour un fluide incompressible.

III. 2. 6. Limite de Betz

L'énergie cinétique du vent absorbée par l'éolienne est égale à l'énergie cinétique perdue par le vent, lors de son passage à travers la surface délimitée par les pales. L'énergie cinétique transmise par le vent aux pales est donc la différence entre les énergies cinétiques en amont « indice 1 » et aval « indice 2 » des pales, voir figure 11.

Si on suppose que la vitesse en aval des pales est inférieure à celle en amont « les pales freinent le vent », que la masse du volume d'air reste constante, et qu'il n'y a pas de turbulence, alors la puissance récupérée (P_r) est :

$$P_r = \frac{d(E_{c1} - E_{c2})}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

Avec V_1 et V_2 sont respectivement la composante horizontale du vent en amont des pales et la composante horizontale du vent en aval des pales, en (m/s) et P_r en (watt).

Supposant que la vitesse du rotor V est la moyenne entre les vitesses V_1 et V_2 alors le débit massique s'exprime comme :

$$\frac{dm}{dt} = \rho S V_r = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (6)$$

Si on introduit le rapport $\lambda = \frac{V_2}{V_1}$, alors on obtient pour la puissance récupérée:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \right] \quad (7)$$

On obtient ainsi donc :

✓ **la puissance du vent :**

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (8)$$

✓ **la fraction extraite par l'éolienne, notée C_p :**

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (9)$$

C_p : représente l'efficacité de l'éolienne « coefficient de puissance, coefficient de performance » ou (coefficient aérodynamique). Il définit comme:

$$C_p = \frac{P_r}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \quad (10)$$

En résolvant l'équation : $\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)$

On trouve que la puissance est maximale pour $\lambda = \frac{1}{3}$, c'est à dire $V_2 = \frac{V_1}{3}$. Pour cette valeur, $C_p = \frac{16}{27} \approx 0,593$

- ✓ Ainsi le rendement maximal théorique, pour un fluide incompressible est de $\frac{16}{27}$ (~ 59 %) de la puissance cinétique du vent.
- ✓ C_p : caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne.
- ✓ **La puissance maximale récupérable est:**

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P = \frac{8}{27} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (11)$$

Note : Le coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature.

- ✓ **La puissance électrique est:**

$$P_e = \eta_e \cdot P_r \quad (12)$$

Avec η_e est le rendement global de l'éolienne, il faut tenir compte des pertes dues à la machine elle-même « les pertes de chaque élément de transmission ou de transformation ».

Le paramètre de fonctionnement λ « paramètre de rapidité ou vitesse spécifique » est le rapport de la vitesse U et la vitesse V du vent:

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (13)$$

U : la vitesse périphérique « ou vitesse en bout de pale »,

ω : la vitesse de rotation de la machine éolienne,

R : le rayon d'extrémité de la pale.

Note :

- les meilleures machines à axe horizontal « bipale ou tripale », se situent à 60-88% de la limite de Bitz on ne récupère donc globalement que **52 %** de l'énergie due au vent.
- Betz a démontré que l'énergie récupérable était maximale lorsque: $V_{\text{aval}} = \frac{V_{\text{amont}}}{3}$

Exemple

Une éolienne de rayon des pales $R = 25$ m, fonctionne dans un site, où le vent en amont est 11 m/s. Si la masse volumique de l'air $\rho = 1.25$ kg/m³.

- Quelle est la puissance du vent ?
- Quelle est la puissance récupérée. Si le coefficient de puissance C_p égal à $0,3$?
- Quelle est la vitesse de rotation du rotor ω . Si la vitesse du vent au bout de la pale est 7.33 m/s et la puissance récupérée est maximale ?
- Quelle est la vitesse du vent en aval ?

Solution

- $P = 0.5 \times \rho \times S \times V_1^3 = 0.5 \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_1^3 = 0.5 \times 1.25 \times 3.14 \times 625 \times 1331 \approx 1.63$ MW
- $P_r = C_p \times P = C_p \times 0.5 \times \rho \times S \times V_1^3 = 0.3 \times 1.63 \approx 0.49$ MW
- $\omega = \frac{V \times \lambda}{R} = \frac{7.33 \times \frac{1}{3}}{25} \approx 0.097$ rad/s
- $\lambda = \frac{1}{3} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{3} = \frac{11}{3} = 3.66$ m/s ou aussi
 $V = \frac{V_1 + V_2}{2} \Rightarrow V_2 = 2V - V_1 = 14.66 - 11 = 3.66$ m/s

III. 3. Énergie solaire

L'énergie solaire, produite par le rayonnement du soleil sur la Terre, représente une source naturelle inépuisable et 100% verte. Elle est utilisée directement par trois façons ; la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque qui est le font d'objet des nouveaux développements pour améliorer leurs performances et leur compétitivité économique. Les recherches dans ce contexte, depuis plusieurs années, sont orientées pour étendre les applications et baisser les coûts.

Energie solaire		
thermique	thermodynamique	photovoltaïque
capteur (plan, tubulaire) chauffe-eau solaire	concentrateurs → chaleur intense → tourner une turbine	cellules solaires
chaleur	électricité	électricité

III.3. 1 Énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique tire profit du rayonnement du soleil, à travers des capteurs solaires thermiques, afin de le convertir en chaleur. Cette chaleur est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire « **4 m²** pour une famille **4** personnes » et le chauffage des locaux « **20 à 40 m²** pour une **F4** de **75 m²** ».

L'installation des panneaux solaires thermiques permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage, et permet aussi, de réaliser des économies conséquentes, avec des frais de maintenance et de fonctionnement relativement faibles. Cette technique est inépuisable, non polluante, propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre. Mais le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé et nécessite un chauffage d'appoint pour les périodes climatiques les plus défavorables.

III.3. 2 Électricité solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes d'utilisation directe de l'énergie solaire. Cette technique désigne à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, à travers des collecteurs « capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques », dont le rôle est la concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer « centrale dite à tour », pour chauffer un fluide « huile ou sels fondus de 250 à 1000°C » et produire de l'électricité au moyen d'un cycle thermodynamique. Ce fluide vaporise de l'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Note : la filière solaire thermodynamique demeure toutefois réservée aux pays sans nuage. L'espace saharien, de l'Algérie, est l'un des meilleurs au monde à permettre la mise en œuvre d'une telle solution pour la génération électrique.

Le plus grand développement commercial a été réalisé par la société **Luz Corp**, qui a construit trois centrales totalisant une puissance électrique nominale de **354 MW** à Los Angeles. Ces centrales témoignent de la relative maturité de cette filière. Les recherches sur cette technique sont menées conjointement par les États-Unis, l'entité sioniste, l'Allemagne et l'Espagne. L'avenir de la solaire

thermodynamique est remis en cause par le développement de la filière photovoltaïque (plus simple et fiable), même si cette dernière reste plus coûteuse.

III.3.3 Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique « découvert en 1839 par **Edmond Becquerel** », pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement. La première cellule photovoltaïque est apparue en 1954. Elle emploie pour ce faire des panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires qui réalisent la transformation d'énergie lumineuse en énergie électrique. La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur.

III.3.3.1 Système photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer en trois parties, la figure 12 représente les parties d'un système photovoltaïque :

1. **Partie de production d'énergie** : se compose d'un ou de plusieurs modules photovoltaïque, qui réalisent la conversion d'énergie solaire en électricité. Ce module se compose de petites cellules, qui produisent une très faible puissance électrique « **1 à 3 W** » avec une tension continue de moins d'**1 V**. Ces cellules sont disposées en série pour former un module permettant de produire une puissance plus élevée.

2. **Partie de contrôle d'énergie** : se compose d'un système de stockage d'énergie « **batteries** » et de régulation « **Adaptation d'impédance** ».

a) **Stockage d'énergie** qui permet satisfaire les besoins malgré le caractère aléatoire de l'énergie solaire reçue, les batteries destinés aux installations photovoltaïques doivent avoir les qualités :

- ✓ posséder une grande **réserve** et avoir un **bon rendement** de charge et de décharge ;
- ✓ avoir un taux **d'autodécharge faible** et une **durée de vie** importante;
- ✓ avoir une **faible résistance** interne ;
- ✓ avoir une **maintenance réduite** ;

b) **Adaptation d'impédance**: qui permet d'utiliser le champ photovoltaïque dans la zone de fonctionnement optimale.

3. **Partie d'utilisation de l'énergie produite** : se compose de plusieurs récepteurs « **utilisateurs par exemple: éclairage, pompage, ...etc.** ».

On peut ajouter encore des moyens d'entretien du système photovoltaïque comme les outils de nettoyage des modules

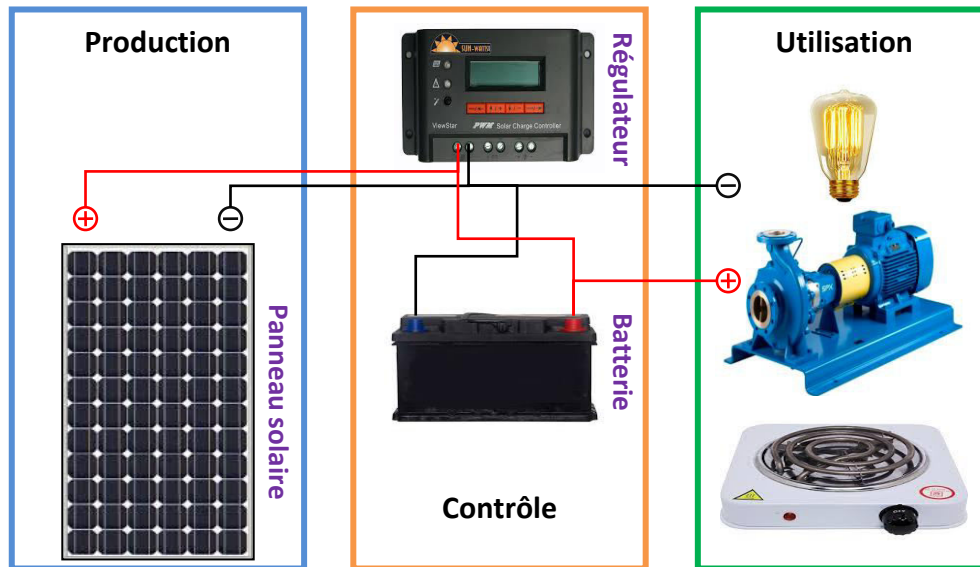


Fig.12 : Composants du système photovoltaïque

III. 3. 3. 2 Paramètre des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est constituée par une jonction **PN**, cette cellule contient des charges électriques du fait du dopage « des électrons dans la zone **N** et des trous dans la zone **P** », ces charges créent un champ électrique au niveau de la jonction. Lorsque la surface de la cellule est éclairée, les photons, d'énergies supérieures à l'énergie de gap E_g , excitent les paires électron-trou et créent des charges positives et négatives dans les régions quasi neutres **P** et **N**, figure 13. Les charges sont mises en mouvement « traversent la zone de transition » par le champ électrique créé par la jonction, si on relie les côtés de cette jonction à une charge **Rc** un courant électrique **I** se produit et une différence de potentiel apparaît.

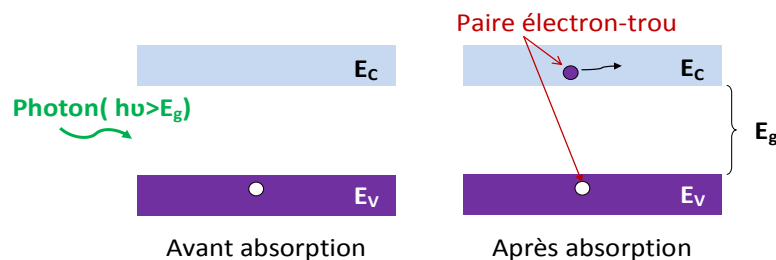


Fig 13 : création de paire électron-trou par photo-excitation

III. 3. 3. 3 Caractéristique courant tension et schéma équivalent

Un panneau photovoltaïque débite un courant sous une différence de potentiel, la caractéristique $I(V)$ décrit la relation courant-tension, figure 14 (a) :

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad (14)$$

Avec : I_{ph} est le photo-courant et $I_d(V)$ est le courant d'obscurité de la diode

Le panneau photovoltaïque est considéré comme une source de puissance ; car il est difficile, sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension, de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque.

L'utilisation optimale d'une cellule photovoltaïque consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal « $P_m = U_{op} \times I_{op}$ ». Dans ce contexte, le rôle des régulateurs solaires est la réalisation d'une adaptation de l'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale.

Le schéma équivalent de la cellule est représenté sur la figure 14 (b). Les valeurs des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule.

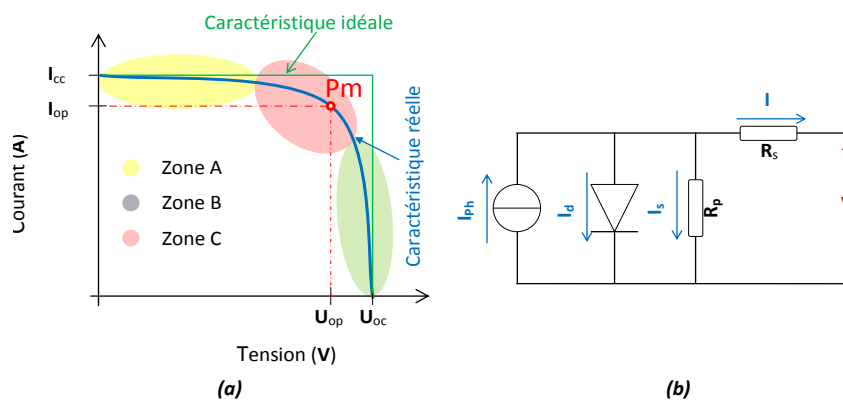


Fig 14 : (a) Caractéristique d'une cellule photovoltaïque **(b)** schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent de la cellule solaire tient compte les résistances série R_s et parallèle R_p et le courant de saturation de la diode I_s .

La caractéristique de la cellule photovoltaïque se divise selon son comportement en trois parties :

- ✓ **La zone (a)** où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} ,
- ✓ **La zone (b)** où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- ✓ **La zone (c)** où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

La relation entre I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant tension, permettant de déterminer les quatre grandeurs principales du fonctionnement de la cellule solaire :

➤ **Courant de court-circuit I_{cc}**

Il s'agit du courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même, en court-circuitant les bornes de la cellule, « $V = 0$ dans le schéma équivalent ».

➤ **Tension à circuit ouvert « tension à vide » V_{oc}**

Il s'agit de la tension générée par une cellule éclairée non raccordée. Autrement dit, la tension obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

$$V_{co} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (15)$$

Avec : k est la constante de Boltzmann, T est la température en Kelvin et e est la charge d'électron.

➤ Facteur de forme ff

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge « résistance externe placée aux bornes de la cellule ». Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_m , Figure 15 (a). Ce point est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe et il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_m}{V_{OC} I_{CC}} = \frac{V_{opt} I_{opt}}{V_{OC} I_{CC}} \quad (16)$$

Note : selon le théorème de **Transfer maximum de puissance** la puissance maximale est transférée d'un générateur à une charge lorsque **l'impédance de la charge** est égale à **l'impédance interne du générateur**.

➤ Rendement de conversion η

Le rendement de conversion en puissance des cellules photovoltaïque η est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{OC} \times I_{CC}}{P_{in}} \quad (17)$$

La densité de puissance incidente égale à P_{in} / A . « A est la section de la cellule ».

Note : la température a un effet négatif sur le rendement de la cellule. Plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue, est le rendement de la cellule égal le rapport entre la puissance de la cellule et la puissance incidente du soleil. Le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

III. 3. 3. 4 Association de cellules

Les cellules solaires sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant ces cellules, généralement en série « pour élever la tension ». Suivant les besoins de l'utilisation « la tension et le courant désirés », ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle.

A) Association de cellules en série

Les cellules montées en série sont traversées par le même courant et leur caractéristique résultante est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

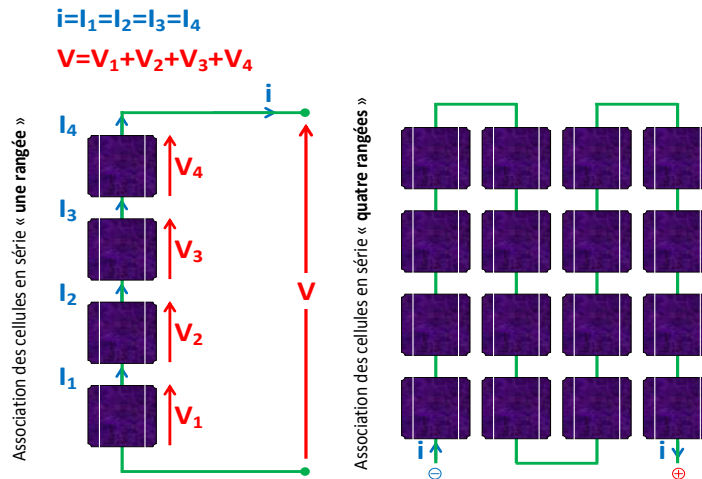


Fig 15 : Association des cellules en série

La mise en série des cellules pose un problème, lorsqu’une cellule se retrouve à l’ombre « elle va s’échauffer et risque de se détruire ». Cette cellule "masquée" bloque la circulation de l’intensité du courant produite par les autres cellules. La tension aux bornes de cette cellule augmente « apparition d’une surchauffe ». C'est l'effet d'auto-polarisation inverse appelé « point chaud » en anglais "Hot spot". Pour protéger la cellule masquée et supprimer ce problème, on place des diodes « by pass » en antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées. Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules « en moyenne 36 cellules pour 3 diodes by pass ».

En cas de masque :

- ✓ pour un panneau solaire avec une diode, toutes les cellules du panneau sont en by-pass,
- ✓ pour un panneau solaire avec deux diodes, 50 % des cellules du panneau sont en by-pass,
- ✓ pour un panneau solaire avec trois diodes, 33 % des cellules du panneau sont en by-pass,

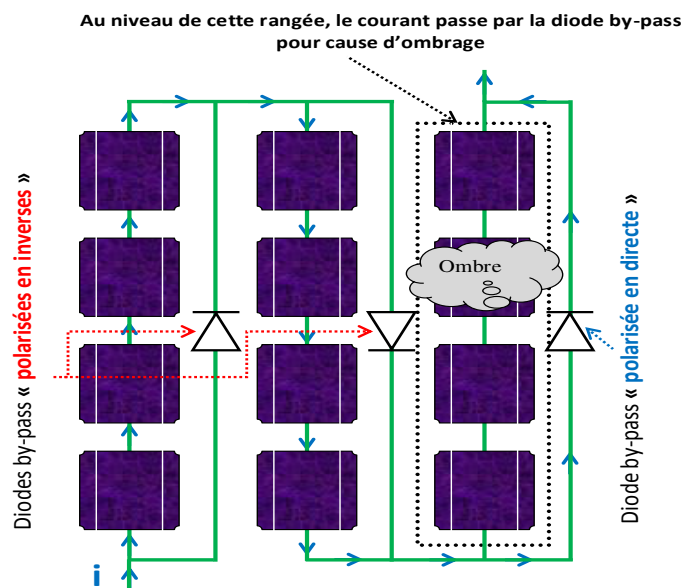


Fig 16 : Placement des diodes 'by-pass'

B) Association de cellules en parallèle

Les cellules montées en parallèle sont soumises à la même tension et leurs caractéristique résultante est obtenue par addition des courants à tension donnée.

Exemple
<p>1) Un panneau solaire délivre une puissance $P = 25 \text{ W}$ lorsqu'il reçoit une puissance lumineuse maximale $P_L = 1000 \text{ W/m}^2$. Il est constitué de cellules photovoltaïques branchées à la fois en série et en dérivation. Dans chaque branche les cellules sont associées en série, et les différentes branches sont montées en dérivation. La tension aux bornes du panneau vaut 10 V ; chaque cellule délivre une tension de 0.5 V et un courant de 500 mA.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Quelle est l'intensité du courant I_T débitée par le panneau ? ➤ Quelle est le nombre total de cellules N du panneau ? ➤ Quelle est le rendement énergétique η du panneau, si sa surface est 800 cm^2 ?
Solution
<ul style="list-style-type: none"> ➤ $I_T = \frac{P}{V_T} = \frac{25}{10} = 2.5 \text{ A}$ ➤ $N = \text{Nbr de cellules dans une branche} \times \text{Nbr des branches}$ $N = \frac{V_T}{V_{\text{cel}}} \times \frac{I_T}{I_{\text{cel}}}$ $N = \frac{10}{0.5} \times \frac{2.5}{0.5} = 250 \text{ cellules}$ ➤ $\eta = \frac{P}{P_L \times S} = \frac{25}{1000 \times 800 \times 10^{-4}} = 0.3125 = 31.25\%$

III. 4. Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique, première des énergies renouvelables au monde, elle représente près de 90% de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité en utilisant la force motrice des cours d'eau. L'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie est captée et transformée dans des barrages hydroélectriques. Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour amorcer le cycle de production de l'électricité. L'eau s'engouffre dans une conduite se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.

Energie hydraulique

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ c'est une énergie propre « renouvelable » sans émission de fumées et pollution. ➤ la gestion des cours d'eau permet le contrôle des crues : <ul style="list-style-type: none"> ✓ en période de sécheresse, on lâche de l'eau ; ✓ en période d'inondation, on retient le surplus d'eau ➤ Il existe également un apport économique : le tourisme grâce aux lacs et aux stations balnéaires. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ coût des aménagements. ➤ risques de rupture du barrage. ➤ perturbation de l'écosystème. ➤ exigences géologiques et géographiques : <ul style="list-style-type: none"> ✓ réservoir : zone large et dégagée ✓ barrage : zone étroite ➤ modification de l'aspect naturel du site.

III. 5. Biomasse

La biomasse est la 2^{ème} énergie renouvelable dans le monde. Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales.

Le terme de biomasse recouvre un champ très large de matières : bois, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles « (pailles, lisiers, ...etc. », fraction fermentescible des déchets ménagers et des industries agro-alimentaires, biogaz de décharge ou produits de méthanisation « lisiers, boues d'épuration, décharges, ... etc. ».

Comprend trois familles principales :

A) **Bois énergie « biomasse solide »** : cette technique est utilisée dans les centrales électriques, dont le principe de fonctionnement est le même que celui utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon voire figure 2, du pétrole ou du gaz... à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par la biomasse solide. Mais elle peut être aussi utilisée par la chaudière d'une maison individuelle

B) **Biogaz « biomasse humide »** : ce sont les gaz qui se dégagent des matières organiques lorsqu'elles se décomposent (par la fermentation). Les centrales de biomasse humide sont des usines « des grandes installations appelées **digesteurs** », équipées de grandes cuves qui ne laissent pas entrer l'air, pour favoriser la fermentation. Ces biogaz sont utilisés pour le chauffage et pour produire de l'électricité.

Note : Les digesteurs sont généralement placés dans des zones agricoles, ils valorisent le fumier et les autres déchets issus de l'agriculture. Ensuite, ce qui ne s'est pas transformé en gaz et qui reste au fond des cuves sera utilisé comme engrais pour fertiliser les champs.

C) **Biocarburants** : un biocarburant est un carburant végétal ou agro-carburant assimilé à une source d'énergie renouvelable, avec une combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes d'azote et de soufre « NO_x, SO_x », il est créé à partir de la transformation de matériaux organiques non fossiles comme les matières végétales produites par l'agriculture « betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, ...etc. ».

On distingue trois générations de biocarburants :

➤ **Biocarburants de première génération** : les biocarburants de la première génération « la seule génération produite à l'échelle industrielle » sont principalement de deux types :

- ✓ **le bioéthanol** : Alcool, utilisé dans le moteur essence, produit à base de plantes riches en sucre ou en amidon « canne à sucre, céréales et betterave sucrière ».
- ✓ **le biodiesel** : un dérivé d'acides gras, utilisé dans le moteur diesel, produit à base de plantes riches en huile « fleurs de colza, tournesol, soja, cacahuètes, ...etc. ».

➤ **Biocarburants de deuxième et de troisième génération** : des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter à partir de matières premières non alimentaires **cellulosiques**, comme la paille, le bois ou les algues pour les biocarburants de deuxième génération et à partir de microorganismes comme les micro-algues pour les biocarburants de troisième génération. Présentant des bilans énergétiques plus favorables, elles permettent également de limiter les problèmes d'usage extensif des sols agricoles et de concurrence avec les débouchés alimentaires.

III. 6. Énergie géothermique ou aérothermique

La géothermie utilise la température la plus élevée du sous-sol de la Terre pour produire de la chaleur ou de l'électricité. La géothermie à basse température est utilisée pour le chauffage de bâtiments tels que les serres ou d'habitations. La géothermie à haute température permet de produire de l'électricité.

On distingue trois types d'exploitation de la géothermie :

- **la géothermie très basse température** : utilisée pour le chauffage et la climatisation, grâce à une pompe à chaleur exploite des réservoirs, situés à moins de 100 m et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C.
- **la géothermie basse énergie** : utilisée pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels, elle utilise des aquifères à des températures comprises entre 30°C et 100°C.
- **la géothermie moyenne et haute énergie « jusqu'à 250°C »** : est utilisées pour produire de l'électricité via des turbines.

Partie 4 : Stockage d'énergie

IV. 1. Définition et généralités sur le stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dépend du type d'énergie ; Les énergies fossiles « charbon, gaz et pétrole » sont stockées naturellement dans des réservoirs « des nappes », une fois extraites, elles peuvent facilement être transformées ou transportées d'un point de vue technique. Le stockage pour les énergies intermittentes concerne principalement le stockage de l'électricité et celui de la chaleur. Il s'avère plus complexe « nécessite des systèmes spécifiques », à cause de la dépendance de leur production à des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène. Cependant, l'électricité est généralement transformée « en énergie mécanique, thermique ou chimique » pour être stockée. Contrairement, le stockage de la chaleur est généralement effectué sous sa forme originale.

Le but principal du stockage d'énergie est de faire **un équilibre entre la demande et la production d'électricité** « il permet l'adaptation dans le temps entre l'offre et la demande en énergie », cet équilibre est nécessaire au fonctionnement des réseaux électriques. Ces réseaux sont conçus pour résister à un certain nombre d'aléas climatiques, pertes d'ouvrages pour la production, ...etc.

L'un des inconvénients majeurs des énergies renouvelables en général est son intermittence due au caractère intermittent du vent, du soleil ou de la géothermie. C'est pourquoi les systèmes de stockage auront un rôle important dans le développement de ces énergies dans la venir.

L'électricité produite, par les panneaux solaires ou les éoliennes, dans les périodes de faible consommation ou de surproduction peut être stockée pour être restituée ensuite pendant les périodes où la production ne couvre pas la demande « production faible ou demande forte ».

Exemples

D'après un communiqué de la société Sonalgaz :

- le 30 juillet 2017, suite à la hausse de la température, la consommation d'électricité a atteint un pic de **13.881 MW**.

D'après l'accompagnement d'ensemble des acteurs du monde énergétique industriel **ENEA** :

- En France, une baisse de **1°C** de la température en hiver entraîne une augmentation de la consommation de **2,3 GW**.
- Le 8 février 2012, un pic de **102 GW** de consommation atteint en France a porté ponctuellement à **2 000 €** le prix du **MWh** sur les marchés.
- A l'inverse, des épisodes de prix négatifs à **-500 €/MWh** ont été observés en Allemagne en 2010, causés par des surplus de production éolienne.

La nature du stockage est multiple et fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être :

- ✓ à **usage fixe ou centralisé** : on parle stockage stationnaire
- ✓ à **usage mobile** : il est alors qualifié d'embarqué « moyens de transport, appareils électroniques, ...etc. ».

On différencie aussi le stockage en fonction de sa capacité « quantité de charge électrique disponible » :

- ✓ le stockage est dit de **faible capacité** lorsque celle-ci est de l'ordre du **kWh**,
- ✓ de forte capacité si elle est supérieure à **10 MWh**. Dans ce cas, on parle de **stockage massif** de l'énergie.

IV. 2. Stockage de l'électricité

À ce jour, le stockage direct de l'énergie électrique est actuellement limité et coûteux. Certains systèmes permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit principalement des grands condensateurs ou des supercondensateurs. Cette difficulté de stockage ne pas permettre d'envisager exploitation du stockage direct à grande échelle. Au contraire, le stockage indirect de l'énergie électrique représente la part de lion des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde. Ce stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques principales :

- ✓ la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment.
- ✓ la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre.
- ✓ la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel.
- ✓ la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local.

IV. 2. 1. Stockage direct de l'électricité

Le stockage direct de l'électricité est réussi par l'utilisation de grands condensateurs « composants électriques constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques opposées », dont la capacité se mesure à l'échelle du microfarad, qui ont des capacités de stockage limitées et dont les coûts sont plus ou moins élevés.

Une autre piste du stockage direct de l'électricité est le stockage par les supercondensateurs « des condensateurs fabriqués à base des matériaux supraconducteurs ». Cependant, ceux-ci « les supraconducteurs » requièrent des températures d'utilisation proches du zéro absolu « - 273°C » dont le maintien est techniquement aussi difficile que coûteux. Mais, les supercondensateurs interviennent plutôt en puissance qu'en énergie « capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court ». Ils peuvent donc représenter un complément intéressant des batteries. La combinaison batterie/supercondensateur peut s'avérer particulièrement efficace dans le cas des véhicules hybrides.

IV. 2. 2. Stockage indirect de l'électricité

Hormis dans les condensateurs ou supercondensateurs, l'électricité ne se stocke pas directement. Il est donc nécessaire de convertir l'électricité en une autre énergie qu'en peut la maîtrisée. Les différents modes de stockage sont classés en fonction des énergies primaires de conversion.

IV. 2. 2. 1. Mode de stockage mécanique

Ce mode de stockage d'électricité englobe tous les types de stockage d'énergie à grande échelle que ce soit potentielle ou cinétique.

A- Stations de transfert d'énergie par pompage « STEP »

Ce système de stockage repose sur le principe de l'énergie gravitaire « énergie hydraulique donc aux barrages ». Il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques et il permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique, il utilise deux bassins à des altitudes différentes. Le surplus d'électricité du réseau est utilisé pour pomper l'eau du bassin inférieur dans le bassin supérieur. Dans le cas, de déficit de production électrique, l'eau pompée dans le bassin supérieur fait tourner une turbine par gravité et restitue l'énergie accumulée.

Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, ce type de stockage représente près de 99 % des capacités de stockage massif d'énergie installées dans le monde à fin 2011, avec une capacité totale d'environ 140 GW assurée par presque 400 STEP. Cependant, les études prospectives prévoient que la capacité mondiale des STEP devrait être de l'ordre de 400 GW à l'horizon 2050.

Stations de transfert d'énergie par pompage « STEP »

avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Elles représentent une des solutions de stockage à grande échelle les plus fiables; ➤ Elles peuvent déplacer des quantités massives d'énergie; ➤ Dotées d'une longue durée de vie « 40 ans »; ➤ Elles représentent l'un des moyens de stockages les moins coûteux; ➤ Elles sont à ce jour valorisées comme moyen d'arbitrage sur les marchés de l'électricité. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ la nécessité de trouver un site géographique adapté, réunissant deux bassins superposés, rend la construction de nouvelles STEP de plus en plus difficile et coûteuse. Les meilleurs sites sont utilisés en premier, d'où une raréfaction des capacités disponibles et une augmentation des coûts de construction. ➤ problématiques d'acceptation sociétale, inhérentes à toute nouvelle mise en eau de réservoirs coût des aménagements.

La centrale STEP de l'île d'El Hierro « **Canaries, Espagne** » représente un meilleur exemple de cette technique, elle permet d'assurer l'autonomie électrique de l'île et d'éviter l'importation de **6000 tonnes de pétrole** par an. La centrale est constituée de 5 éoliennes « **11,2 MW** », de deux bassins « bassin inférieur de 50 000 m³ et bassin supérieur 700 mètres plus haut de 550 000 m³ » de turbines hydrauliques « **11,3 MW** » pour le pompage et le turbinage. Les éoliennes et les turbines peuvent produire de l'électricité simultanément pour gérer les pics de consommation.

B- Stations de stockage par air comprimé « Compressed Air Energy Storage CAES »

Les stations de stockage par air comprimé sont conçues, tout simplement, pour stocker de l'air comprimé « sous forme de pression dans des cavités souterraines au lieu du pompage de l'eau », grâce à un compresseur, en heure creuse. Cet air est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité, pour le délivrer en heure de pointe.

Aujourd'hui, deux installations liées à des cavités salines sont en fonctionnement, une à Huntorf « Allemagne » de **290 MW** fonctionne depuis 1978 et la seconde à McIntosh en Alabama « Etats-Unis » de **110 MW** fonctionne depuis 1991.

Le rendement des CAES est malheureusement réduit « inférieur à 50% » car la chaleur des gaz post-compression est perdue. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur « stockage adiabatique ».

C- CAES adiabatiques avancées AA-CAES « Advanced Adiabatic CAES »

Le système CAES adiabatique a été étudié à **Université technique de Clausthal** en Allemagne, dont le principe est d'éviter la perte de chaleur, mais il n'existe pas un réservoir capable de supporter à la fois une forte pression et une forte température, cependant, ce système n'est jamais expérimenté.

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose deux réservoirs, un réservoir permettant de stocker l'air comprimé « semblable aux réservoirs des CAES conventionnels » et d'un système de stockage thermique récupérant la chaleur de l'air comprimé. En phase de déstockage, cette chaleur est restituée à l'air comprimé avant le passage dans la turbine. Les CAES adiabatiques avancées atteignent grâce à ce système une efficacité de l'ordre de 70%.

Les stations AA-CAES nécessitent encore un effort de recherche pour diminuer les coûts du stockage thermique. La plus grande station CAES dans le monde est en construction à Ohio « Etats-Unis », de puissance 0.8 à 2,7 GW avec 16h de stockage et une pression de l'ordre de 55 à 110 bars et un réservoir « une cavité d'une mine de calcaire » de profondeur de 670 m.

Note : un processus est dit adiabatique lorsque les deux systèmes qui le composent n'échangent pas de chaleur entre eux.

➤ Chiffres clés

- ✓ puissance : 10 à 300 MW ;
- ✓ production annuelle : de 10 MWh à 10 GWh ;
- ✓ temps de réponse (temps nécessaire pour faire passer le système d'un état de stockage sans décharge à une décharge à pleine puissance) : quelques minutes ;
- ✓ efficacité : ~50 % pour les systèmes conventionnels, ~70 % pour les adiabatiques et ~95% pour les isothermes (pour le système détenteur / compresseur);
- ✓ durée de vie : potentiellement supérieure à 30 ans ;

➤ Zone d'utilisation

Il existe actuellement dans le monde quelques CAES, en production. Citons :

- ✓ **Huntorf en Allemagne : 290 MW** en 1979, utilisant une mine de sel, 3h de stockage ;
- ✓ **Alabama au USA : 110 MW** en 1991, utilisant une mine de sel, 26h de stockage ;
- ✓ **Hokkaido au Japon : 2 MW** en 2001, utilisant une mine de charbon, 4h de stockage ;

- ✓ **New Hampshire au USA : 1 MW** en 2011 en surface, 4h de stockage ;
- ✓ **Hydrostor au Canada : 1 MW** en 2013 en sous-marin, 4h de stockage ;
- ✓ **Texas au USA : 2 MW** en 2014, utilisant une mine de sel, 16h de stockage ;

En construction citons :

- ✓ **ADELE en Allemagne : 90 MW** prévus en 2018, utilisant une mine de sel, 4h de stockage ;
- ✓ **Californie au USA : 300 MW** prévus en 2021, utilisant une mine de sel, 10h de stockage ;
- ✓ **Ohio au USA : 2 700 MW**, utilisant une mine de calcaire 16h de stockage.

D- Volants d'inertie

Les volants inertiels sont longtemps utilisés pour la régulation des machines à vapeur. Aujourd'hui, leur principe permet de stocker l'énergie sous forme de rotation mécanique. L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé, qui permet de convertir l'énergie électrique « dans le cas de surplus de production » en une énergie cinétique. Cette énergie cinétique conservée peut être ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur « principe de la dynamo ».

Les volants d'inertie

avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haut rendement « environ 80% », ➤ Phase de stockage très rapide « par rapport à une batterie électrochimique », ➤ Temps de réponse très court « permet de réguler la fréquence du réseau », ➤ Aucune pollution « sans combustible fossile et produits chimiques », ➤ Technologie fiable « peu d'entretien ». 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Temps de stockage limité « environ 15 minutes ».

Les deux plus grandes installations de volantes inerties sont aux États-Unis, d'une puissance de 20 MW chacune.

Note : le stockage d'énergie par volant d'inertie ne permet pas d'obtenir une durée importante de stockage comme les STEP ou les CAES. Néanmoins, il est utile pour la régulation et l'optimisation énergétique d'un système.

IV. 2. 2. 2. Mode de stockage chimique

Le principe de ce mode de stockage d'électricité repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries et le vecteur hydrogène.

A- Batteries

Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. Les composants chimiques peuvent être différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries.

Les batteries utilisées pour le stockage massif à ce jour, ce sont surtout les batteries à flux, qui font l'objet de la majorité des études. L'utilisation des batteries au plomb, au sodium ou au lithium-ion se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la

gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne « ou autre », notamment pour le lissage de la charge journalière en stationnaire. Elles peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge.

➤ Batteries à flux

Ces batteries sont des batteries rechargeables, permettent le stockage des couples électrochimiques « électrolytes » à l'extérieur de la cellule de réaction, dans des réservoirs séparés par une membrane, à l'état liquide. Les électrolytes circulent à travers une cellule d'échange d'ions. On trouve différentes technologies des batteries à flux.

- ✓ Technologie redox reduction-oxydation « technologie conventionnelle NASA en 1976 ».
- ✓ Technologie Hybride
- ✓ Technologie sans-membrane
- ✓ Technologie organique
- ✓ Technologie à nanoréseaux
- ✓ Densité énergétique

Les batteries à flux représentent les avantages de pouvoir rapidement recharger « le système remplace les électrolytes par des réservoirs ». Elles peuvent supporter plus de 10 000 cycles de charge de plus l'effet d'autodécharge est quasiment nul. Contrairement, la présence des réservoirs et la nécessiter d'utiliser un système de circulation « pompe, capteurs,...etc. » représentent les inconvénients majeurs de ces batteries.

➤ Batteries lithium-ion "avancées"

Le fonctionnement de la batterie lithium-ion repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple, le système le plus important, à ce jour, qui se trouve à Zhangbei « Chine » en 2011, de capacité de 20 à 36 MW sur 4 à 6 h avec une production éolienne de 100 MW et une production solaire de 40 MW.

➤ Batteries Zn-Br

Ces batteries sont fondées sur le couple zinc/brome « Zn⁺/Br⁻ ». Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés, on peut citer à titre d'exemple un système de 400 kWh réalisé à Akron « Michigan » USA, quelques installations commerciales sont aujourd'hui opérationnelles.

B- Vecteur hydrogène

L'hydrogène ne représente pas une source d'énergie directe comme l'énergie éolienne à titre d'exemple, mais un vecteur énergétique. Il ne se trouve pas sous forme pure dans la nature, mais doit être extrait de l'eau « H₂O » par électrolyse. Le gaz d'hydrogène peut être directement utilisé « comme combustible » ou bien stocké et converti de nouveau en électricité « par une pile à combustible ».

Le principe de la pile à combustible, est de convertir l'énergie chimique en énergie électrique à partir de l'hydrogène qui sera utilisé comme carburant. Cette pile ne rejette que de l'eau, donc ne pollue pas. L'électrolyse de la pile exige des métaux rares et précieux en plus les difficultés d'industrialisation augmentent le prix du dispositif, qui reste trop élevé et entraîne des problèmes de stockage. Le rendement global est moins de 50% et leur durée de vie s'avère insuffisante dans le cadre d'applications couplées au réseau électrique. En bref, le progrès de cette technique n'est pas pour demain.

IV. 3. Stockage thermique « de la chaleur »

Le développement du stockage thermique est lié directement au développement des fermes solaires thermodynamiques. Le stockage de cette chaleur solaire thermodynamique permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives « le jour/l'été » par rapport aux périodes de plus grandes demandes « le soir/l'hiver ». Ce stockage concerne principalement le chauffage « ou la climatisation » des bâtiments. Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :

A- Stockage par chaleur sensible

L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie sous forme de chaleur. C'est le cas, par exemple, d'une pierre posée près d'une cheminée, une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut être déplacée et céder sa chaleur. Ce principe est le même, pour les chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen de l'ordre de 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton.

B- Stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage est basé sur les matériaux à changement de phase « **MCP** », ces matériaux stockent de l'énergie lorsqu'ils changent leur état « par exemple solide-liquide ». La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de froid, avec un rendement d'environ 60%. Plusieurs types de ces matériaux « organiques '**acides gras et paraffines**' ou inorganiques '**sels hydratés**' » servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil, pour tempérer les bâtiments.

Il n'existe pas à ce jour d'installations de stockage de grandes capacités basées sur ce principe mais de nombreux projets sont en cours.

IV. 4. Résumé des chiffres de stockage massif d'énergie

Le résumé des chiffres de stockage massif d'énergie et les principales caractéristiques des technologies, sont montrés par le tableau 2.

Tab 2 : Résumé des chiffres de stockage massif d'énergie

	Capacité (MWh)	Temps de décharge (en heures)	Efficacité (%)	Nombre de cycles	Durée de vie (en années)
STEP	1 000-20 000	6 - 24	70-85	>13 000	> 40
CAES	120-1 800	5- 24	50-70	>13 000	> 35
Chaleur sensible	40000	6 - 12	75	>10 000	
Chaleur latente	100		85		> 15
Batteries Li-ion	< 100	0.2-4	85-95	10000	
Batteries à flux	< 200	Quelques secondes à 5h	70-80	14000	10-20
Hydrogène	10 à 10000	Quelques heures	40		25

Partie 5 : Consommations, réserves et évolutions des ressources d'énergie

V. 1. Consommation mondiale d'énergie

La consommation d'énergie finale dans le monde a atteint 8 979 millions de tonnes d'équivalent pétrole « Mtep » en 2015. Dans les 25 années « 1990-2015 », la consommation d'énergie dans le monde a augmenté de près de 35%. Pour permettre la consommation finale de cette énergie de 8 979 Mtep, il a fallu produire 13 147 Mtep. Cependant, près d'un tiers de l'énergie primaire disponible est perdue lors du processus de transformation en énergie finale « l'essentiel de la perte est due aux centrales électriques et au rendement des autres usines de transformation ». La figure 17 montre le développement de la production mondiale de l'énergie de 1990 à 2015.

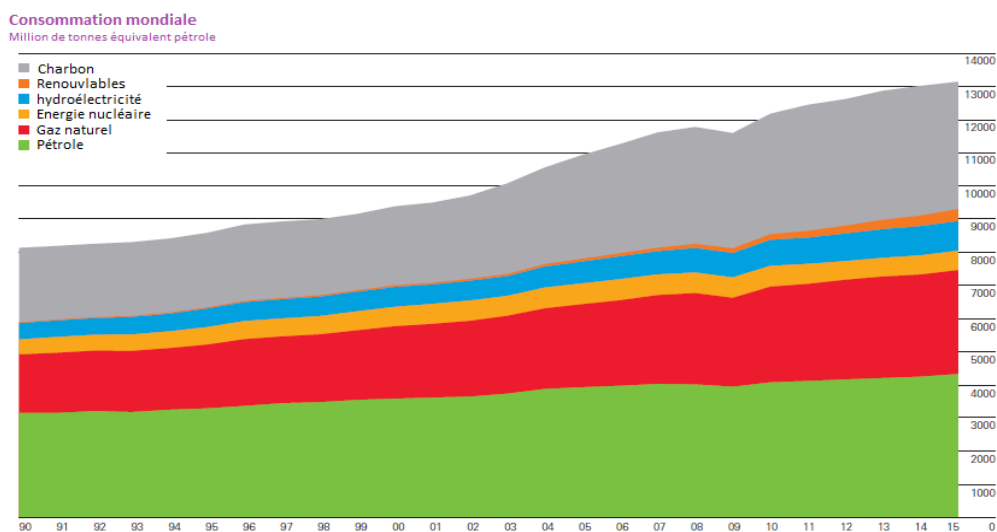


Fig 17 : développement de la consommation mondiale d'énergie primaire en Mtep 1990-2015

Source : www.bp.com/statisticalreview

V. 2. Part des énergies dans la consommation mondiale

Tous les carburants, sauf le pétrole et l'énergie nucléaire, ont augmenté à des taux inférieurs à la moyenne entre 2014 et 2015. En 2015, le pétrole reste le moteur dominant du monde et a gagné une part de marché mondial pour la première fois depuis 1999, alors que la part du marché du charbon est tombée au niveau le plus bas depuis 2005. Les énergies renouvelables représentent 2,8% de la consommation mondiale d'énergie primaire « en 2015 ».

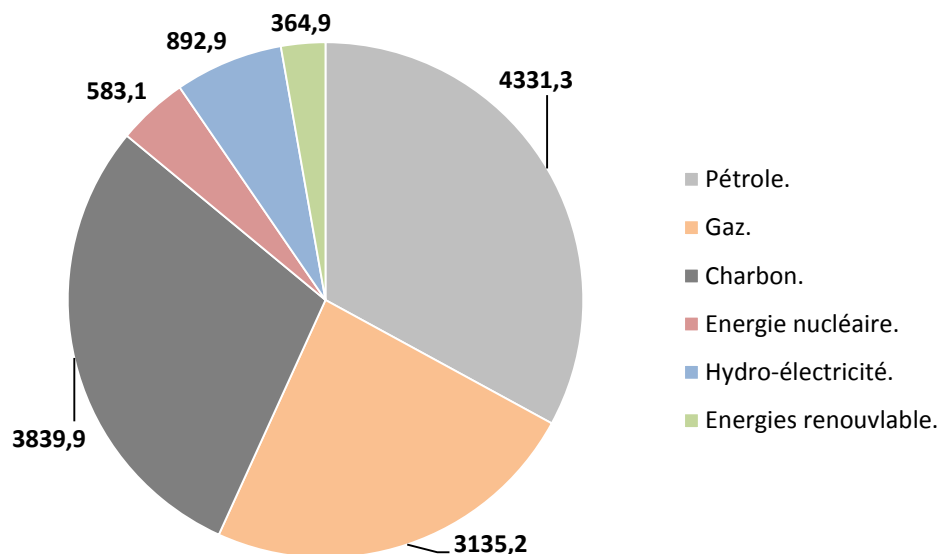


Fig 18 : Part des énergies en « Mtep » dans la consommation mondiale en 2015

Les réserves prouvées représentent la quantité dans les bilans statistiques, que l'on est sûr à 90%. A fin 2015, les réserves mondiales du pétrole sont estimées à près de 1 698 milliards de barils, soit l'équivalent d'environ 51 fois la production au rythme de l'année 2015.

Tab 3 : Pétrole : réserves prouvées (milliards de barils) Années 1995 – 2015

Années	1995	2005	2015
Réserves prouvées	1126.2	1374.4	1697.6

Tab 4 : Pétrole : Production (millions de barils/jour) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	81896	82277	81182	83283	84097	86218	86591	88834	91670

Le gaz naturel représente près de 23,85% de la consommation énergétique mondiale en 2015, donc il prend une place de plus en plus importante dans cette consommation. Cependant, cette position majeure dans le bouquet énergétique mondial est garantie par la découverte et l'exploitation de gisements non conventionnels comme les gaz de schiste. Les réserves mondiales du gaz naturel sont estimées à près de 187 trillions de mètres cubes, soit l'équivalent d'environ 53 fois la production au rythme de l'année 2015.

Tab 5 : Gaz naturel : réserves prouvées (trillions de mètres cubes)

Années	1995	2005	2015
Réserves prouvées	119.9	157.3	186.9

Tab 6 : Gaz naturel : production (milliards de mètres cubes) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	2790.9	2964.5	2983.3	3208.5	3299.9	3362.6	3410.7	3463.2	3538.6

Les réserves prouvées de charbon à fin 2015 sont estimées à près de 891.5 milliards tonne, représentant environ 153 années de production au rythme de l'année 2015, soit beaucoup plus que le pétrole « 51 ans » ou le gaz naturel « 53 ans ».

Tab 7 : Charbon : réserves prouvées (milliards tonnes)

Années	1995	2005	2015
Réserves prouvées	1031.61	909.06	891.53

Tab 8 : Charbon : production (Millions de tonnes équivalent pétrole) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	3033.6	3326.7	3435.3	3627.6	3891.4	3930.2	3986.5	3988.9	3830.1

L'énergie nucléaire contribue 4.44 % du bouquet de la production énergétique mondiale. En 2015, 448 réacteurs nucléaires ont produit près de 2 441 TWh au niveau mondial. Les États-Unis, avec 99 réacteurs nucléaires, occupent la première position de la production de l'électricité d'origine nucléaire, ils ont produit environ 50% de cette électricité.

Tab 9 : Energie nucléaire : production (Millions de tonnes équivalent pétrole) Années 2005–2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	626.4	621.8	613.9	626.3	600.4	559.3	564.0	575.5	583.1

Les énergies renouvelables ne représentent que 9.57 % de la production énergétique mondiale, dont 80% de cette production est assurée par la filière Hydro-électricité. Malgré la contribution presque marginale dans la production mondiale d'énergie, le taux de croissance de cette production « environ de 67% dans 10 ans » est un appel à l'optimisme.

Tab 10 : EnR : production (Millions de tonnes équivalent pétrole) Années 2005–2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production Hy-E	661.4	699.7	737.9	784.2	795.5	835.6	864.8	884.3	892.9
Production EnR	83.2	107.8	144.2	169.9	203.6	238.5	281.1	316.6	364.9
Total	744.6	807.5	882	954	999	1074	1146	1201	1258

V. 3. Consommation d'énergie par région

La consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de moins de 1,0 % en moyenne en 2015, le taux de croissance le plus lent depuis 1998. La croissance était inférieure à la moyenne dans toutes les régions sauf en Europe et en Eurasie. La Chine, un des nouveaux pays industrialisés, voit sa consommation d'énergie presque doubler de 2005 à 2015. Sa part dans la consommation mondiale passe de 16,4 % à 22,92 %. La consommation par habitant en Chine dépasse la consommation par habitant dans le monde « la population de la chine représente 18,6 % de la population mondiale en 2015 ».

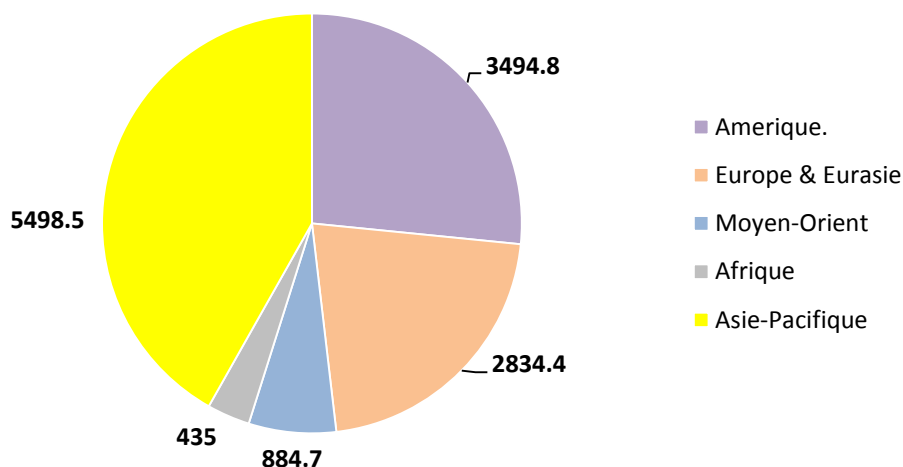


Fig 19 : Consommation mondiale « en Mtep » des énergies en 2015

La consommation en Afrique augmente 24,5 % de 2005 à 2015, mais elle reste marginale dans la consommation mondiale « environ 3,31 % pour 16,1 % de la population mondiale ».

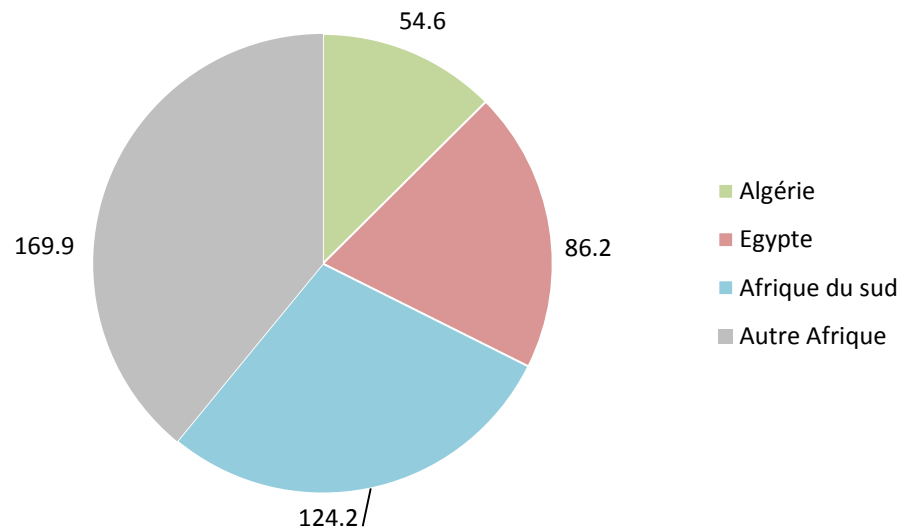


Fig 20 : Consommation « en Mtep » des énergies en Afrique en 2015

V. 4. Evolution de la demande énergétique mondiale

Les facteurs qui pèsent sur l'évolution de la demande d'énergie dans le monde sont :

- ✓ l'accroissement de la population mondiale « 9 à 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050 »,
- ✓ les efforts des pays en voie de développement pour combler leur décalage économique « croissance de 8 à 10% en Chine et en Inde »,
- ✓ le maintien d'une légère croissance de la demande énergétique dans les pays développés, la demande d'énergie primaire poursuit sa croissance mais sa répartition géographique se modifie.

V. 5. Evolution et perspectives de la production et la consommation d'énergie en Algérie

La consommation d'énergie en Algérie, entre 2005 et 2015, a enregistré un taux de croissance moyen annuel de l'ordre de 4 %. Cette consommation énergétique a atteint 54,6 Million TEP. Les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures notamment le gaz naturel « l'énergie la plus disponible ».

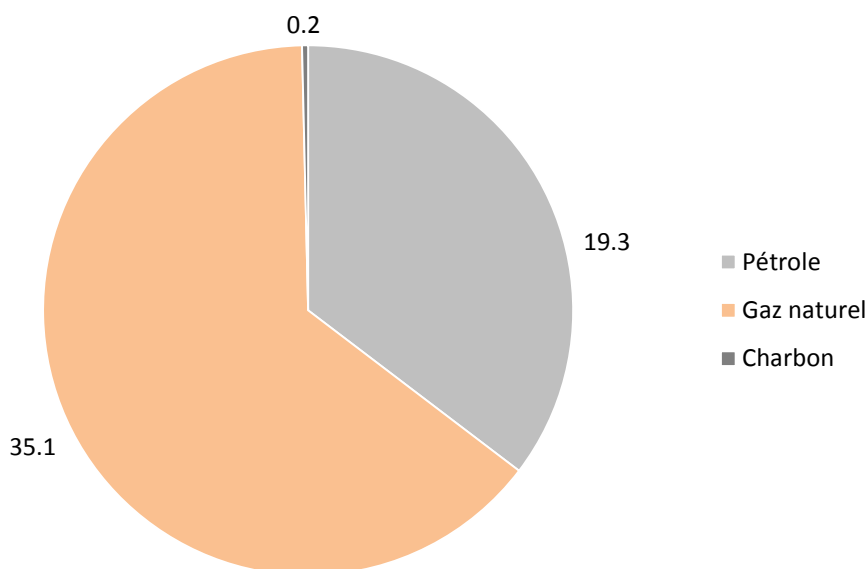


Fig 21 : Part des énergies dans la consommation en Algérie en 2015

La production et la consommation d'énergie, en Algérie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %. Cependant, afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile, l'Algérie à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable d'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

a) L'Algérie et le charbon

L'Algérie dispose d'une réserve de 250 millions de tonnes de charbon. L'Algérie peut-être retournera au charbon, mais cette démarche peut être contredite avec la lutte contre le changement climatique, en raison de l'impact du charbon sur l'environnement « en plus de la pollution, les centrales électriques au charbon ils coûteront trop chers ».

Note : Avec seulement 20 millions de tonnes de charbon, il est possible de faire fonctionner une centrale électrique de 300 à 400 MW durant 30 ans.

b) L'Algérie et le pétrole

L'Algérie, selon BP, dispose d'une réserve prouvée de 1,5 milliard de tonnes « 12,2 milliards de barils » à la fin 2015, ces réserves classaient l'Algérie au 17^{ème} rang mondial avec 0,7 % du total mondial, et au 4^{ème} rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola.

Note : 12,2 milliards de barils représente 21 fois la production au rythme de l'année 2015.

Tab 11 : Pétrole : réserves prouvées (milliards de barils) Années 2002 – 2015

Années	2002	2003	2004	2005	2006	2008	2010	2014	2015
Réserves prouvées	13.10	13.10	11.87	12.46	11.00	14.79	13.42	12.20	12.20

Tab 12 : Pétrole : Production pétrolière (millions de barils/jour) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	1.990	1.992	1.775	1.689	1.642	1.537	1.485	1.589	1.586

Tab 13 : Pétrole : Capacités de raffinerie (mille barils/jour) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	443	443	554	554	652	652	647	651	651

c) L'Algérie et le gaz naturel

L'Algérie dispose 2,4 % des réserves mondiales prouvées de gaz naturel en 2015, elle se classe à la dixième position, bien loin de l'Iran classée première avec 34 trillions de mètres cubes qui présente 18.19 % des réserves mondiales et de la Russie classée deuxième, qui détient 17,3 % avec 32.3 trillions de mètres cubes des réserves mondiales. Les réserves de gaz naturel en Algérie étaient de 3.3 trillions de mètres cubes à la fin de l'année 1990, ont connu une hausse importante dès le début de la décennie 1990 avec les grandes découvertes faites parallèlement à celles du pétrole.

Tab 14 : Gaz naturel : réserves prouvées (trillions de mètres cubes)

Années	1995	2005	2015
Réserves prouvées	3.7	4.5	4.5

Tab 15 : Gaz naturel : production de gaz naturel (milliards de mètres cubes) Années 2005 – 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Production	88.2	84.80	79.60	80.40	82.70	81.50	82.40	83.30	83.00

Tab 16 : Gaz naturel : consommation de gaz naturel (milliards de mètres cubes) Années 2005– 2015

Années	2005	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Consommation	23.20	24.30	27.20	26.30	27.80	31.00	33.40	37.50	39.00

d) L'Algérie et l'énergie nucléaire

L'Algérie est équipée de deux réacteurs nucléaires de recherche, le réacteur Essalam « à Ain oussara », qui délivrer une puissance de 15 mégawatts et le réacteur nucléaire NOUR « à Draria », qui délivrer une puissance de un mégawatt.

L'Algérie dispose d'une réserve de 26 000 tonnes d'uranium, l'exploitation de cette Uranium n'est d'ailleurs pas exclue dans la politique énergétique élaborée par notre pays. D'après une déclaration du conseiller du ministre de l'Energie. Il affirme que l'Algérie et compte se doter d'une centrale nucléaire tous les cinq ans après deux centrales de 2000 mégawatts, permettant ainsi de couvrir entre 10 et 15% des besoins en matière d'électricité à l'horizon 2030.

e) L'Algérie et les énergies renouvelables

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte, est engagée sur la voie des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016 lors du Conseil du Restreint Gouvernement.

L'Algérie en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables « EnR » et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement Algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

➤ Énergie éolienne en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents « Alger ».

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.



Fig 22 : éolienne de pompage d'Adrar

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne a été inaugurée en 2013 après 32 mois de travaux, pour un coût total de 2,8 milliards de dinars. Elle se déploie sur 30 hectares et a une capacité de 10 mégawatts (MW). Par ailleurs, le gouvernement de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des énergies renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme, pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

Note : Une première pierre d'un complexe industriel "Général Electric Algeria Turbine, « GEAT » a été posée à Ain-Yagout « wilaya de Batna ». Ce complexe est la résultante d'un accord signé en 2014 entre SONALGAZ et General Electric pour la réalisation d'un complexe industriel, devrait être opérationnel dès 2017, pour la fabrication des turbines à gaz, turbines à vapeur, alternateurs et systèmes de contrôle-commande.



Fig 23 : La première ferme éolienne en Algérie « Adrar »

➤ Énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national peut atteindre 3900 heures annuellement, avec une énergie reçue annuellement près de **3 kWh/m²** au nord et dépasse **5,6 kWh/m²** au Grand Sud. Le potentiel solaire thermique, dans ce Grand Sud, est aussi très fort, équivaut à **10 fois** la consommation globale mondiale.

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

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire thermodynamique, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants. Deux projets pilotes de centrales thermodynamiques ont été réalisés à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire.

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

Partie 6 : Différents types de pollutions

VI. 1. Introduction

Le terme pollution vient du latin « **pollutio** » qui signifie salissure ou souillure. Ce terme pourrait être un phénomène ou élément perturbateur d'un équilibre établi. Donc, la pollution est l'introduction dans l'air, l'eau ou le sol de substance étrangère « n'étant pas présente naturellement dans le milieu » ou la variation de son taux d'existence. Ce qui entraîne une dégradation de l'environnement ou une perturbation de l'écosystème et peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement. L'activité humaine industrielle, urbaine, ou agricole, produit des substances polluantes qui sont l'origine des pollutions organiques, chimiques ou radioactives. Ces substances polluantes sont émis dans l'atmosphère « **pollution de l'air** », évacuées dans les eaux « **pollution de l'eau** » ou propagées sur les sols « **pollution du sol** ». Elles peuvent exister sous forme de gaz, de substances dissoutes ou de particules.

VI. 2. Types de pollution

On peut spécifier essentiellement 4 types de pollution :

➤ **Pollution organique**

La pollution organique résulte des activités quotidiennes des êtres humains « excréments et cadavres », des activités industrielles relatives à la production agroalimentaire ou aux activités agricoles telles que production animale ou végétale. Les chlorures et les nitrates contenus dans les déchets humains et animaux, en quantité raisonnable, sont nécessaires à l'écosystème, car ils sont recyclés par la nature. En quantité énorme, comme c'est le cas dans les égouts, ils sont une source de pollution, qui peut contaminer les eaux souterraines des puits peu profonds.

Note : en l'absence de contamination, la quantité en nitrates des eaux souterraines est entre 0,1 et 1 mg/L, cette contamination a débuté en 1950 et n'a fait qu'augmenter depuis lors. Cependant, aujourd'hui, elle souvent dépasse la norme retenue pour les eaux potables « 50 mg/L ».

➤ **Pollution chimique**

La pollution chimique se retrouve essentiellement dans l'eau et l'air, elle est produite par les insecticides ou pesticides employés pour éliminer les insectes et protéger les végétaux, les engrais chimiques et les moyens de transports. On peut y ajouter l'accumulation de gaz carbonique provoquée par la déforestation.

➤ **Pollution radioactive**

La pollution radioactive est due aux déchets nucléaires, proviennent directement ou indirectement par l'activité humaine, qui introduit des substances radioactives dans l'environnement. Environ 10% de ces déchets radioactifs peuvent durer plus d'un milliard d'années « l'uranium 238 durer 4,5 milliards d'années, le potassium 40 durer 1,248 milliard d'années ». Ces substances radioactives peuvent causer un danger pour la santé de l'homme, des détériorations des ressources de l'écosystème et d'entraver à l'usage légitime de l'environnement.

➤ **Pollution par les déchets solides**

La pollution par les déchets solides vient dénaturer gravement les eaux et les sols de la planète, souillent nos plages, souillent les rues de nos villes et les prairies de nos campagnes, des tonnes de déchets déversées dans la nature des bouteilles, mouchoirs, matières plastique, polymères, il y en a partout et sont la preuve d'un manquement grave de la part de nombreux individus au respect des éléments.

VI. 3. Sortes de pollutions

La pollution existe sous les trois états de la matière, donc on peut distinguer trois sortes de pollution :

VI. 3. 1. Pollution de l'air

L'air se compose de 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % d'autres gaz. La modification de cette composition, due aux émissions d'origine humaine, implique une dégradation de la qualité de l'air. L'homme introduit dans l'atmosphère des substances qui ont des conséquences préjudiciables pour les êtres vivants et pour l'environnement. Ces substances sont émises par les activités industrielles, domestiques et agricoles, les transports de personnes et de marchandises.

Les gaz polluants sont trop nombreux, nous ne pouvons pas actuellement ni identifier ni mesurer l'impact de tout l'ensemble des gaz polluants émis dans l'atmosphère, parmi ces gaz en site les plus polluants.

➤ **Monoxyde de Carbone CO**

Le monoxyde de carbone se forme lors d'une combustion incomplète environ 55% proviennent des véhicules à moteur et 26% du chauffage et des installations de combustion industrielles. Il inhibe le transport de l'oxygène dans le sang.

Note : le monoxyde de carbone fait de nombreuses victimes durant les mois d'hiver chaque année en Algérie. Ce gaz incolore, inodore, non irritant est toxique pour l'organisme et peut provoquer de graves complications à certaines doses.

➤ **Dioxyde de Soufre SO₂**

Le Dioxyde de Soufre SO₂ est un gaz incolore, à l'odeur piquante qui irrite les yeux et les voies respiratoires, 91% de ce gaz est produit par la combustion des énergies fossiles utilisées par le

chauffage domestique et par les chaudières industrielles et le reste du pourcentage est produit par les moyens de transports et la fonte des minerais de fer contenant du soufre.

➤ **Dioxydes d'azote NO₂**

Le dioxyde d'azote NO₂ est un gaz suffocant toxique à une odeur âcre, il se forme à partir du monoxyde d'azote NO, 56% de ce gaz est produit par les moteurs à combustion interne et 30% des installations de combustion.

Note : le dioxyde de soufre SO₂ et le dioxyde d'azote NO₂ contribuent à la formation des pluies d'acides qui menacent principalement les végétaux, l'équilibre d'acide du sol et l'équilibre d'acide des eaux. Ce qui peut changer les caractéristiques des sols, notamment des sols acides comme le granite et le grès.

➤ **Composés organiques volatils COV**

Les composés organiques volatils COV regroupent plusieurs composés, ils proviennent de la combustion incomplète des combustibles et des carburants des véhicules de transport, de l'industrie, de l'artisanat et des ménages et par évaporation de solvants. Ils peuvent être biogénique « origine naturelle » ou anthropogénique « origine humaine ». Les composés COV les plus connues sont le butane, le propane, l'éthanol, l'acétone, les solvants dans les peintures, les solvants dans les encres....etc.

➤ **Ozone troposphérique O₃**

L'ozone troposphérique est un polluant secondaire, il se forme lorsque deux polluants primaires « les oxydes d'azote NO_x et les composés organiques volatils COV » réagissent sous l'effet photochimique « c'est-à-dire il résulte de l'action des rayons solaires sur l'air pollué ». L'ozone est l'un des principaux constituants du smog estival.

Note : l'ozone troposphérique « le gaz polluant » est différent de l'ozone stratosphérique « la couche protectrice de l'atmosphère ».

➤ **PM10**

Les PM 10 regroupent une vaste gamme de composition physico-chimique dont le diamètre est inférieur à dix micromètres, ils sont des polluants atmosphériques proviennent des émissions primaires issues principalement de procédés de combustion et de procédés industriels ainsi que de l'abrasion des routes, des rails, des freins et des pneus, et d'aérosols secondaires.

➤ **Plomb Pb**

Le plomb pénètre dans l'environnement essentiellement par l'intermédiaire des fumées d'échappement des voitures. Les grandes particules retombent au sol, les petites particules pénètrent dans l'air et restent dans l'atmosphère. L'essence au plomb n'est pas le seul contributeur qui augmente la concentration du plomb dans l'environnement, d'autres activités telles que la combustion de combustibles fossiles, les procédés industriels et la combustion des déchets solides, augmentent aussi cette concentration.

➤ **Ammoniac NH₃**

L'ammoniac NH₃ est un polluant essentiellement agricole, émis lors du stockage et de l'épandage de fumier et de lisier provenant des élevages d'animaux, mais aussi lors de la fabrication des engrais ammoniaqués. C'est un déchet dangereux pour l'environnement et la santé, il peut provoquer des brûlures et des irritations pulmonaires.

➤ **Éléments Traces Métalliques « ETM »**

Les ETM ou aussi les métaux lourds correspondent à une définition physique « masse volumique supérieure à 5 g/cm³ ». Ils sont présents naturellement dans les sols, dont certains sont indispensables aux plantes, les ETM les plus connus pour leur dangerosité sont le cadmium, le mercure, le chrome, le zinc et ainsi que de la ferraille contenant des ETM. Ces derniers sont contenus dans l'air que nous respirons, dont ils émettent par les cheminées des usines d'incinération d'ordures ménagères et des aciéries. Certains d'entre eux sont très toxiques.

➤ **Tabac**

La fumée de tabac est la première source de pollution dans l'habitat, elle est la principale nuisance dans les locaux. Plus de 3 000 substances ont été identifiées dans la fumée de tabac « nicotine, goudron, monoxyde de carbone, ...etc », ces substances nocives sont responsables de plusieurs maladies ; cancer, accoutumance, asthme, maladies respiratoires,...etc.

➤ **Gaz à effet de serre**

La présence des gaz en faibles quantités dans l'atmosphère « **effet de serre naturel** », comme la vapeur d'eau ou le gaz carbonique « CO₂ » augmentent la température moyenne de notre planète, ce qui rend habitable. Outre la vapeur d'eau et le gaz carbonique, les principaux gaz naturels à effet de serre le méthane « CH₄ », le protoxyde d'azote « N₂O » et l'ozone « O₃ ».

Néanmoins, la légère augmentation de ces gaz, à cause des activités humaines « **effet de serre anthropique ou additionnel** » est préoccupante. la contribution à l'effet de serre d'origine humaine est due au ; gaz carbonique CO₂ « responsable d'un peu plus de **55%** », le méthane CH₄ « engendre un peu plus de **15%** », les halocarbures « formule générique de type C_xH_yHal_z où Hal représente un ou plusieurs halogènes » « engendrent un peu plus de **10%** », l'ozone troposphérique O₃ « engendre enfin environ **10%** » et le protoxyde d'azote N₂O « engendre environ **5%** ».

Note : certaines sources naturelles de gaz on les classe dans les gaz polluants de l'air, par exemple :

- les volcans projettent de très grandes quantités de dioxyde de soufre et de particules vers l'atmosphère.
- Les végétaux dispersent dans l'air une quantité de gaz qui peuvent provoquer des troubles.

VI. 3. 2. Pollution de l'eau

La terre est appelée également la planète bleue, car elle est recouverte par environ 71 % d'eau en surface « océans, mers, fleuves... etc. », l'eau existe également dans les couches aquifères du sol « eaux souterraines » et existe aussi dans l'air sous forme de « vapeur ». Néanmoins, contrairement à ce que l'on pense, l'eau est un bien rare et précieux, car toute l'eau de la terre ne représente qu'environ 0.13 % de son volume total « volume de l'eau 1 400 millions km³, volume de la terre

1 083 320 millions km³ », dont sa préservation est l'affaire de chacun d'entre nous, et il ne convient pas qu'on gaspille cette eau « même si tu te trouvais au bord d'un fleuve débordant » selon notre prophète « bénédiction et salut soient sur lui ».

Exemple

Saviez-vous que ?

- La fabrication de **1 L d'essence** consomme **10 L d'eau**.
- La production de **1 kg de pomme de terre** consomme **1 000 L d'eau**.
- La fabrication de **910 kg de papier** consomme **295 000 L d'eau**.

La pollution de l'eau est toute altération « chimique, physique ou biologique » de sa qualité et de sa nature, qui a un effet nocif et rend son utilisation dangereuse et « ou » perturbe l'écosystème aquatique. Donc, cette pollution concerne les eaux superficielles et les eaux souterraines, elle est due principalement par les décharges de déchets domestiques et industriels, les industries, l'agriculture et d'autres activités humaines. Cette pollution se manifeste dans les eaux par, la diminution de la teneur en oxygène dissous, la présence de produits toxiques, la prolifération d'algues, la modification physique du milieu récepteur et la présence de bactéries ou virus dangereux.

Note : la pollution des eaux souterraines est caractérisée par une propagation lente et durable « qui prend plusieurs dizaines d'années », la résorption ou le traitement d'une nappe contaminée est très difficile.

On distingue deux sortes de sources de pollution d'eau, **les sources localisées** et **les sources non-localisées**. Si les polluants sont déversés dans un lieu précis il s'agit d'une source de pollution localisée « par exemple : les égouts, les usines, les mines, les pétroliers et l'agriculture », sinon, si on ne peut pas localiser un lieu précis de déversement des polluants il s'agit d'une source de pollution non localisée « par exemple : les dépôts d'acide de l'air, le trafic, les polluants provenant des eaux souterraines ou diffusés par les fleuves », dans la plupart des cas, on ne peut en retrouver les auteurs de cette pollution, donc il est difficile de la contrôler.

VI. 3. 2. 1. Différentes catégories de pollution

Les différentes catégories de pollution sont :

➤ Polluants des maladies

Cette catégorie regroupe les polluants qui provoquent des maladies tels que les bactéries, les virus et les vers parasites qui se développent dans les eaux usées non traitées.

Note : 80% des maladies dans les pays en voie de développement sont dues à l'eau.

➤ Polluants des déchets

Ces déchets ont besoin d'oxygène pour leurs décomposées, cela peut abaisser le niveau d'oxygène de l'eau, ce qui influe sur les autres espèces vivant dans l'eau.

➤ **Polluants des inorganiques hydrosolubles**

Cette catégorie est celle des polluants inorganiques hydrosolubles tels que les acides, les sels et les métaux toxiques, ils rendent l'eau inapte à la consommation et entraînent la mort de la vie aquatique.

➤ **Polluants des nutriments « les nitrates et les phosphates hydrosolubles »**

Ces polluants entraînent une croissance excessive des algues et des plantes aquatiques, ce qui diminue aussi la quantité d'oxygène dans l'eau.

➤ **Polluants des composés organiques**

Cette catégorie regroupe les polluants des composés organiques comme le pétrole, les plastiques et les pesticides, ils sont nocifs pour l'homme ainsi que pour toutes les plantes et tous les animaux vivant dans l'eau.

➤ **Polluants des sédiments en suspension**

Ces polluants diminuent l'absorption de la lumière par l'eau et elles diffusent, dans l'eau, des composés dangereux tels que les pesticides.

➤ **Polluants des composés radioactifs**

Ces polluants sont les plus dangereux, ils peuvent causer des cancers, des malformations chez les nouveau-nés et même des modifications génétiques.

VI. 3. 2. 2. Différentes sources de pollution

Les différentes sources de pollution sont :

➤ **Polluants agricoles**

Le secteur d'agriculture utilise des engrais chimiques qui polluent les eaux souterraines, après l'irrigation des terres par infiltration. Ce secteur, pollue aussi les rivières, par les déjections animales « purin et lisier » qui augmentent la quantité de nitrates et de chlorures.

➤ **Polluants urbains**

Dans une ville ; les familles, les issues des commerces, les bâtiments scolaires, les hôpitaux, ... etc. utilisent l'eau pour ces divers besoins, après usage, l'eau s'écoule chargée de débris organiques, de graisses, de solvant, de détergents, de matières organiques azotées et de germes fécaux. Par ailleurs, l'eau de pluie qui ruisselle sur les surfaces imperméables « toits ou bitume » pour se retrouver dans les canalisations ou les rivières est aussi une source de pollution, car il se charge le long de son parcours en produits organiques et minéraux, liés au trafic automobile et à l'activité industrielle.

➤ Polluants accidentels

Les polluants accidentels sont disséminés dans la nature « par infiltration ou ruissellement », ils en causent par les importantes quantités des produits chimiques et organiques « gaz ou de liquides toxiques » échappent par les activités humaines. Ils en causent aussi, par les incendies, lorsque les eaux d'extinction sont en contact direct avec les produits polluants.

➤ Polluants Industriels

Les ateliers de production dans les secteurs de l'industrie génèrent des rejets d'eaux polluées « parfois avec des quantités et/ou des concentrations très élevées » appelées effluents industriels, ces effluents ont un effet toxique sur les organismes vivants. Les usines génèrent aussi des rejets d'eaux chaudes qui ont un effet nocif sur l'écosystème des fleuves et des rivières.

<i>Exemple</i>	
Saviez-vous que la pollution journalière produite par une personne est évaluée à ?	
➤	70 à 90 g de matières en suspension.
➤	60 à 70 g de matières organiques
➤	12 à 15 g de matières azotées
➤	3 à 4 g de phosphore
➤	plusieurs milliards de germes pour 100 ml
Saviez-vous aussi que ?	
➤	Une goutte d'huile rendre inhibé à la consommation jusqu'à 25 L d'eau.
➤	Un gramme de 2,4-D « un herbicide » peut contaminer jusqu'à 10 000 000 L d'eau potable.
➤	1 L de pétrole peut contaminer jusqu'à 2 000 000 L d'eau.

VI. 3. 3. Pollution du sol

Le sol remplit une multiplicité de fonctions complexes, sa pollution influe directement ou indirectement sur l'eau et l'air, car il représente une interface entre la terre, l'air et l'eau. Cette pollution est due essentiellement aux ; dépôts de substances polluantes, l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques, les infiltrations, l'épandage de produits chimiques, les retombées dues à des rejets atmosphériques, les guerres et même quelques activités sportives ou de loisirs « le golf diffuse de l'arsenic et des pesticides, la chasse diffuse du plomb, ... etc. ».

VI. 3. 3. 1. Sources de pollution des sols

➤ Pollution diffuse

Elle touche une grande superficie avec des petites doses répétées régulièrement, elle est liée à une multitude de sources, donc elle est plus difficile à contrôler. Elle est peut être due aux pratiques agricoles ou aux retombées atmosphériques.

➤ **Pollution ponctuelle**

Elle est très localisée et intense, est provient d'un point unique et identifiable, par exemple les industries ou les autres sources de polluants de façon chronique ou accidentelle. Ce type de pollution est le plus connu et souvent le plus polluant à court terme.

VI. 3. 3. 2. Types de polluants

Les familles de produits susceptibles de se retrouver dans le sol sont :

- ✓ Inorganique
- ✓ Organique
- ✓ Radionucléide « produits radioactives nucléaires »

VI. 3. 3. 3. Conséquences des pollutions des sols

Les conséquences des pollutions des sols sont :

- ✓ la modification de la flore et de la chaîne alimentaire
- ✓ la pénétration des pollutions dans le cycle de l'eau, qui perturbe l'écosystème et nuise la vie humaine.
- ✓ Décroître la superficie des terres utilisables.

Partie 7 : Détection et traitement des polluants et des déchets

VII. 1. Introduction

L'environnement « l'air, l'eau et le sol » est pollué lorsqu'il contient des substances polluantes dépassent sa capacité à les éliminer naturellement. Ce qui le rend nocif pour les personnes, les animaux ou les plantes. Autrement-dit, l'équilibre de l'écosystème est brisé.

Dans le cadre de la protection de l'environnement, la majorité des gouvernements ont identifié des normes techniques, dans le but est de réduire les émissions des polluants et les répercussions nuisibles des activités humaines sur cet environnement. La détection et la mesure de la concentration des polluants, sont indispensables pour le suivi de ces normes. Des procédés législatifs et normatifs sont élaborés par les gouvernements pour minimiser l'impact de l'activité humaine sur l'environnement comme l'application d'écotaxes « **taxe écologique** » ou le principe pollueur-payeur « **le pollueur prend en charge les coûts des mesures et des préventions de lutte contre la pollution** ». Au niveau mondial, le protocole de **Kyoto**, à titre d'exemple, impose des quotas maximum d'émission en termes de gaz à effet de serre.

Note : en France, par exemple, une écotaxes est appliquée sur l'émission de huit métaux polluants « arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc »

VII. 2. Modèles économiques pour protection de l'environnement

Deux modèles économiques sont les plus couramment évoqués pour réduire la consommation d'énergie, la consommation des matières premières et les impacts humains sur l'environnement ;

➤ **Développement durable**

Ce terme apparaît pour la première fois en 1980, sa définition de référence, selon le rapport Brundtland en 1992 est : « **le développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs** ».

Note : la croissance économique est au cœur du principe de développement durable, alors que les opposants estiment que c'est elle-même qui cause la dégradation de l'environnement.

➤ **Décroissance**

Le principe de ce modèle est de réduire l'impact humain sur l'environnement par la décroissance de l'économie. Cette pensée a pris naissance en 1972 dans le rapport de Meadows « Halte à la

croissance », qui constat que la croissance de la population humaine et la cause de la croissance de la consommation d'énergie, des ressources naturelles « matières premières » et de la pollution engendrée. Les partisans de ce modèle sont convaincus qu'une croissance zéro est la solution pour éviter l'épuisement des ressources naturelles.

VII. 3. Détection et mesure de pollution

Les besoins d'évaluation environnementale, d'études d'impact et l'application d'écotaxes ou du principe pollueur-payeur nécessitent des indicateurs de pollution reconnus et/ou normés. Ces indicateurs sont servis afin de détecter une pollution ou une dégradation de l'environnement, il existe plusieurs indicateurs comme :

➤ **Pollutions apparentes**

Ce n'est pas difficile de détecter plusieurs polluants des milieux naturels; sur le sol « les déchets solides », dans les eaux la qualité de l'eau « l'odeur ou la couleur » et dans l'atmosphère ou la qualité de l'air « la poussière ».

➤ **Pollutions non apparentes**

L'environnement peut contenir des éléments, non visibles et sans odeur, pouvant avoir des effets indésirables. Donc, l'analyse périodique de l'eau « potable ou des autres utilisations » des « puits, vallées, fleuves, plages,...etc. », de l'air et des sols est indispensable pour la préservation de l'environnement.

➤ **Perte de biodiversité**

La biodiversité figure un indicateur de l'état de l'environnement, leurs espèces sont fragiles « tout l'écosystème est en risque, si un maillon de la chaîne est détruit ».

➤ **Raréfaction des ressources naturelles**

La raréfaction des ressources naturelles que-ce-soit renouvelables ou non, est un autre indicateur de l'état de l'environnement.

➤ **Effets engendrés par la pollution**

Des effets comme « le changement climatique, trou dans la couche d'ozone, la corrosion des métaux 'due au dioxyde de soufre', des encroûtements des constructions 'due aux poussières des combustibles', les nécroses sur les plantes, ...etc. » peuvent indiquer l'état de l'environnement ou l'existence de la pollution.

➤ **Bioindicateurs**

Quelques organismes végétaux ou animaux sont utilisés comme bioindicateurs par leurs vitesses de croissances et leurs capacités reproductives « des plantes comme les nitrophiles détectent les eaux riches en nitrates, le tabac et le trèfle sont très sensible à l'ozone, et des animaux comme l'escargot

indique la teneur en chrome dans les sols et l'activité des abeilles « colonie et/ou une mortalité importante » peut traduire une pollution atmosphérique.

Note : il est très difficile de mesurer l'impact de polluants multiples agissant en synergies.

VII. 4. Gestion des déchets

Un déchet est un produit, substance ou matériau dont on n'a plus utilisé et destiné à l'abandon ou doit se débarrasser, il est produit en général par les zones urbaines, l'industrie et même par l'agriculture. Ce déchet crée une véritable préoccupation d'hygiène et de propreté environnementale.

Avant près d'un siècle, la nature a été capable de digérer nos déchets. Actuellement, la nature seule est incapable de digérer la quantité énorme de ces déchets, qui est difficilement biodégradables et riche en matières chimiques.

Auparavant, au début de la révolution industrielle, la gestion des déchets est effectuée par un système de décharges consistait à stocker dans un site éloigné des habitations, après ça, aux années 60 du dernier siècle, l'incinération s'est développée, grâce à la difficulté croissante de trouver des sites de décharge et au nouveau matériel qui peut brûler ces quantités importantes de déchets. Ainsi, depuis quelques années, l'idée d'une gestion par une économie circulaire qui lutte contre le gaspillage, est apparue. Cette idée valorise les déchets, par le recyclage « extraire des matières premières », compostassions, méthanisations, ou les brûler pour produire l'électricité ou la chaleur. La gestion de ces déchets passe par les étapes suivantes :

➤ **Collecte des déchets**

Généralement elle est réalisée par les camions-poubelles qui ramassent les ordures, dans les points de productions collectifs ou porte à porte. Dans les pays développés, généralement, la collecte est effectuée de manière sélective.

➤ **Triage des déchets**

Le triage des déchets est effectué quotidiennement par des poubelles de différentes couleurs, où les citoyens trient les déchets avant de les jeter à la poubelle. Cette opération limite la pollution et ouvre la porte à la valorisation de ces déchets.

➤ **Valorisation des déchets**

Représente la solution idéale de l'élimination des déchets, elle transforme un déchet « matériel ou organique » en un objet de valeur « palpable ou énergie ».

➤ **Incinération de déchets**

L'incinération est un traitement thermique consiste à brûler « de 700 °C à 900 °C » un maximum de ces déchets, est réduire efficacement leur masse et détruire les produits chimiques dangereux et les pathogènes présents dans ces déchets. Dans la majorité des pays développés la récupération de l'énergie produite par l'incinération est obligatoire et les centres de cette incinération doivent être équipés pour traiter les fumées dégagées.

Note : dans la majorité des pays en voie de développement, ces étapes sont résumées par la mise en décharge sans aucun traitement et aucune valorisation, ou par une incinération simple « sans récupération d'énergie », et le recyclage n'est qu'une récupération informelle.

VII. 5. Catégories de déchets

On peut classer les déchets selon leur nature en plusieurs catégories :

➤ Déchets ménagers

Ils sont produits dans les villes « dans la vie quotidienne » constitués des restes de repas, emballages, boîtes de conserve, on peut ajouter les déchets des commerces, des artisans, des administrations publiques et des établissements d'enseignement et de santé.

Note : en Algérie, chaque personne dans les zones urbaines produit **0,8 kg/jour** de déchets, soit plus de 292 kg par an!

➤ Déchets industriels

On distingue deux sortes de ces déchets, les déchets industriels banals s'apparentent aux déchets ménagers « elle est constituée de cartons, de papiers, de plastiques, de métaux, de textiles...etc. ». L'autre sorte est pour les plus dangereux ou les déchets industriels spéciaux qui exigent des conditions particulières afin de les éliminer ou stocker par exemple les solvants, les colles, les produits chimiques...etc.

➤ Déchets inertes

Sont des déchets constitués par les gravats de démolition « briques, blocs de béton, terre, panneaux de vitres... », Subséquemment ; ils sont non biodégradables et non susceptibles de brûler ou de produire de réaction chimique. Ils ne sont pas dangereux, mais ils représentent des risques de dégradation des paysages « vue leurs quantités énormes ».

➤ Autres catégories de déchets

Il existe d'autres sortes de déchets dont ils besoin d'un traitement spécifique ;

✓ Déchets des stations d'épuration des eaux usées

Ces stations produit entre 2 à 4 g/L de boues, soit 1000 m³ d'eau rejetée produit entre 2 et 4 tonnes ou 75 à 150 m³ de boues, ce qui rend le débarrassèment de ces déchets un défi pour les gérants de ces stations.

✓ Déchets radioactifs

Ces déchets sont classés selon leurs activités, les déchets de haute activité ou de vie longue sont incorporés à une pâte de verre en fusion coulée dans des colis en inox, conservés dans des puits. Ce qui concerne les déchets de faible et moyenne activité à vie courte, ils sont d'abord solidifiés, puis enrobés de béton ou de bitume et finalement ils sont placés dans les colis. Les déchets de très faible activité sont compactés et conditionnés dans les colis et stockés dans des centres de stockages.

VII. 6. Triage et valorisation des déchets

Les déchets subissent un tri après la collecte, selon la dangerosité, pour réduire les risques et les impacts sur la santé et l'environnement, dont les déchets les plus dangereux sont :

➤ Huiles usagées

Sont considérées comme des déchets dangereux et toxiques ces huiles nécessitent un traitement spécifique pour être soit régénérées, soit valorisées comme combustible. Elles regroupent les huiles utilisées pour ; moteurs, compresseurs, fabrication ou préparation des additifs de lubrification, graissage, engrenage, vaseline et huiles de vaseline, isolantes, turbines, trempe et refroidissements ... etc.

➤ Polychlorobiphényles « PCB »

Une famille de plus de 200 composés aromatiques organochlorés dérivés du biphényle, dont la teneur en substance, de ces composés est supérieure à 50 ppm en masse. Vue leurs bonnes caractéristiques diélectrique et thermique ces composés ont été massivement utilisés comme isolants électriques, surtout entre 1930 et 1970, dans la fabrication des ; Transformateurs électriques, condensateurs, environnements à très haute tension « THT » ...etc. Ils ont été aussi utilisés dans les fours à micro-ondes, certains adhésifs et peinture,...etc. Ces produits produisent des dioxines et des furannes une fois brûler, ils sont cancérigènes, reprotoxiques, non biodégradables, solubles dans les graisses et en plus ils sont susceptibles dans la chaîne alimentaire et s'accumulent dans les organismes. Pour cela, ces produits sont considérés comme des polluants organiques persistants « 1990 », est sa production est interdite au niveau mondiale en 2004 à Stockholm Suède dans une convention sur les polluants organiques persistants.

➤ Solvants et peintures

La plupart des solvants et des peintures sont des déchets dangereux « volatils COV, toxiques et écotoxiques ». Donc, ils nécessitent un traitement pour neutraliser les effets indésirables et si possible régénérer « en général, par distillation ».

➤ Piles et accumulateurs

La différence entre la pile et l'accumulateur est que la pile est à usage unique et l'accumulateur est rechargeable. Les plus dangereux sont ; les piles contenant du mercure, les accumulateurs au plomb « batterie de voiture » et les accumulateurs nickel-cadmium.

Note : dans les pays développés, la collecte et le traitement de ces produits sont obligatoires aux fabricants, depuis quelques années.

➤ Autres déchets dangereux

Il existe d'autres déchets classés dans la case des déchets dangereux comme ; les déchets hospitaliers « les déchets radioactifs, les déchets à risques infectieux et les médicaments », tous les déchets contenant de l'amiante ou du mercure, les déchets phytosanitaires, les emballages souillés, les bois traités ou souillés...etc.

Les déchets subissent un tri selon leurs catégories ; déchets ménagers, déchets végétaux et déchets industriels, afin de les valoriser.

➤ **Valorisation par recyclage**

Les déchets recyclables sont récupérés et triés par matériau « verre, plastique, papier, aluminium, cuivre,...etc., puis ils sont réintroduits dans un cycle de production.

➤ **Valorisation par méthanisation**

Certains déchets végétaux et ménagers sont subissent à un procédé de fermentation afin d'aboutir à un dégagement de biogaz.

➤ **Valorisation par compostage**

Certains déchets sont exploités pour le compostage, ils sont subis à une fermentation aérée contrôlée afin d'aboutir à un composé organique utilisé dans l'agriculture pour régénérer les sols.

➤ **Valorisation énergétique**

L'incinération avec récupération d'énergie, est une autre stratégie de valorisation, un traitement thermique permet de brûler, certains types des déchets, dans des fours capables de récupérer l'énergie dégagée pendant cette opération « soit chaleur par la vapeur d'eau ou électrique par turbine ».

VII. 7. Gestion des déchets en Algérie

En Algérie, le gouvernement, avait adopté un programme national de gestion des déchets, ce programme est basé sur la stratégie nationale environnementale 'SNE' et le plan national d'actions environnementales et du développement durable 'PNAE-DD' qui s'est concrétisée par la promulgation de la loi relative à la gestion des déchets 01-19 du 12 décembre 2001, ce programme prévoyait la mise en place d'un système ; de prévention, de réduction de la production et de la nocivité à la source, de tri sélectif et de valorisation des déchets, et d'éradication des décharges sauvages.

Aujourd'hui, après des années, le domaine de recyclage est inexploité « quoique, il puisse rapporter 38 milliards DA, selon une déclaration du ministre des ressources en eau et de l'environnement en 2016 », les valorisations énergétique, par méthanisation et par compostage sont totalement absentes, ce retard de recyclage, selon une étude effectuée par un groupe d'experts sud-coréen en 2015, est due aux ; manque de l'ancrage culturel de cette pratique, faible taux de collecte avec l'insuffisance des bacs, l'irrégularité des fréquences de collecte et le manque ou la vétusté des moyens de collecte.

Partie 8 : Impact des pollutions sur la santé et l'environnement

VIII. 1. Introduction

Les impacts de la pollution sur notre santé et sur l'environnement sont certains, cette pollution est considérée comme une source de pathogènes externes ayant un impact sur la santé « substances chimiques toxiques, radiations ionisantes, germes, microbes, parasites...etc. », sur l'environnement la pollution peut avoir des conséquences néfastes sur les ressources indispensables à la vie « l'eau et l'air, et à plus long terme sur les sols ». Cependant, l'environnement souillé est considéré comme une source de pathogènes internes ayant un impact sur la santé « causes héréditaires, congénitales, fonctionnelles, lésionnelles, psychosomatiques... etc. ».

VIII. 2. Effets de la pollution sur la santé

Les effets de la pollution sur la santé sont connus depuis longtemps, de nombreuses études et recherches médicales ont constaté l'existence du lien entre la pollution et la causalité des maladies. La pollution de l'air intervient dans les cancers, les maladies respiratoires et les problèmes neurologiques. L'eau contaminée apporte notamment le choléra, la typhoïde, la polio, l'hépatite la diarrhée, la fièvre jaune, la dengue, le paludisme, ...etc. La pollution des sols affecte le développement neuromusculaire chez les enfants et cause des lésions hépatiques et rénales.

VIII. 2. 1. Effets de la pollution de l'air sur la santé

L'air est aussi nécessaire que l'eau, les aliments ou la chaleur, chaque un de nous, consomme environ 15 000 litres d'air chaque jour. Lorsque cet air est de mauvaise qualité cela signifie qu'il y a une quantité élevée de polluants dans l'air, qui augmente le risque de conséquences préjudiciables à notre santé. Les effets de cette pollution sont connus sur les poumons, le cœur, le cerveau et le système hormonal. L'organisation mondiale de la santé estimait en 2012 à 3,7 millions le nombre de décès prématurés provoqués dans le monde par la pollution atmosphérique.

➤ Bronchite aigüe et chronique

La bronchite est une inflammation des bronches « les conduits qui mènent l'air inspiré de la trachée aux poumons », elle est induite par une fragilisation des bronches due aux agents chimiques de la pollution. Selon certaines estimations, les cas annuels de bronchite aigüe attribuables à la pollution de l'air sont environ un million, cette pollution, est aussi, responsable de 134 000 nouveaux cas de bronchite chronique par an.

➤ Allergie pollinique

L'allergie aux pollens « souvent héréditaire » est une réaction, du système immunitaire, à un ou plusieurs types de pollen. Cette réaction mène à une inflammation de la conjonctive des yeux et de la muqueuse nasale. Les particules de poussières fines, dues à la pollution de l'air, jouent un rôle important dans l'aggravation des allergies provoquées par les pollens « les pollens dans les régions à haute pollution atmosphérique sont recouverts de particules de polluants; ce qui renforce leur action sur l'allergie ».

Note : 40% de la population mondiale « vivent dans des régions à forte densité ou près de routes fortement fréquentées » inspirent régulièrement trop de poussière fine, nocive pour la santé et surtout entraînant des maladies respiratoires.

➤ Cancer

Le centre international de recherche sur le cancer **CIRC**, a classé la pollution atmosphérique, en 2013, l'une des premières causes environnementales de décès par cancer. Mais, le nombre de cas de cancers attribuables à cette pollution, est difficile à estimer, car cette pathologie est associée à plusieurs facteurs de risques.

➤ Autres maladies liées à la pollution de l'air

La pollution atmosphérique peut être responsable « déclenchement ou aggravement », directement ou indirectement de ; toux, maux de tête, irritations oculaires, rhinites et dégradations des défenses de l'organisme. Cependant, elle est également mise en cause dans les maladies cardio-vasculaires comme ; l'infarctus du myocarde, l'accident vasculaire cérébral AVC et d'angine de poitrine, et dans plusieurs affections du système reproducteur ; baisse de la fertilité masculine, augmentation de la mortalité intra-utérine, naissances prématurées.

Le tableau 17 montre les zones du corps pouvant être affectées par certains polluants.

Tab 17 : les zones du corps pouvant être affectées par certains polluants

Polluants affectés	Zone du corps
Plomb, mercure et leurs composés.	Cerveau
Nickel, Chrome et leurs composés.	Fosses nasales
Ammoniaque, amiante, dioxyde de soufre, oxyde d'azote, di-isocyanate de toluène et poussière de charbon.	Poumons
Éthylène, chlorhydrate, dioxane et hydrocarbures chlorés.	Foie
Hydrocarbures chlorés, mercure et leurs composés.	Reins
Auramine, benzidine et bêta-naphtylamine.	Vessie
Benzène.	Moelle osseuse
Mercure, cadmium et leurs composés.	Nerfs
Di-isocyanate, hydrocarbures chlorés, détergents, acides et huiles minéraux	Peau

VIII. 2. 1. Effets de la pollution de l'eau sur la santé

Les maladies liées à l'eau représentent une véritable préoccupation dans les pays en voie de développement, et elles constituent un des plus graves problèmes de santé mondiale. Le choléra et autres pathologies diarrhéiques sont responsables de 1,8 million de décès par an. L'eau non salubre « du fait de l'absence d'assainissement et des difficultés d'approvisionnement en eau » dans les pays en voie de développement joue un rôle très important dans l'hygiène personnelle et alimentaire. Ce qui augmente le risque d'infection.

Les principales maladies infectieuses liées à l'eau sont :

➤ Maladies à transfert hydrique

Les maladies à transferts hydriques sont des maladies provoquées par l'eau contaminée par des déchets humains, animaux ou chimiques, elles concernent les pays en voie de développement, du fait de l'absence d'assainissement « aménagements de traitement des eaux usées », d'approvisionnement en eau salubre et aussi du fait de l'absence des infrastructures médicales.

Les maladies à transferts hydriques sont :

- ✓ Choléra
- ✓ Typhoïde
- ✓ Polio
- ✓ Méningite
- ✓ Hépatite A et E
- ✓ Diarrhée

Note : les maladies diarrhéiques tué chaque jour 6000 personnes dans le monde « environ 2 millions par an dont plus de la moitié sont des enfants ». Cependant, avec de simples mesures d'hygiène plusieurs de ces morts pourraient être évitées.

➤ Maladies dues au manque d'hygiène

Le manque d'hygiène due principalement au manque d'eau propre, une problématique dans les pays en voie de développement, où l'eau contaminée par des déchets humains, animaux ou chimiques, ce qui donne l'occasion aux bactéries pour propager et accru le risque de contracter des maladies et des infections, peuvent s'avérer terribles.

Les maladies liées au manque d'hygiène sont :

- ✓ Choléra
- ✓ Hépatite A
- ✓ Typhoïde

➤ Maladies aquatiques

Les maladies aquatiques sont des maladies transmises par des organismes qui passent le début de leur vie dans l'eau puis ils étalent tant que parasite « les vers, les moustiques et les mouches tsé-tsé ». Ces organismes infectent les organismes humains sans forcément être mortels, diminuent fortement les capacités physiques.

- ✓ Schistosomiase « bilharziasis » l'origine est le ver de la schistosomiase
- ✓ Fièvre jaune,
- ✓ Dengue « la forme la plus virulente déclenche des hémorragies graves voire mortelles »,
- ✓ Maladie du sommeil,
- ✓ Filariose
- ✓ Paludisme « malaria ».

➤ Maladies à vecteur d'insecte aquatique

Les maladies à vecteur d'insectes aquatiques sont des maladies infectieuses dans lesquelles le pathogène « virus, bactérie, parasite » est transmis par un intermédiaire d'un insecte « le vecteur », ces insectes « moustiques ou mouches », se reproduisent dans ou près d'une eau stagnante. Pour cette raison, ces maladies sont largement répandues dans les zones tropicales et subtropicales.

Les maladies à vecteur d'insectes aquatiques sont :

- ✓ Cécité des rivières ou onchocercose.
- ✓ Malaria,
- ✓ Filariose,
- ✓ Fièvre jaune,

Le tableau 18 montre les effets de certains polluants sur la santé.

Tab 18 : effets des polluants de l'eau sur la santé

Polluants	Effets sur la santé
Matières en suspension « minéraux, sable, boue, argile »	Ces matières augmentent le risque de la contamination humaine « par le transport des polluants »
Polluants organiques en matière organique « lisier, boues d'épuration,... etc », organochlorés « DDT », polychlorobiphényles « PCB ».	Favorise le développement d'organismes pathogènes
Azote « nitrates, phosphore »	Maladie bleue chez les enfants et risques de cancers
Métaux « Arsenic, Nickel et Chrome »	Troubles respiratoires, digestifs, nerveux ou cutanés et risques de cancers
Pesticides	Malformations, stérilité, troubles de la reproduction et risques de cancers

VIII. 2. 2. Effets de la pollution du sol sur la santé

Un sol contaminé est dû aux assainissements insuffisants et/ou manque de traitement des déchets, il est une conséquence indirecte des maladies vues auparavant « maladies de l'air pollué et de l'eau polluée », la consommation de la poussière des sols pollués par voie respiratoire et de l'eau polluée par voie digestive. Il est par contre difficile de déterminer si la pollution du sol est responsable direct

des effets sanitaires, d'une population qui réside sur ou à proximité d'un site pollué, mais il est souvent possible.

VIII. 3. Effets de la pollution sur l'environnement

Les polluants n'ont pas uniquement des effets négatifs sur la santé humaine, mais aussi des effets sur l'environnement. Les animaux, les plantes et même les bâtiments peuvent également subir les répercussions de la pollution.

De manière chronique ou ponctuelle les polluants ont des impacts sur les écosystèmes et même les cultures. Les pluies, neiges, brouillard deviennent plus acides « par la présence des polluants O_3 , NO_x , COV , NH_3 , ...etc. » donc, elles altèrent les sols et les cours d'eau « perte des éléments minéraux nutritifs ». Cette transformation du milieu engendre un déséquilibre de l'écosystème, par un appauvrissement de la biodiversité puis la perturbation générale du fonctionnement de l'écosystème « affecte la faune, modifie la physiologie des organismes, ...etc. ».

Les impacts des polluants peuvent aussi influencer indirectement sur l'environnement par la destruction de l'ozone stratosphérique et le réchauffement ou dérèglement climatique.

Le tableau 19 montre les effets de certains polluants sur l'environnement.

Tab 19 : les Effets des polluants sur l'environnement

Polluant	Effets sur l'environnement
Ozone troposphérique O_3	En quantité ou concentration élevées, l'ozone contribue à l'acidification de l'environnement qui perturbe la composition de l'air, des eaux et des sols, et préjudice l'écosystème « dépérissement forestier, acidification des eaux douces, atteinte à la chaîne alimentaire,...etc. » et même dégradent les bâtiments et les cultures.
Oxydes d'azote NO_x , Composés organiques volatils COV , Ammoniac NH_3	Elles interviennent dans la formation de l' O_3 et contribuent l'acidification de l'environnement
Poussières ou Particules en suspension « PM_{10} et $PM_{2,5}$ »	Elles absorbent et diffusent la lumière, limitant ainsi la visibilité et suscitent la formation de salissure par dépôt et peuvent avoir une odeur désagréable.
Dioxyde de carbone « CO_2 »	Il accroît l'effet de serre et contribue à la modification du climat de la planète.
Dioxyde de soufre « SO_2 »	Il forme l'acide sulfurique « H_2SO_4 » avec l'eau, qui contribue à l'acidification de l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] C. Ngô, « *L'énergie : ressources, technologies et environnement* », 3^{ème} édition, Dunod, Paris, 2008.
- [2] ReGrid : « *Notions élémentaires sur l'énergie éolienne* », Renewables Academy AG, Berlin, 2013.
- [3] F. Meunier, « *Domestiquer l'effet de serre: énergies et développement durable* », 2^{ème} édition Dunod, Paris, 2008.
- [4] W. Meinecke et al, « *Solar energy concentrating systems, Applications and technologies* », Müller publishing house, Heidelberg « Germany », 1995.
- [5] Anne Labouret et Michel Viloz, « *Energie solaire photovoltaïque - Le manuel du professionnel* », 2^{ème} édition Dunod, Paris, 2005.
- [6] B. Multon et al « *Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires* », Colloque énergie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications, Belfort, France. pp.64-77, 2004.
- [7] enea « *Le stockage d'énergie enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation* », fiche technique, 2012.
- [8] M. Pinard, « *Les énergies renouvelables pour la production d'électricité* », Dunod, 2009
- [9] J. Percebois, « *Stockage massif de l'énergie: un impératif pour réussir le mix énergétique de demain?* », IFP Energies nouvelles, Panorama 2013.
- [10] K. DEBROCK et al « *les particules fines (PM 10, PM 2.5, PM 1 et PM 0.1)* », fiche technique, 2009.
- [11] « *BP Statistical Review of World Energy* », fiche technique, 65^{ème} édition, June 2016.
- [12] « *Risques chimiques et biologiques* », fiche technique, -RCH 2, février 2011
- [13] INERIS, « *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Les polyChloroBiphenyles (PCB)* », fiche technique, 2011.

Sites internet consultés

<https://www.connaissancedesenergies.org>
<https://www.eia.gov/>
<https://www.connaissancedesenergies.org/>
<http://www.vedura.fr/>
<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr>
<http://www.geothermie-perspectives.fr>
<https://www.actu-environnement.com>
<http://www.respire-asso.org>
<http://www.futura-sciences.com>
<http://www.lenntech.fr>
<https://www.notre-planete.info>
<http://www.cnrs.fr>
<http://www.nasr-dz.org/PNR-2010/Fascicule%20%20Renouvelable.pdf>

<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/alg151386.pdf>
<http://ecologie-nature-hommes.e-monsite.com>
<http://www.linternaute.com>
<https://polleau.wordpress.com>
<http://www.septiemecontinent.com>
<http://pollutionlucasmartin.blogspot.com>
<https://jancovici.com>
<http://pollutionlucasmartin.blogspot.com/p/pollution-du-sol.html>
<http://www.afblum.be/bioafb/travelev/dechets.htm>
<http://www.cancer-environnement.fr>
<http://rsde.ineris.fr/>
<http://www.energy.gov.dz/>
<http://portail.cder.dz>