

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE SUPÉRIEURE EN SCIENCES APPLIQUÉES
DE TLEMCEN



المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
Ecole Supérieure en
Sciences Appliquées

POLYCOPIÉ DE COURS

Par :

M. Anisse CHIALI

Du module :

« INTRODUCTION AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES »

Destiné aux étudiants de :

TROISIÈME ANNÉE

Filière :

ÉLECTROTECHNIQUE, option « ÉNERGIES ET ENVIRONNEMENT »

Année universitaire 2018 / 2019

PRÉAMBULE :

Ce cours « Introduction aux énergies renouvelables » est un module semestriel (1^{er} semestre), destiné aux étudiants de la troisième année option Electrotechniques « Énergies et Environnement ».

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

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

J'ai assuré ce cours durant les années universitaires 2016/2017, 2017/2018 et actuellement durant l'année universitaire 2018/2019.

Notre cours comporte sept chapitres :

Le chapitre 1 «**Différentes ressources énergétiques**», à savoir les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...). Les besoins mondiaux en énergie ont augmenté de façon considérable au cours du vingtième siècle et le développement des pays émergents comme la Chine permet de prévoir une augmentation encore plus rapide dans les prochaines décennies.

Le chapitre 2 «**Les capteurs photovoltaïques**». Beaucoup d'espoir sont mis dans les énergies renouvelables pour sortir des pièges climatiques. Mais les énergies renouvelables ne présentent que 0,4 % de la production énergétique mondiale.

L'énergie solaire est disponible partout sur terre. L'exploitation de l'énergie solaire peut se faire grâce à la technologie photovoltaïque.

Le chapitre 3 «**L'énergie éolienne**». En matière d'énergie éolienne, ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt. Ces vents trouvent leur origine dans les différences de température entre la terre et la mer.

Le chapitre 4 «**L'énergie hydraulique**». L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du soleil, comme beaucoup de sources d'énergie sur terre (le vent, la houle, la biomasse, les énergies fossiles...). Sous l'action du soleil, l'eau s'évapore des océans et les nuages se déplacent au gré des vents. L'énergie hydraulique est en fait cinétique dans le cas des cours d'eau, et potentielle dans le cas des chutes d'eaux.

Le chapitre 5 «**L'énergie géothermique**». 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.

Le chapitre 6 «**L'énergie de la 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. ».

Le dernier chapitre «**Le stockage d'énergies**». 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.

M. Anisse CHIALI

SOMMAIRE :

CHAPITRE I : DIFFÉRENTES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

I.	Ressources fossiles	1
I.1.	Formation du pétrole, du gaz naturel et du charbon	1
I.1.1.	Décomposition de la biomasse	1
I.1.2.	Formation et pyrolyse du kérogène	1
I.1.3.	Migration et accumulation en gisements des combustibles fossiles	2
II.	Ressources renouvelables	6
II.1	L'énergie	6
II.2.	Les différentes énergies renouvelables	6
II.2.1.	L'énergie solaire	6
II.2.2.	L'énergie hydraulique	10
II.2.3.	L'énergie éolienne	13
II.2.4.	La biomasse	14
II.2.5.	L'énergie de la Terre ou géothermie.	21
	Bibliographie	23

CHAPITRE II : LES CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES

I.	Le solaire photovoltaïque	26
I.1.	L'effet photovoltaïque	26
I.2.	Historique du photovoltaïque	26
II.	La cellule photovoltaïque	26
II.1.	Principe de fonctionnement	26
II.2	Modèle équivalent d'une cellule	27
II.3	Caractéristiques d'une cellule solaire	27
II.4.	Différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque	28
III.	Les différents types des cellules	29
III.1.	Les cellules en silicium monocristallin	30
III.2.	Les cellules en silicium poly cristallin	30
III.3.	Les cellules à couche mince	30
III.4.	Les cellules amorphes	30
III.5.	Les cellules multi-Jonctions	30
III.6.	Les principaux modules avec domaines d'applications	30
IV.	Influence de l'ensoleillement	30
IV.1.	Les performances d'une installation photovoltaïque	31
V.	Photovoltaïque raccordé au réseau électrique	32
V.1	Injection de la totalité de la production sur le réseau	32
V.2.	Onduleur	32
VI.3.	Répartition géographique de la capacité photovoltaïque cumulée	33
VII.	Les avantages d'une installation photovoltaïque	33
	Bibliographie	34

CHAPITRE III : L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

I.	L'origine de l'énergie éolienne	37
II.	Les différents types d'éolienne	37
II.1.	Les éoliennes à axe vertical	38
II.1.1.	L'éolienne de type Savonius	38
II.1.2.	L'éolienne de type Darrieus	39
II.2.	Les éoliennes à axe horizontal	39
II.3.	Les éoliennes de pompage	40
II.3.1	Éoliennes de pompage mécaniques	40
II.3.2.	Éoliennes de pompage électrique	40
III.	L'aérogénérateur	41
III.1.	Les composants d'un aérogénérateur	41
IV.	Évolution de la taille des éoliennes	44
V.	Fonctionnement d'une centrale éolienne	44
VI.	Généralité sur le vent	45
VI.1.	L'étude du vent	45
VI.2.	Les paramètres caractéristiques du vent	45
VI.3.	L'influence des obstacles sur la vitesse du vent	45
VI.4.	L'effet de colline	46
VI.5.	L'effet tunnel	46
VII.	Installations de grandes puissances	47
VII.1.	Fermes éoliennes	47
VII.2.	L'offshore	47
VII.3.	Coût des éoliennes	48
VII.3.4.	Exploitation de l'énergie éolienne	48
VII.4.	L'énergie éolienne dans le monde	49
	Bibliographie	51

CHAPITRE IV : L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

I.	Les barrages	53
II.	Types de barrages	53
II.1.	Barrage voûte	54
II.1.1.	Barrage à contreforts ou multi voûte	54
III.	Conception d'un barrage hydraulique	55
III.1.	Mode de fonctionnement d'une centrale hydraulique	55
III.2.	Choix du type de barrages	57
III.3.	Types des centrales hydroélectriques	57
III.3.1.	Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau	57
III.3.2.	Les différents types d'aménagements hydrauliques	58
III.3.2.1.	Les aménagements avec retenue	58
III.3.2.2.	Les aménagements "au fil de l'eau"	58
III.3.2.3.	Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	58
III.3.2.4.	Les différents types de turbines	59
III.3.3.	La taille des centrales hydrauliques	60
III.3.4.	Turbines hydrauliques	60
III.4.	Les générateurs	61
IV.	Coût de l'hydroélectricité	61
V.	L'énergie hydraulique en Algérie	61
VI.	Le futur de l'énergie hydroélectrique	62

VI.I	Avantages et inconvénients	62
	Bibliographie	65

CHAPITRE V : L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

I.	Historique	69
II.	Définition	70
II.1.	La structure interne du globe	70
II.2.	Origine de la chaleur	71
III.	Gisements géothermiques	71
III.1.	Définition	71
III.2.	Exploitation des ressources géothermales	72
IV.	Fonctionnement des centrales géothermiques	72
IV.1.	Usage thermique	73
IV.2.	Chauffage des habitats	74
IV.3.	Chauffage de bassins de pisciculture	74
IV.4.	Usages industriels de la géothermie	74
V.	Situation dans le monde	75
V.1.	Les ressources mondiales	76
V.2.	La géothermie en Algérie	76
VI.	Avantages et inconvénients de la géothermie	77
	Bibliographie	78

CHAPITRE VI : L'ÉNERGIE DE LA BIOMASSE

I.	Définition	81
II.	Les types de biomasse	81
II.1.	Le bois	81
II.2.	Le biocarburant	81
II.3.	Le biogaz	81
II.4.	La photosynthèse	82
III.	Sources de la biomasse	82
IV.	Propriétés de la biomasse	83
V.	Usage de la biomasse	83
IV.	Les compositions de la biomasse	84
VI.	La valorisation de la biomasse	84
VIII.	Les filières de la valorisation	84
V.	Situation dans le monde	75
	Bibliographie	86

CHAPITRE VII : STOCKAGE D'ÉNERGIES

PARTIE 1 : Technologies de stockage de l'énergie

I.	Définition et généralités sur le stockage d'énergie	88
II.	Stockage de l'électricité	88
II.1.	Stockage direct de l'électricité	89
II.2.	Stockage indirect de l'électricité	89
II.2.1.	Mode de stockage mécanique	89
II.2.2.	Mode de stockage chimique	91
II.2.3.	Stockage thermique « de la chaleur »	92

PARTIE 2 : Consommation, réserves et évolution des ressources d'énergies

I.	Consommation mondiale d'énergie	93
II.	Part des énergies dans la consommation mondiale	93
III.	Evolution de la demande énergétique mondiale	94
IV.	Evolution et perspectives de la production et la consommation d'énergie en Algérie.	84
IV.1	L'Algérie et le charbon	95
IV-2.	L'Algérie et le pétrole	95
IV-3.	L'Algérie et le gaz naturel	95
IV-4.	L'Algérie et l'énergie nucléaire	95
IV-5.	L'Algérie et les énergies renouvelables	95
IV-6.	Énergie éolienne en Algérie	96
IV-7.	Énergie solaire en Algérie	97
	Bibliographie	98

CHAPITRE I :

Différentes ressources énergétiques

CHAPITRE I : Différentes ressources énergétiques.

I. Ressources fossiles

Introduction

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...) [1]. Les besoins mondiaux en énergie ont augmenté de façon considérable au cours du vingtième siècle et le développement des pays émergents comme la Chine permet de prévoir une augmentation encore plus rapide dans les prochaines décennies. L'Agence Internationale de l'Énergie prévoit que la demande des vingt-cinq prochaines années nécessitera une production égale à celle des cent cinquante années d'exploitation des combustibles fossiles. Mais les ressources ne sont pas inépuisables : ces produits sont formés par une succession de mécanismes biologiques et géologiques qui mettent des millions d'années à s'accomplir, ces ressources ne sont donc pas renouvelables à une échelle de temps humaine [2].

I.1. Formation du pétrole, du gaz naturel et du charbon

I.1.1. Décomposition de la biomasse

Les êtres vivants sont constitués principalement de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène. Lorsqu'un être vivant meurt, sa matière organique est décomposée par l'activité microbiologique. Dans un milieu aérobie (où le dioxygène circule librement), tout le carbone est transformé en dioxyde de carbone [3]. On parle alors de « minéralisation totale ». En revanche, si la matière sédimente dans un milieu anaérobie (comme certains fonds marins par exemple), la minéralisation s'arrête dès que tout le dioxygène initialement présent a été consommé. La plus grande partie de la biomasse subit une minéralisation totale et seule une très faible partie, environ 1%, sédimente (voir la figure suivante). C'est cette fraction qui est à l'origine du pétrole, du gaz naturel et du charbon.

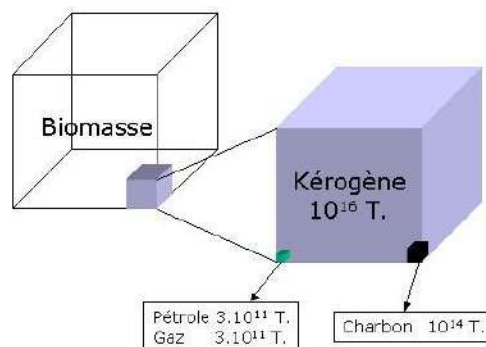


Figure N° 1 : Fraction de la biomasse transformée en combustibles fossiles [4]

I.1.2. Formation et pyrolyse du kérogène

En l'absence de dioxygène dans la couche sédimentaire, seule l'activité des bactéries anaérobies est possible. Ces bactéries extraient de la matière l'oxygène et l'azote dont elles ont besoin. Le résidu est appelé « kérogène », c'est un mélange de composés de masse moléculaire très élevée principalement constitué de carbone et d'hydrogène. Cette activité est observée sur une profondeur de l'ordre du millier de mètre au sein de la couche terrestre (voir la figure

suivante). Elle constitue la dernière partie biologique du cycle de transformation. La tectonique des plaques provoque l'enfoncement de la « roche mère », la couche sédimentaire qui contient le kérogène, à une vitesse de quelques mètres à quelques dizaines de mètres par million d'années. À mesure qu'il s'enfonce, le kérogène est soumis à des pressions et des températures de plus en plus élevées [5].

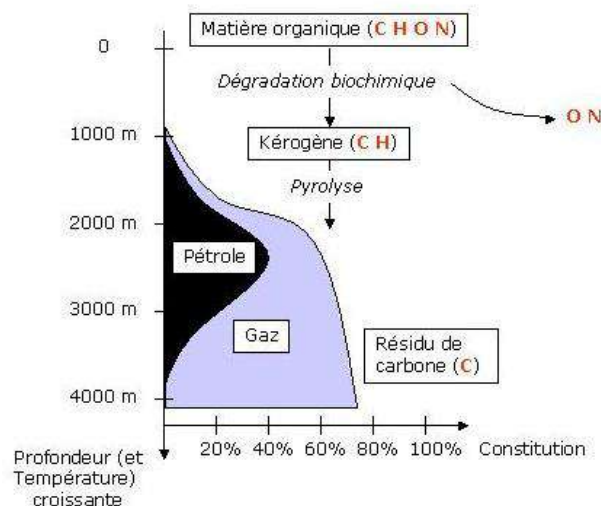


Figure N° 2 : Transformation de la matière organique [6]

À partir de quelques milliers de mètres de profondeur, lorsque la température a atteint une valeur suffisamment élevée (entre 50 et 120°C) et en l'absence d'oxygène, le kérogène commence à se décomposer sous l'effet de la chaleur. Cette pyrolyse produit principalement du pétrole, du gaz naturel, du dioxyde de carbone et de l'eau. La figure suivante montre l'allure de l'évolution du kérogène avec la profondeur d'enfouissement. Dans un premier temps, la formation de pétrole et de gaz est simultanée, puis celle de pétrole passe par un maximum et devient négligeable par rapport à la production de gaz.

1.1.3. Migration et accumulation en gisements des combustibles fossiles

Les produits de la pyrolyse du kérogène sont initialement prisonniers de la roche mère mais ils peuvent en être expulsés. Le mécanisme d'expulsion est encore inconnu, ce pourrait être par exemple l'apparition de microfissures au sein de la roche suite à l'augmentation de pression interne due à l'apparition des produits. Une fois expulsés, les produits progressent vers la surface. S'ils rencontrent sur leur trajet des roches poreuses (« roches réservoirs »), ils sont piégés dans les pores et forment un gisement en profondeur. Dans le cas contraire, ils parviendront à la surface. Les premiers gisements de pétrole connus de l'homme, en Mésopotamie durant l'antiquité, étaient de tels affleurements. Ils sont aujourd'hui épuisés et l'exploitation nécessite des forages en profondeur [7].

a) Nature des différents combustibles fossiles

- Le charbon

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

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

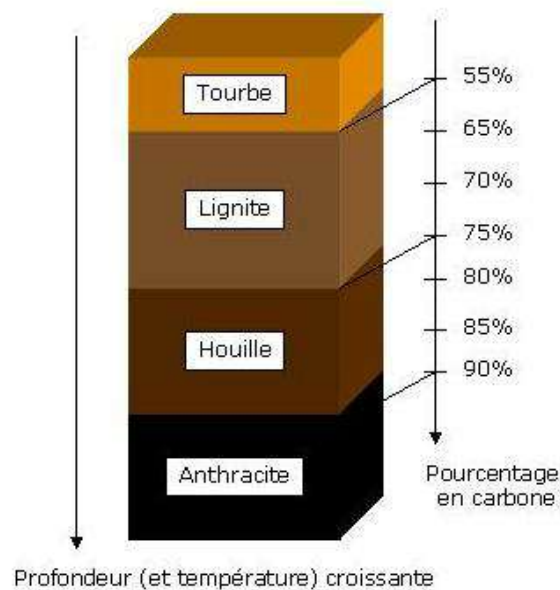


Figure N° 3 : Formation du charbon [8]

- Le pétrole

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



- Composition :
- 84 à 87 % de carbone
- 11 à 14 % d'hydrogène
- 0 à 3 % de soufre
- 0 à 1 % d'azote
- 0 à 3 % d'oxygène
- 0 à 1 % d'eau

Figure N° 4 : Composition du pétrole [9]

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

- Le gaz naturel

À grande profondeur, les hydrocarbures formés par pyrolyse peuvent subir des réactions de craquage. Ils sont alors transformés en alcanes de plus en plus légers, jusqu'au méthane CH_4 : le plus simple des alcanes et principal constituant du gaz naturel (70 à 95%) (Voir la figure suivante). D'un gisement à l'autre, on peut trouver des quantités variables en

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



Figure N° 5 : Constitution du gaz naturel brut [10]

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

b) Réserves mondiales

L'évaluation des réserves en combustible fossile est délicate. Il existe d'une part des facteurs politiques qui peuvent, pour des raisons stratégiques, amener les états ou les entreprises à majorer ou minorer les chiffres donnés [11]. D'autre part la notion même de réserve est complexe et évolue en fonction des progrès dans la connaissance géologique des bassins et des techniques d'exploitation. On classe les réserves en différents types :

- Réserves prouvées : ce sont les quantités de combustibles fossiles récupérables dans les conditions économiques et techniques du moment. Elles sont évaluées avec une probabilité d'existence de l'ordre de 90%.
- Réserves probables : ce sont les quantités de combustibles fossiles récupérables dans les conditions économiques et techniques du futur proche (techniques connues mais non-utilisées). Elles sont évaluées avec une probabilité d'existence de l'ordre de 50%.

- Réserves possibles : ce sont les quantités de combustibles fossiles récupérables dans les conditions économiques et techniques du futur (techniques encore inconnues).

La somme de ces réserves constitue ce qu'il est convenu d'appeler la réserve ultime.

La synthèse des diverses estimations permet de proposer le tableau et la figure suivants pour les réserves prouvées (source : WEA). La consommation mondiale pour l'année 1998 ainsi que la consommation cumulée de 1860 à 1998 sont données à titre de comparaison [12].

Pétrole	140 Gtep[a]	3,4 Gtep	123 Gtep
Gaz naturel	130 Gtep	2,0 Gtep	57 Gtep
Charbon	494 Gtep	2,2 Gtep	143 Gtep

[a] tep est l'acronyme pour tonne équivalent pétrole. C'est une des unités usuelles de mesure de l'énergie des combustibles fossiles. 1 tep = 42 GJ.

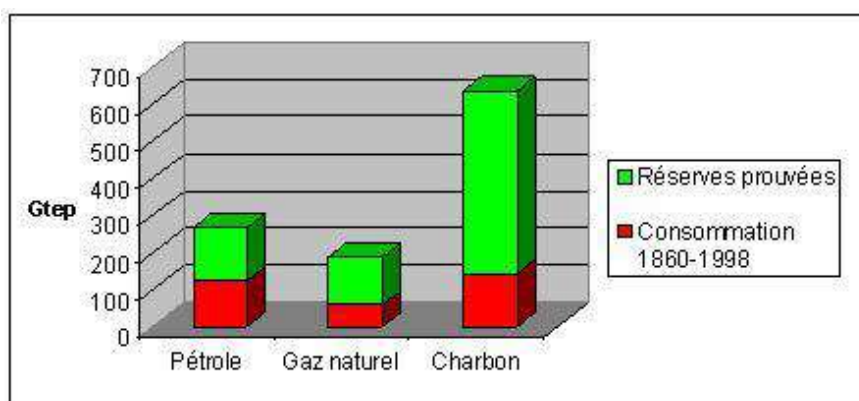


Figure N° 6: Combustible fossile Réserves prouvées Consommation mondiale en 1998 Consommation mondiale de 1860 [13]

Lorsque l'on prend en compte les réserves possibles, la quantité de pétrole disponible est doublée, celle de gaz naturel triplée et celle de charbon multipliée par dix. Mais même si on se place dans ce cadre, qui est le plus optimiste, on constate que les réserves de combustibles fossiles sont loin d'être inépuisables à l'échelle humaine [14]. Dans l'ensemble, les prévisions s'accordent sur un début de décroissance de la production mondiale de combustibles fossiles entre 2010 et 2050 et un épuisement des réserves ultimes au cours du prochain siècle [15].

Conclusion

L'étude de la composition chimique des combustibles fossiles a montré que ce sont des résidus de matière organique ayant subi des transformations chimiques étalées sur plusieurs millions d'années. Les prévisions s'accordent sur le fait que l'activité humaine aura en quelques centaines d'années épuisé les réserves constituées en des temps géologiques. Des scénarios plus ou moins optimistes sont envisagés : à l'heure actuelle, pour des raisons techniques, seul 35% du pétrole contenu d'un gisement peut en être extrait. Il reste donc des quantités considérables de matière non-exploitées dans les gisements connus et les progrès techniques permettront sans doute d'en tirer profit. Malgré cela, il est clair que le

développement de l'humanité ne saurait être durable [16] en ayant comme principale source d'énergie les combustibles fossiles. Il existe d'autres sources d'énergie, certaines sont inépuisables à l'échelle humaine (énergie solaire, énergie géothermique, fusion nucléaire), d'autres sont rapidement renouvelables (biomasse), mais leur exploitation est pour l'instant marginale par rapport à celle des combustibles fossiles. Le développement des énergies alternatives est un des principaux défis du futur proche.

II. Ressources renouvelables :

Introduction

La consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter, influencée par le développement technique, l'accroissement de la population et la croissance économique qui en résulte.

Ainsi le 20^{ième} siècle a vu la population mondiale multipliée par 4 et la consommation énergétique multipliée par 20 ! [17]

Au niveau mondial, environ 14% de l'énergie primaire (voir annexe 1) sont fournis par des énergies renouvelables.

Comment fonctionnent-elles ? Quels sont leurs intérêts et leurs limites ?

Pourquoi les développer ? Pourquoi en parle-t-on tant aujourd'hui ?

Avant cela, voici d'abord quelques précisions concernant l'énergie.

II.1 L'énergie

L'énergie est la capacité à fournir un travail.

Il existe 6 formes principales d'énergie :

- l'énergie thermique, ou chaleur.
- l'énergie électrique.
- l'énergie chimique (dans les carburants ou batteries, par exemple).
- l'énergie potentielle, due à la gravité.
- l'énergie cinétique, dans les objets en mouvement.
- l'énergie nucléaire.

L'unité de mesure de l'énergie est le *Joule*.

La puissance d'un système est l'énergie développée par ce système par unité de temps. Elle correspond donc à un débit d'énergie. Elle se mesure en watts (W).

1 Watt = 1Joule /seconde.

Pour mesurer l'énergie en terme de puissance, on utilise souvent les unités suivantes :

- le kilowattheure (kWh) : 1kWh = 3,6 MJ (Mégajoules).
- La *Tonne d'équivalent pétrole* (TEP) : 1 TEP = 42 GJ (Giga joules).

L'énergie est principalement utilisée pour la production d'électricité, la production de chaleur et le transport.

Le système énergétique est l'ensemble des opérations effectuées sur l'énergie, depuis sa source d'approvisionnement jusqu'à son utilisation par l'homme.

On distingue 4 niveaux d'énergie [18]:

- l'énergie primaire : celle disponible dans la nature (renouvelable ou non).

Exemples : pétrole brut sortant du puits, chute d'eau au pied d'un barrage, énergie lumineuse arrivant sur un capteur solaire,...

- l'énergie secondaire : celle obtenue après transformation de l'énergie primaire.
Exemples : l'électricité produite dans les centrales électriques, le carburant après raffinage du pétrole brut,...
- l'énergie finale : celle qui est transportée et distribuée à son utilisateur.
Exemple : l'essence dans le réservoir, le gaz naturel dans notre cuisinière,...
- l'énergie utile : celle juste nécessaire à la satisfaction du besoin.
Exemples : le déplacement en voiture, la cuisson des aliments, l'éclairage des pièces,...
- L'énergie utile ne représente qu'1/3 de l'énergie primaire mise en œuvre.
Deux tiers ont donc été perdus dans l'environnement (sous forme de chaleur).

La majeure partie de l'énergie primaire utilisée dans le monde provient de gisements de *combustibles fossiles* (charbon, pétrole, gaz) (80%) ou d'uranium (6,8%) (voir annexe 1). Ces gisements, constitués au cours de millions d'années, sont en quantité limitée et donc épuisables.

Les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, les océans, les marées, les végétaux, la chaleur de la Terre, n'ont pas de réserves limitées et se reforment constamment. Elles sont donc renouvelables.

La majorité de ces énergies renouvelables n'a en fait que deux sources : le soleil (qui est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, de la croissance des végétaux) et la Terre.

Par extension, on assimile souvent l'énergie tirée des déchets à une énergie renouvelable : on peut en effet considérer que l'activité humaine ou animale est perpétuelle, et donc source de déchets sans cesse renouvelés.

II.2. Les différentes énergies renouvelables

II.2.1. L'énergie solaire

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

Ajoutons que l'énergie solaire est l'énergie renouvelable la plus importante.

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

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

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

Le rayonnement solaire est intercepté par des capteurs. Ceux-ci sont constitués d'une surface plane absorbante en métal, dans laquelle sont serties des tubes où circule soit de l'air, soit de l'eau à réchauffer (dans les pays où il ne gèle pas), soit un liquide « caloporteur » (qui transférera sa chaleur à l'eau à travers un « échangeur »). La surface métallique est en général noircie pour absorber au maximum le rayonnement et en réémettre le moins possible. La plaque absorbante et ses tubes sont en général inclus dans un caisson vitré, de manière à emprisonner la chaleur dans ce caisson (effet de serre) [20].

L'eau ainsi chauffée peut être dirigée vers :

a) un ballon ou chauffe-eau:

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

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

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

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

Sous notre climat, la surface de capteurs nécessaires à un chauffe-eau est de 3 à 5m² pour une maison moyenne (4 personnes) [21].

b) un plancher chauffant:

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

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

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

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

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

L'énergie solaire thermique ne représente, à l'échelle mondiale, au début du 21^{ème} siècle, que 0,04 % de la consommation d'énergie [22].

B. L'énergie solaire convertie en électricité.

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

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

Elle est ensuite convertie en énergie mécanique, elle-même convertie en énergie électrique, suivant le même principe de fonctionnement que celui d'une centrale électrique thermique classique (voir annexe 4) :

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

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

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

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

Il existe différents types de centrales solaires se distinguant surtout par la manière dont les rayons solaires sont focalisés [23].

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

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

De plus, ces centrales nécessitent de grandes et plates surfaces de terrain. Il faut aussi que ces surfaces ne soient pas trop loin des réseaux électriques existants ou des zones de consommation [24].

B.2. Directement par effet photovoltaïque.

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

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

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

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

Des photopiles sont connectées en série. Ces séries de cellules sont montées en parallèle et intégrées entre deux feuilles de verre serties sur leur pourtour dans un cadre en aluminium ou en acier. Le tout forme un panneau rectangulaire : un module photovoltaïque [25].

Une installation peut en comprendre plusieurs.

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

L'énergie solaire étant intermittente, il faut pouvoir stocker l'énergie produite dans des batteries, ou être relié à un réseau de distribution électrique.

Avantage :

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

Inconvénients :

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

Les systèmes photovoltaïques sont principalement utilisés :

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

Ce marché est en pleine croissance depuis 20 ans [26].

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

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

Le rendement énergétique des cellules photovoltaïques est de 10 à 15% en pratique, et presque de 30% en labo [27].

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

II.2.2. L'énergie hydraulique.

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

A) L'énergie des rivières et des fleuves.

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

Cela nécessite :

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

La puissance de l'eau ($P=9,81QH$, Q étant le débit d'eau en mètres cubes/seconde, H étant la hauteur de chute en mètres) dépend du débit d'eau et de la hauteur de la chute. Pour une même puissance, une centrale hydraulique peut donc être alimentée soit par un faible débit tombant d'une grande hauteur de chute, soit par un débit important d'une faible hauteur.

On peut donc installer des centrales hydroélectriques :

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

Avantage :

- énergie non polluante.
- l'eau peut être stockée dans des réservoirs (ce qui n'est pas le cas du soleil et du vent)
- les centrales munies d'un réservoir peuvent s'adapter rapidement aux variations (pics horaires) de la demande en électricité : on ouvre les vannes quand il y a une pointe dans la demande en électricité.
(Les centrales thermiques, classiques ou nucléaires, n'ont ni cette rapidité, ni cette souplesse.)
- énergie rentable. Bien qu'elle soit coûteuse en investissement, elle l'est assez peu en fonctionnement et en maintenance
- grande longévité des équipements.
- haut rendement : 90%

Inconvénients :

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

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

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

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

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

Si l'Europe et l'Amérique du Nord ont déjà exploité environ 60% de leurs possibilités, l'Asie (20%), l'Amérique du Sud (20%) et l'Afrique (7%) sont très loin d'avoir exploité toutes les leurs [1].

Dans le monde, en 2005, l'hydroélectricité représentait 16,2% de la production totale d'électricité, mais seulement 2% de la production totale de l'énergie mondiale [28].

B) L'énergie des océans.

B.1. L'énergie des marées

Les marées sont une variation périodique du niveau de la mer, qui monte et qui descend. Elles sont provoquées par l'attraction exercée par le soleil et par la lune sur la masse des océans. Une période d'une demi-journée (exactement 12h25 min) sépare deux pleines mers consécutives ou deux basses mers consécutives [29].

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

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

- par des centrales marémotrices :

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

Avantage :

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

Inconvénient:

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

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

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

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

B.2. L'énergie des vagues :

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

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

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

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

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

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

B.3. L'énergie thermique des océans.

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

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

II.2.3. L'énergie éolienne.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Elle est aussi équipée d'un système qui permet de réguler sa vitesse, afin qu'elle ne s'emballer pas lorsque le vent est trop fort (voir annexe 5).

Il existe aussi des éoliennes à axe vertical.

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

Par contre, leur rendement est moindre.

Les éoliennes ont deux usages principaux :

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

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

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

Avantage :

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

Inconvénients :

- le vent est intermittent et on ne peut pas le stocker.
- des vents trop faibles ou trop forts ne sont pas exploitables.
- les sites les plus venteux sont souvent éloignés des endroits où l'électricité doit être consommée.

- les éoliennes sont souvent jugées inesthétiques.
- les éoliennes génèrent du bruit.
- les pales des éoliennes sont dangereuses pour les oiseaux, surtout migrateurs.

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

Des éoliennes sont aussi installées en mer : elles sont arrimées au fond des mers jusqu'à 50 mètres de profondeur et distantes de la côte de plusieurs kilomètres [30]. Elles peuvent ainsi profiter de vents plus forts et évitent les réticences environnementales.

II.2.4. La biomasse.

On entend par biomasse toute matière organique contenant de l'énergie emmagasinée sous forme d'énergie chimique, généralement au sein de composés de carbone. Elle s'obtient généralement à partir de bois, de fumier, de résidus de récoltes et d'ordures ménagères.

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

A) L'énergie des végétaux ou houille verte.

La houille verte est une énergie d'origine solaire, les plantes poussant grâce à la lumière du soleil et au processus de photosynthèse qui en résulte [31].

A.1. Utilisation du bois comme combustible.

Le bois est le principal combustible végétal.

Il peut être transformé en énergie par :

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

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

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

Ce procédé convient bien pour la production d'électricité.

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

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

- pour la production d'électricité : il alimente une chaudière dont la vapeur fait tourner une turbine, qui entraîne elle-même un générateur électrique. (C'est le principe de la centrale électrique, déjà développé précédemment).
Cela est intéressant dans l'industrie du bois ou du papier, générant de grandes quantités de résidus.
Des centrales électriques à bois existent cependant dans certains pays (principalement d'Amérique du Nord et d'Europe), mais la production d'électricité représente moins de 1% de la production électrique mondiale.

Avantage :

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

Inconvénients :

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

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

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

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

A.2. Production de biocarburants.

- Le bioéthanol (en substitution de l'essence) : alcool produit par fermentation des sucres contenus [32]:
 - soit dans des plantes riches en sucre (betteraves, topinambours, cannes à sucre, ...)
 - soit dans des plantes riches en amidon (pommes de terre, céréales,...)
 - soit dans des plantes ligneuses (bois, pailles,...)

On peut aussi produire un éther dérivé de l'éthanol : l'ETBE (ethyl-tertio-butyl-éther) [33].

Ces deux biocarburants peuvent être utilisés dans les moteurs, soit purs, soit à 85 %. Cela nécessite d'adapter les moteurs (surcoût faible : 200€) et les stations-service (coût important : 20000 à 40000 € par station) [34].

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

- Les biodiesels (en substitutions du gazole) :
Esters d'huiles obtenus par estérification d'huiles de colza, tournesol, palme, soja, arachide,... (Les huiles peuvent aussi être utilisées brutes, mais avec de moins bons résultats.)
Le plus prisé aujourd'hui est l'ester méthylique d'huile de colza.
Des taux variables d'incorporation d'ester dans le gazole ont été expérimentés (de 5 à 100 %).

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

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

Quant au biodiesel, l'Europe est la principale région du monde à avoir développé cette filière [35].

Avantage :

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

Inconvénients :

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

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

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

A.3. L'énergie des déchets

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

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

La fermentation est un processus biologique par lequel des bactéries décomposent des matières organiques. Elle conduit à la formation d'un biogaz, composé d'un mélange de gaz carbonique (inerte) et de méthane (inflammable), et d'un résidu. Le méthane est en fait le même gaz que le gaz naturel. Le résidu peut être utilisé comme engrais pour les sols [36].

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

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

- aux déchets d'élevage :
Il s'agit principalement des lisiers de porcs (mélange d'urines et d'excréments), des déjections bovines (bouses dans les prairies et fumier dans les étables) et des fientes de volailles.
La Chine et l'Inde utilisent cette ressource énergétique à grande échelle depuis des dizaines d'années.
- aux effluents industriels :
Principalement dans l'industrie agroalimentaire (brasseries, sucreries, distilleries d'alcool, laiteries) et les papeteries.
- aux boues des stations d'épuration urbaines :
Les eaux usées urbaines, après décantation, produisent en effet des boues.
- aux ordures ménagères :
Il s'agit des déchets humides, provenant de la cuisine ou du jardin.

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

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

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

Le biogaz peut être utilisé pour :

- produire de la chaleur :
C'est son utilisation la plus fréquente (malgré un manque de débouché en été). Son pouvoir calorifique est cependant moindre que celui des autres gaz (naturel, propane, butane).
- produire de l'électricité :
Mais c'est une solution très coûteuse (à cause des frais d'investissement et de maintenance des groupes électrogènes).
- comme carburant :
Le biogaz, une fois épuré de son CO₂, de son eau et de son H₂S, est quasi identique au gaz naturel pour véhicules.
Il en a les avantages et inconvénients, à savoir : faible pollution de l'air, faible bruit, mais autonomie réduite (car volumineux).
C'est un carburant idéal pour les transports urbains.
- être réinjecté dans les réseaux de gaz naturel :

Cela nécessite l'épuration préalable du biogaz.

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

A.5. L'incinération des déchets.

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

L'incinération des ordures ménagères a pour but premier d'éliminer les déchets. En Europe, chaque habitant « produit » environ 1 kilo d'ordures ménagères par jour (le double en Amérique du Nord). 70% de ces déchets sont combustibles : papiers, cartons, déchets putrescibles de cuisine ou de jardin et plastiques. Par contre le verre et les métaux ne le sont pas [37].

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

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

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

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

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

Le rendement est de l'ordre de 25%.

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

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

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

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

D'autres déchets sont intéressants à incinérer :

- la paille (de blé, maïs, riz) :

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

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

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

Son pouvoir calorifique équivaut aussi à celui du bois.

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

- les fientes des poulaillers.

II.2.5. L'énergie de la Terre ou géothermie.

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

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

Ce que l'on va exploiter, c'est la chaleur accumulée dans certaines parties du sous-sol, en général dans des nappes d'eau souterraines [38].

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

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

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

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

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

A) la géothermie « basse énergie » (→chauffage)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les gisements de vapeur sèche sont extrêmement rares.

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

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

Avantage :

- énergie peu polluante.
- coûts de fonctionnement bas.

Inconvénients :

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

Références bibliographiques

- [1] Flavin C, O Meara M. Financing solar electricity. *World Watch* 1997;10(3):261–74.
- [2] Ricardo Guerrero-Lemus, Jose' Manuel Martinez-Duart. *Renewable Energies and CO2* (2012 Edition). pp 9-31
- [3] The clouds of unknowing. *The Economist*; 2010.
- [4] Pan Y. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 2011;333:988–93.
- [5] Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce; 2005.
- [6] Demirbas A. Recent advances in biomass conversion technologies. *Energy Educ Sci Technol* 2000;6:19–40.
- [7] Rathore NS, Panwar NL. *Renewable energy sources for sustainable development*. New Delhi, India: New India Publishing Agency; 1996.
- [8] Panwara NL, Kaushik SC, Kothari Surendra. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1513–24.
- [9] Reddy AKN, Subramanian DK. *The design of rural energy centers, 2*. Bangalore: Indian Academy of Science; 1980. p. 109–30.
- [10] Ravindranath NH, Hall DO. *Biomass, energy, and environment: a developing country perspective from India*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press; 1995.
- [11] REN21. *Renewable energy Policy Network for the 21st century. Renewables 2014. Global Status Report*; 2016.
- [12] UNDP. *World energy assessment 2000—energy and the challenge of sustainability*. New York: UNDP; 2000 (ISBN 9211261260).
- [13] FS-UNEP Collaboration Center, Frankfurt School. *Global trends in renewable energy investments*; 2016.
- [14] EIA Annual Report 2014. *USEnergy information Administration (EIA)*; 2014.
- [15] IRENA, *roadmap for a renewable energy future*; 2016 edition.
- [16] Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renew Sustain Energy Rev* 2000;4(2):157–75.
- [17] Sharma A, Chen CR, Lan NV. Solar-energy drying systems: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;13(6–7):1185–210.
- [18] Okoro OI, Madueme TC. Solar energy: a necessary investment in a developing economy. *Int J Sustain Energy* 2006;25(1):23–31.
- [19] Kumar A, Kandpal TC. Potential and cost of CO2 emissions mitigation by using solar photovoltaic pumps in India. *Int J Sustain Energy* 2007;26(3):159–66.
- [20] Kralova I, Sjoblom J. Biofuels-renewable energy sources: a review. *J Dispers Sci Technol* 2010;31(3):409–25.
- [21] Iordente L, Alvarez JL A', Blanco D. Performance model for parabolic trough solar thermal power with thermal storage: comparison to operating plant data. *Sol Energy* 2011;85:2443–60.
- [22] Gaudiosi G. Offshore wind energy prospects. *Renew Energy* 1999;16(1–4):828–34.
- [23] Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2002;6:3–65.
- [24] Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA, et al. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 2006;311(5760):484–9.
- [25] Wydrzynski TJ, Satoh K. (editors). *Photosystem II: The Light-Driven Water: Plastoquinone Oxidoreductase*, *Advances in Photosynthesis and Respiration*; 2006; 87. p. 331–5.
- [26] International Energy Agency. *Renewables in global energy supply. An IEA facts sheet* OECD; 2007.
- [27] J. Crus Ed. *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. Springer: Berlin; 2008
- [28] Vining JG, Muetze A. *Economic factors and incentives for ocean wave energy*

- conversion. IEEE Trans Ind Appl 2009;45(2):547–54.
- [29] Takahashi P, Trenka A. Ocean thermal energy conversion. New York: Wiley; 1996.
- [30] Pelc Robin, Fujita Rod M. Renewable energy from the ocean. Mar Policy 2002;26:471–9.
- [31] Gareth P, Harrison , Robin Wallace A. Climate sensitivity of marine energy. Renew Energy 2005;30:1801–17.
- [32] Shields a Mark A, Woolf DK. The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment Ocean & coastal management. Mar Renew Energy 2011;54:2–9.
- [33] Boehlert Gorge W, Gi l l An drew B. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development. Oceanography 2010;23(2):68–81.
- [34] Wright Glen. Marine governance in an industrialized ocean: a case study of the emerging marine renewable energy industry. Mar Policy 2015;52:77–84.
- [35] Kerr Sandy, Colton John, Johnson Kate, Wright Glen. Rights and ownership in sea country: implications of marine renewable energy for indigenous and local communities. Mar Policy 2015;52:108–15.
- [36] Quirapas Ann Joy Robles, Lin Htet. Ocean renewable energy in Southeast Asia: a review. Renew Sustain Energy Rev 2015;41:799–817.
- [37] Lewis A, Estefen S, Huckerby J, Musial W, Pontes T, Torres-Martinez J. Ocean energy. IPCC Spec Rep Renew Sources Clim Change Mitig 2011, [chapter 6].
- [38] OES, Annual report on implementing agreement on ocean energy systems; 2014
- [39] Clement Alain, Cullen Pat Mc. Wave energy in Europe: current status and perspectives. Renew Sustain Energy Rev 2002;6:405–31.
- [40] Titah-Benbouzid Hosna, Benbouzid Mohamed. IEEE Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), France:338–342; 2014.

CHAPITRE II :

Les capteurs photovoltaïques

CHAPITRE II : Les capteurs photovoltaïques

Introduction

Beaucoup d'espoir sont mis dans les énergies renouvelables pour sortir des pièges climatiques. Mais les énergies renouvelables ne présentent que 0,4 % de la production énergétique mondiale [1].

L'énergie solaire est disponible partout sur terre. Notre planète reçoit 15000 fois l'énergie consommée par l'humanité [2].

L'exploitation de l'énergie solaire peut se faire grâce à la technologie photovoltaïque.

I. Le solaire photovoltaïque

I.1. L'effet photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein d'un matériau semi conducteur comme le silicium.

Ces matériaux photosensible ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque [3].

I.2. Historique du photovoltaïque

Le mot «photovoltaïque» vient du grec « phôtos » qui signifie **lumière** et de « volta » du **nom** du physicien italien.

Mais c'est le savant français Antoine Becquerel, qui le premier, en 1839 mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie [4].

A partir de 1960, les premiers générateurs solaires photovoltaïques sont implantés sur les satellites, qui depuis utilisent quasiment exclusivement cette énergie.

En 1970, les premières applications solaires photovoltaïques terrestres alimentent des émetteurs isolés.

Début 1980, des maisons équipées en panneaux solaires photovoltaïques et des électrifications rurales sont réalisées. Ces électrifications se développent depuis 1990 et concernent en 2002 plus d'un million de maisons individuelles [5].

A partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

II. La cellule photovoltaïque

Elle met en jeu trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés:

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergies des photons aux charges électriques.
- la collecte des charges.

La cellule de base pour cette conversion est appelée cellule solaire ou photovoltaïque

II.1. Principe de fonctionnement

Les cellules photovoltaïques sont des petits composants électroniques à base de silicium.

En effet, elles génèrent une tension entre 0,4 et 0,6 V. Donc, il faut toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [6].

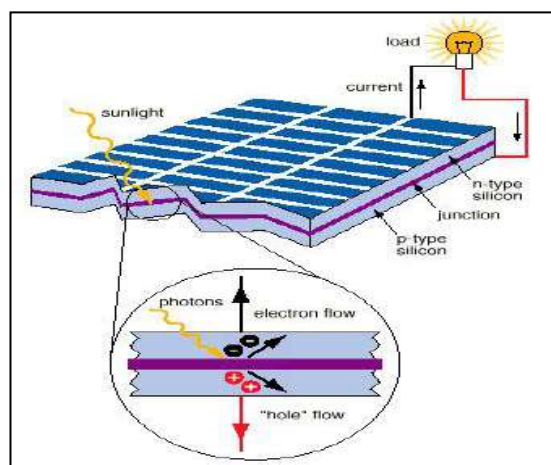


Figure N° 1 : La cellule photovoltaïque [7]

II.2. Modèle équivalent d'une cellule

Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis, d'autres passent au travers la cellule et certains sont absorbés;

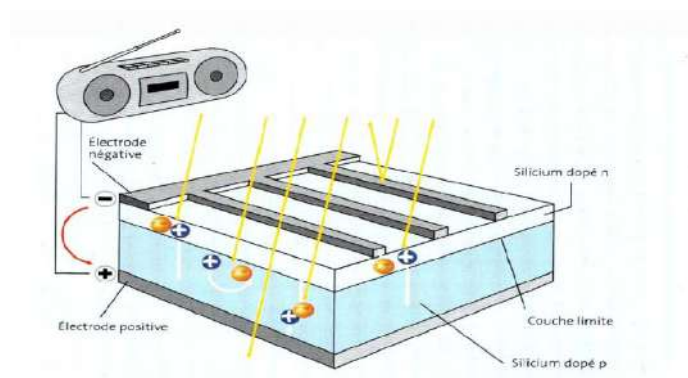


Figure N° 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8]

L'éclairement par le soleil du matériau silicium engendre la création de plusieurs paires électrons-trous.

Ces charges sont ensuite séparées par le champ électrique au niveau de la jonction PN, puis se dirigent vers les contacts électriques correspondants.

Un courant électrique circule alors dans un dispositif (ampoule, moteur...) connecté aux bornes de la cellule.

II.3. Caractéristiques d'une cellule solaire

Les cellules photovoltaïques absorbent le rayonnement solaire et le transforment directement en courant électrique continu.

Ce courant continu est ensuite transformé en courant alternatif, de 220 volts (identique à celui du réseau) grâce à un onduleur. L'électricité ainsi produite est alors injectée dans le réseau public d'électricité.

Un compteur personnel permet de mesurer la production annuelle d'électricité. Les revenus de cette production sont perçus en retour.

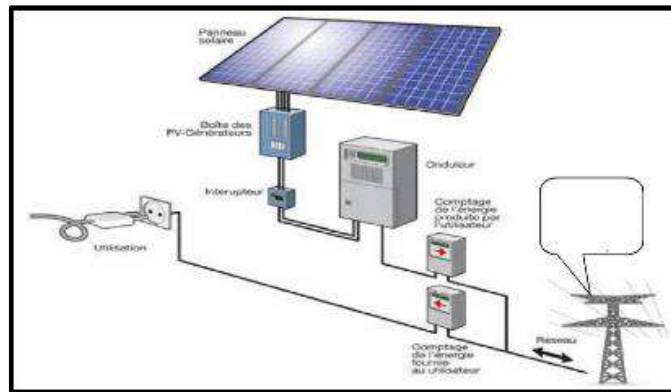


Figure N° 3 : Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque [9]

Pour tout calcul d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique en extérieur, on utilisera la valeur moyenne du rayonnement global reçu pendant une journée, et cela en fonction:

- Du lieu géographique;
- Du mois de l'année;
- De l'orientation (sud, sud-est, nord...);
- De l'inclinaison (angle du panneau: vertical, horizontal).

Le Rayonnement global = rayonnement instantané multiplié par le temps

II.4. Différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque



Figure N° 4 : Étapes de production d'un système photovoltaïque [10]

III. Les différents types des cellules

III.1. Les cellules en silicium monocristallin

- Un rendement compris entre 12 et 20 %

- La surface nécessaire pour obtenir 1 kWc est de 7 à 9 m²
- Elles sont élaborées à partir d'un seul cristal.
- Les cellules sont rondes ou presque carrées.
- Elles ont une couleur uniforme.
- La méthode de production reste laborieuse avec un coût élevé.

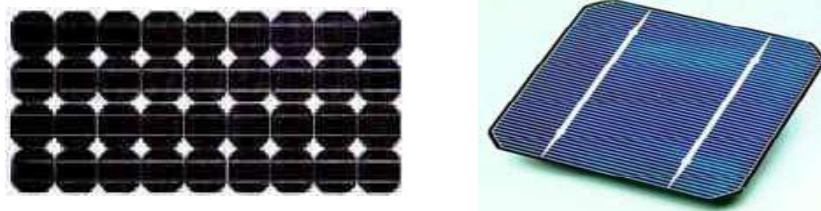


Figure N° 5: Cellules en silicium monocristallin [11]

III.2. Les cellules en silicium poly cristallin

- Les cellules poly cristallines ont un rendement compris entre 11 et 15% et la surface nécessaire pour obtenir 1 kWc est de 8 à 9 m² [12].
- Elles ont un meilleur rapport qualité/prix et sont les plus utilisés.
- Elles ont une bonne durée de vie (plus de 35 ans).

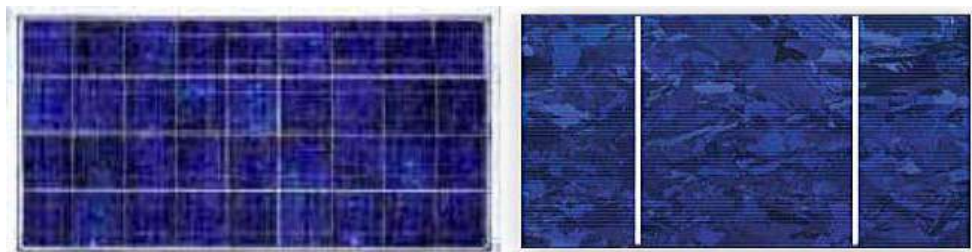


Figure N° 6 : Cellules en silicium poly cristallin [13]

III.3. Les cellules à couche mince

Les cellules à couche mince ont un rendement compris entre 6 et 8 % et la surface nécessaire pour obtenir 1 kWc est de 11 à 13 m².



Figure N° 7: Cellules à couches minces [14]

III.4. Les cellules amorphes :

Les cellules amorphes ont un rendement compris entre 5 et 9 % et la surface nécessaire pour obtenir 1 kWc est de 16 à 20 m².

- Elles sont caractérisées par une meilleure production par faible lumière.



Figure N° 8 : Cellules en silicium amorphes [15]

III.5. Les cellules multi-Jonctions

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épithaxie par jet moléculaire [16].

III.6. Les principaux modules avec domaines d'applications



Figure N° 9: Principaux modules photovoltaïques [17]

IV. Influence de l'ensoleillement :

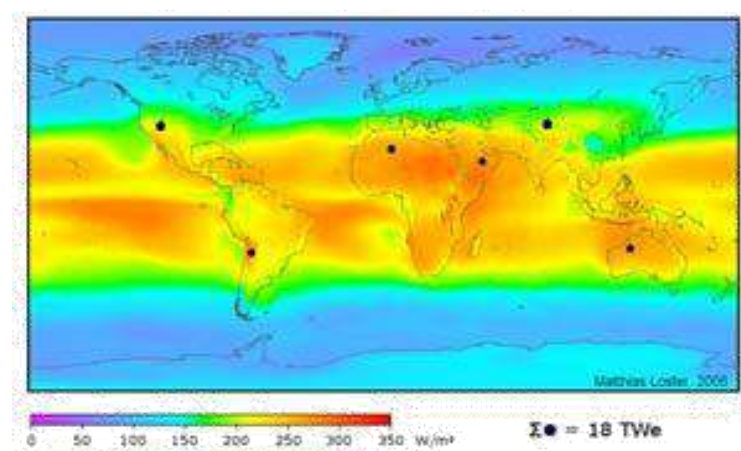


Figure N° 10: Carte géographique de l'ensoleillement (Atlas solaire mondial) [18]

IV.1. Les performances d'une installation photovoltaïque

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent :

- De l'orientation des panneaux solaires,
- Des zones d'ensoleillement dans lesquelles on se trouve.

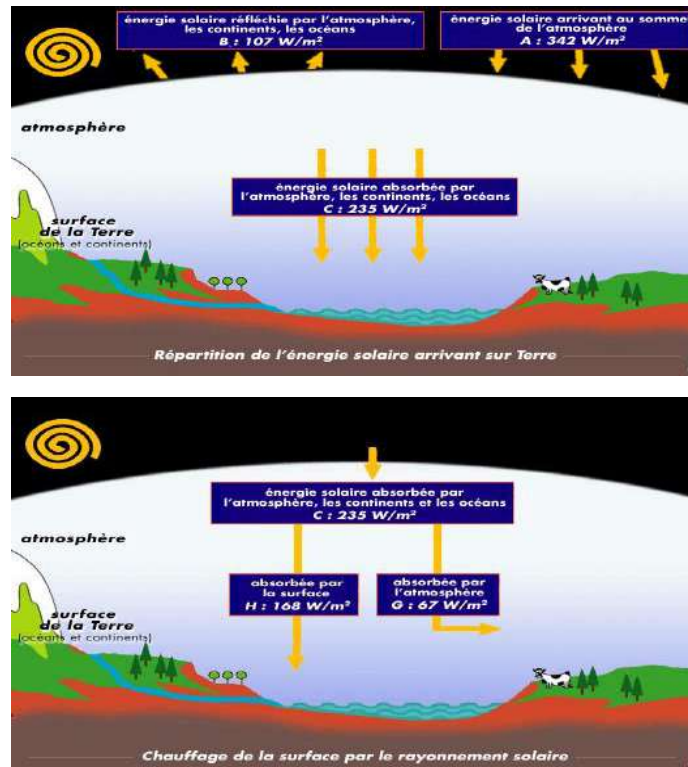


Figure N° 11: Énergie solaire arrivant sur terre [19]

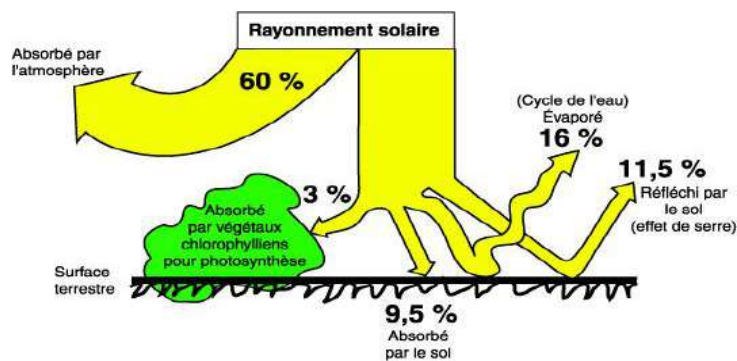


Figure N° 12 : Répartition du rayonnement solaire [20]

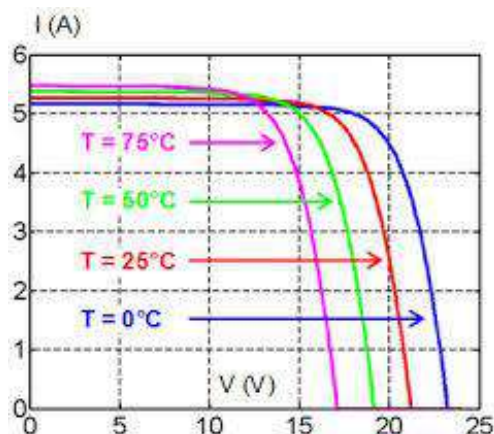


Figure N° 13 : Influence de l'éclairement et de la température sur une cellule [21]

V. Photovoltaïque raccordé au réseau électrique

Le raccordement au réseau est la technique d'injection de l'électricité produite par l'installation photovoltaïque au réseau électrique extérieur. Le bâtiment, autrefois enveloppe passive, devient actif et producteur d'énergie [22].



Figure N° 14: Exemple de structures photovoltaïques intégrées au bâtiment (façade) [23]

V.1. Injection de la totalité de la production sur le réseau

Un point de branchement spécifique à la production est alors créé par l'opérateur. Toute la consommation est par ailleurs comptabilisée par le compteur [24].

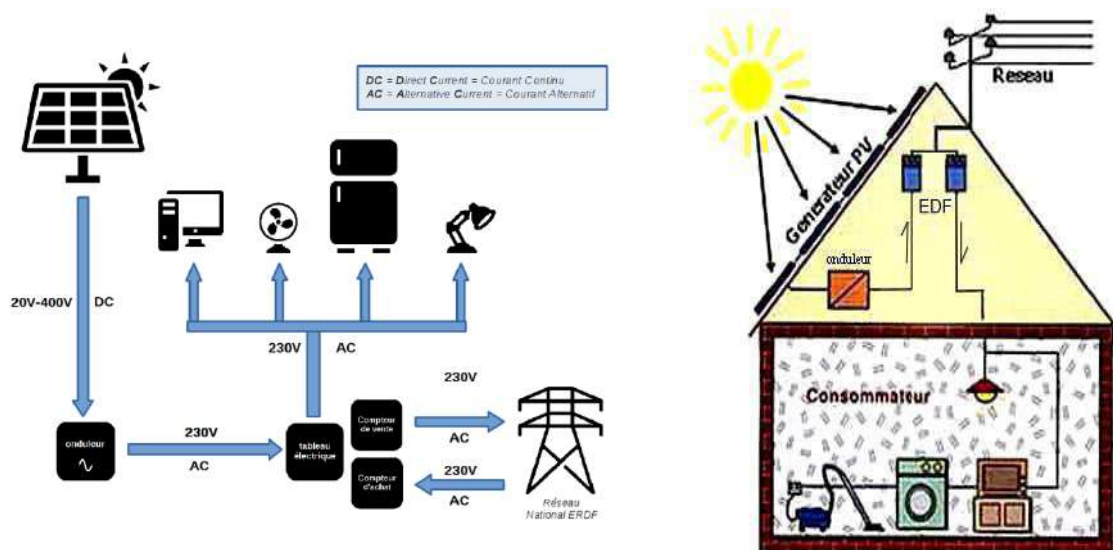


Figure N° 15 : Système photovoltaïque raccordé au réseau [25].

V.2. Onduleur

L'onduleur convertit le courant continu des capteurs photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau.

Il assure également la sécurité et celle des dépanneurs en arrêtant la production de courant en cas d'incident sur le réseau (coupure d'électricité sur le réseau). Il se fixe sur un mur, près des capteurs. Il est peu bruyant et n'émet pas de parasites électromagnétiques [26].

VI.3. Répartition géographique de la capacité photovoltaïque cumulée

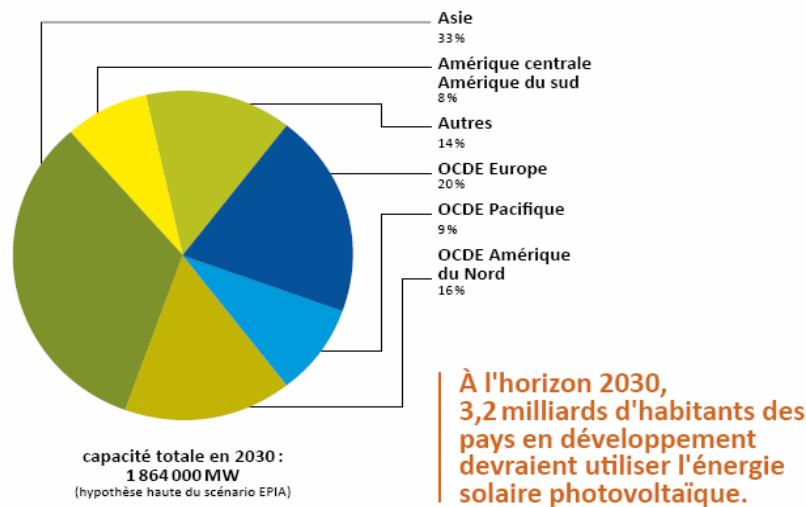


Figure N° 16: Répartition géographique de la capacité photovoltaïque cumulée [27]

En 2009, la Chine est devenue le premier producteur de cellules solaires avec une production annuelle d'environ 2,4 GW [28]. Si cette tendance se poursuit, la Chine pourrait avoir environ 40% de la capacité mondiale de production d'ici 2020 [29].

Selon La Commission européenne, la production de l'énergie photovoltaïque (PV) dans le monde a augmenté à environ 7,3 GW en 2008, selon une hausse de 80% par rapport à l'année précédente.

VII. Les avantages d'une installation photovoltaïque

L'installation d'un système photovoltaïque peut être qualifié de :

- **Rentable** : l'électricité est vendue à un tarif très avantageux : 5 fois plus cher que le tarif standard (tarif de vente garanti pendant 20 ans)
- **Fiable** : une installation a une durée de vie de 25 ans, avec une productivité garantie pendant 20 ans, c'est un placement avec un retour sur investissement assuré.
- **Ecologique** : en devenant producteur d'électricité verte, on réduit les émissions de CO₂.

Conclusion

Actuellement, des milliers de systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité pour des applications telles que l'électrification rurale, l'électrification en zone urbaine, le traitement de l'eau, les équipements publics [30].

Ces réalisations ont mis en valeur les qualités de l'électricité solaire photovoltaïque. Son autonomie, son influence faible sur l'environnement, son coût souvent compétitif ont rendu son utilisation particulièrement fréquente sur des sites isolés [31].

Bibliographie :

- [01] Alberdi M, Amundarain M, Garrido AJ, Garrido I, Maseda FJ. Fault-ride-through capability of oscillating-water-column-based wave power- generation plants equipped with doubly fed induction generator and airflow control. *IEEE Trans Ind Electron* 2011;58(5):1501–17.
- [02] International Renewable Energy Agency, Ocean Energy Technology readiness, patents, Deployment status and outlook, Report; 2014.
- [03] Bryden Ian G, Scott , Couch J. ME1—marine energy extraction: tidal resource analysis. *Renew Energy* 2006;31:133–9.
- [04] Leaman KD, Molinari RL, Vertes PS. Structure and variability of the Florida current at 27A°N. *J Phys Oceanogr* 1978;17(5):565–83.
- [05] Hammons TJ. Tidal power modeling the operation and maintenance costs of a large scale tidal current turbine farm. *Proc IEEE* 1993;89(3):419–33.
- [06] Woolf DK, Cotton PD, Challenor PG. Measurements of the offshore wave climate around the British Isles by satellite altimeter. *Philos Trans: Math Phys Eng Sci* 2003;361:27–31.
- [07] Bahaj AS, Myers LE. Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production. *Renew Energy* 2003;28:2205–11.
- [08] Fraenkel PL, Clutterbuck P, Stjernstrom B, Bard J. *Proc 3rd European Wave Energy Conference Incorporating Waves, Tidal and Marine Currents*; 1998
- [09] Fraenkel PL. Tidal currents A major new source of energy for the Millenium EEZ Technology, 4th ed.. London: ICG Publishing Ltd; 1999.
- [10] Bryden IG, Naik S, Fraenkel P, Bullen CR. Matching tidal current plants to local flow conditions. *Energy* 1998;23(9), [699-09].
- [11] Scramesto OS, Skilhagen S-E, Nielsen WK. Power production based on osmotic pressure. In: *Waterpower XVI*, Spokane, WA, USA; 2009.
- [12] Van den Ende, K., F. Groeman. *Blue Energy*. Leonardo Energy, KEMA Consulting, Arnhem, The Netherlands; 2007
- [13] Loeb S, Norman RS. Osmotic power plants. *Science* 1975;189(4203):654–5.
- [14] International Renewable Energy Agency, Salinity Gradient Energy, Technology brief, Report; 2014.
- [15] Stenzel P. Potentials of the osmosis for generating and storing of electricity. *Energy Sustain* 2012;4(978):643–50.
- [16] Kim NJ, Ng KC, Chun W. Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion [OTEC]. *Int Commun Heat Mass Transf* 2009;36:1008–13.
- [17] Yuan Han, Mei Ning, Zhou Peilin. Performance analysis of an absorption power cycle for ocean thermal energy conversion. *Energy Convers Manag* 2014;87:199–207.
- [18] International Renewable Energy Agency, Ocean Thermal Energy Conversion, Technical brief; 2014.
- [19] US Department of Energy. International energy outlook 2002 Report #: DOE/ EIA-0484(2002); 2002
- [20] Muller-Steinhagen H, Trieb F. Concentrating solar power: a review of the technology. *Ingenia* 2014;18:43–50.
- [21] Greenpeace, Solar thermal electricity global outlook; 2016.
- [22] IEA-ETSAP and IRENA, technology brief, concentrating solar power; 2013
- [23] IRENA, Renewable energy technologies: cost analysis series, concentrating solar power; 2012.

- [24] Barlev David, Vidu Ruxandra, Stroeve Pieter. Innovation in concentrated solar power: review. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2011;95:2703–25.
- [25] Zhang HL, Baeyens J, Degreve J, Caceres G. Concentrated solar power plants: review and design methodology. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:466–81.
- [26] Iordache L, Alvarez A, Blanco D JL. Performance model for parabolic trough solar thermal power with thermal storage: comparison to operating plant data. *Sol Energy* 2011;85:2443–60.
- [27] Barlev D, Vidu R, Stroeve P. Innovation in concentrated solar power. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2011;95(10):2703–25.
- [28] Fernandes D, Pitie F, Caceres G, Baeyens J. Thermal energy storage how previous findings determine current research priorities. *Energy* 2012;39(1):246–57.
- [29] Mousazadeh H. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(8):1800–18.
- [30] Liu QB. Experimental investigation on a parabolic trough solar collector for thermal power generation. *Sci China-Technol Sci* 2010;53(1):52–6.
- [31] Paxson. Design and Validation of an Air Window for a Molten Salt Solar Thermal Receiver. SB Thesis MIT; 2009.

CHAPITRE III :

L'énergie éolienne

CHAPITRE III : L'énergie éolienne

I. L'origine de l'énergie éolienne

Environ 1 à 2% de l'énergie émise par le soleil est convertie en énergie éolienne. En matière d'énergie éolienne, ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt (- de 100m d'altitude). Ces vents trouvent leur origine dans les différences de température entre la terre et la mer [1].

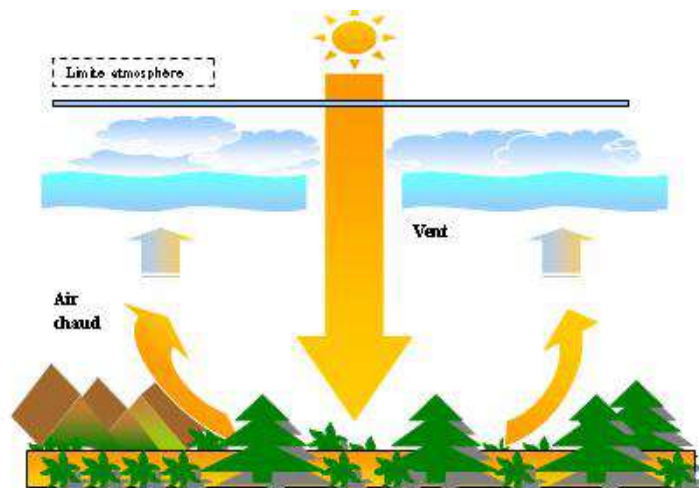


Figure N° 1 : Origine de des vents

II. Les différents types d'éolienne :

On distingue deux grands types d'éolienne : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [2].

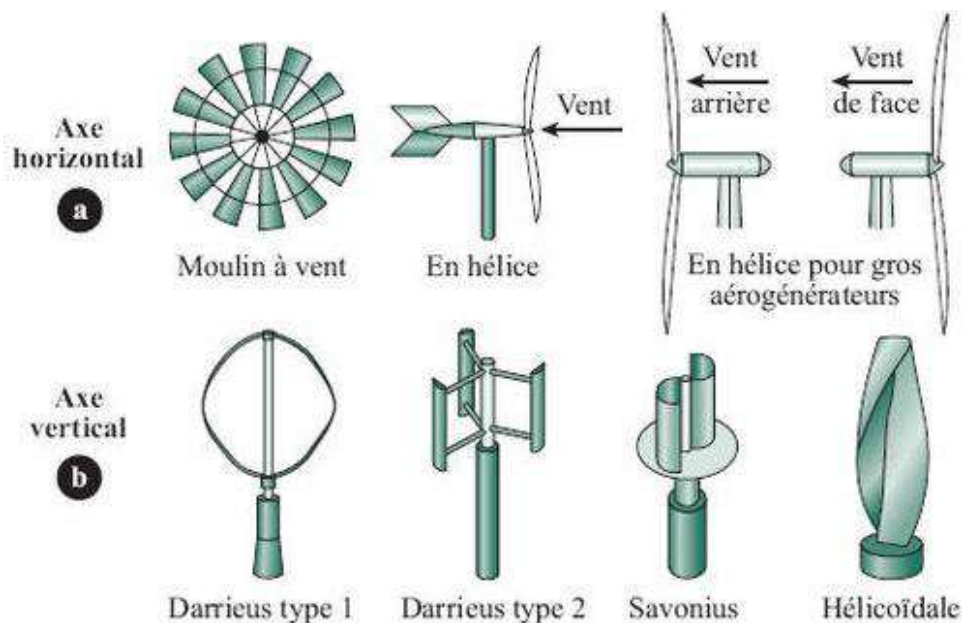


Figure N° 2 : Différentes formes d'éoliennes [3].

II.1. Les éoliennes à axe vertical :

II.1.1. L'éolienne de type Savonius :

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble [4].

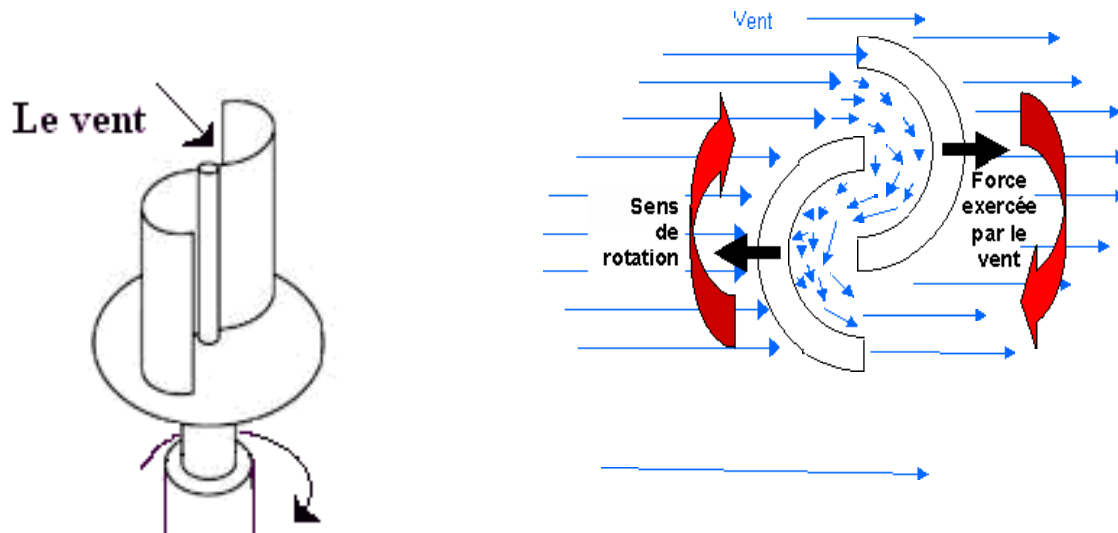


Figure N° 3 : Principe de la traînée différentielle des modèles de type Savonius à trois pales [5].



Figure N° 4: Eolienne Savonius à 3 pales [6].

Avantages et inconvénients d'une éolienne de type Savonius :

Avantages

1. Démarrage à des faibles vitesses de vent
2. Pas de contraintes sur la direction du vent.
3. Intégrable au bâtiment.
4. Faible encombrement
5. Système peu bruyant

Inconvénients :

1. Faible rendement
2. Masse non négligeable

II.1.2. L'éolienne de type Darius :

Il est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [7].



Figure N° 5 : Eolienne Darrieus à 2 pales. **Figure N° 6 :** Eolienne Darrieus à 3 pales.

Avantages et inconvénients d'une éolienne de type Darrieus :

Avantage :

- Intégrable au bâtiment
- Génératrice pouvant placée au sol
- Moins d'encombrement

Inconvénients :

- Démarrage difficile
- Faible rendement

II.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamique.

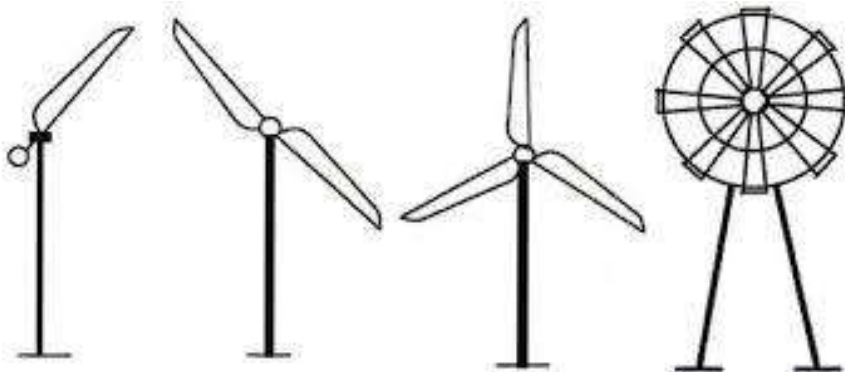


Figure N° 7 : Eoliennes à axe horizontal [8]

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

II.3. Les éoliennes de pompage :

II.3.1. Éoliennes de pompage mécaniques :

L'éolienne de pompage mécanique utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor qui transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits.

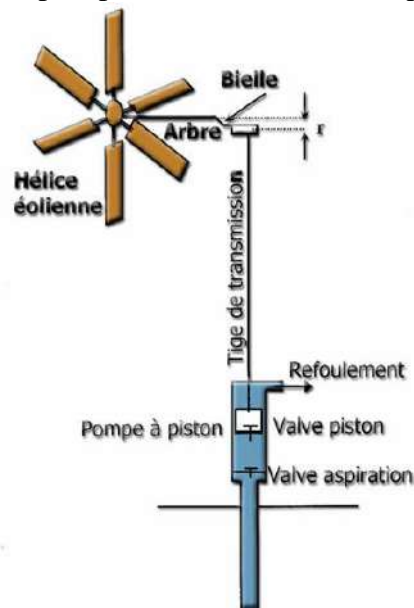


Figure N° 8 : Schéma d'une éolienne de pompage mécanique [9].

II.3.2. Éoliennes de pompage électrique :

Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source.

L'avantage d'une transmission électrique ou pneumatique réside dans le fait que l'éolienne ne doit pas se trouver au-dessus du puits.

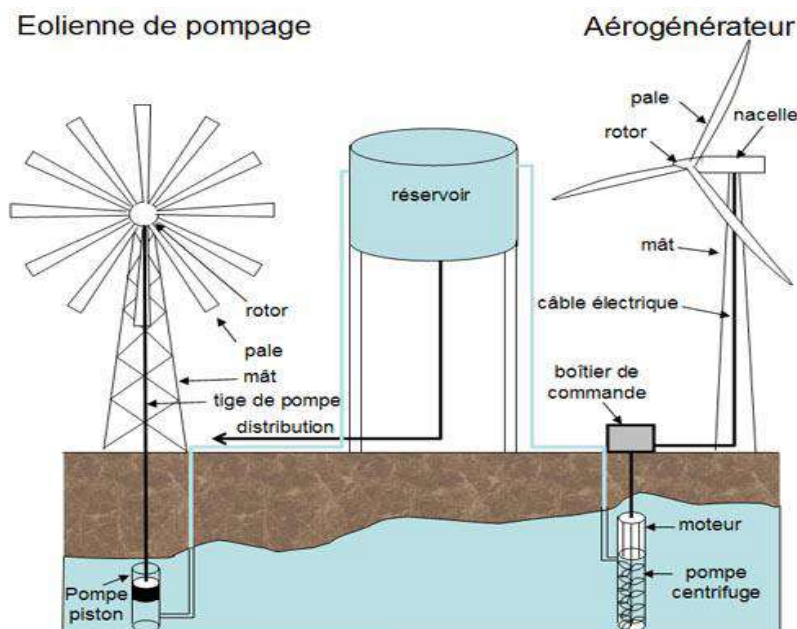


Figure N° 9: Les éoliennes de pompage [10]

III. L'aérogénérateur :

III.1. Les composants d'un aérogénérateur :

- Le rotor
- La nacelle
- Une génératrice électrique
- La transmission mécanique
- Un système d'orientation
- Un système électrique
- Une tour

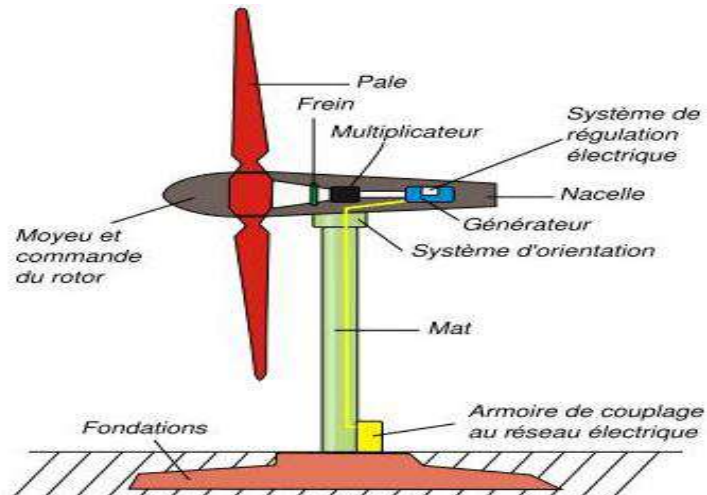


Figure N° 10 : Vue d'ensemble d'un aérogénérateur [11].

a) **Le Rotor de l'aérogénérateur** : Le rotor est constitué de 1 à 3 pales et est relié à la nacelle par son moyeu. Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

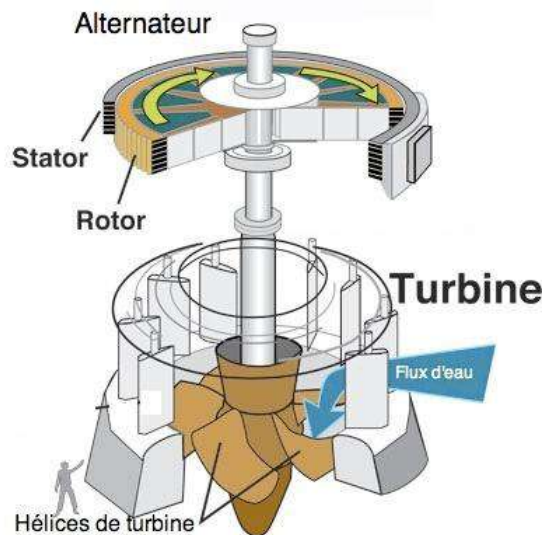


Figure N° 11: Le rotor d'un aérogénérateur [12]

b) la pale : Elle transfère la puissance du vent au moyeu du rotor. Elle peut varier de 8 pour les plus lentes à 30 mètres pour les plus rapides.

Figure N° 12: Une pale d'un aérogénérateur.



c) Le moyeu : Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément.



Figure N° 13: un moyeu lors de son assemblage avec l'arbre.

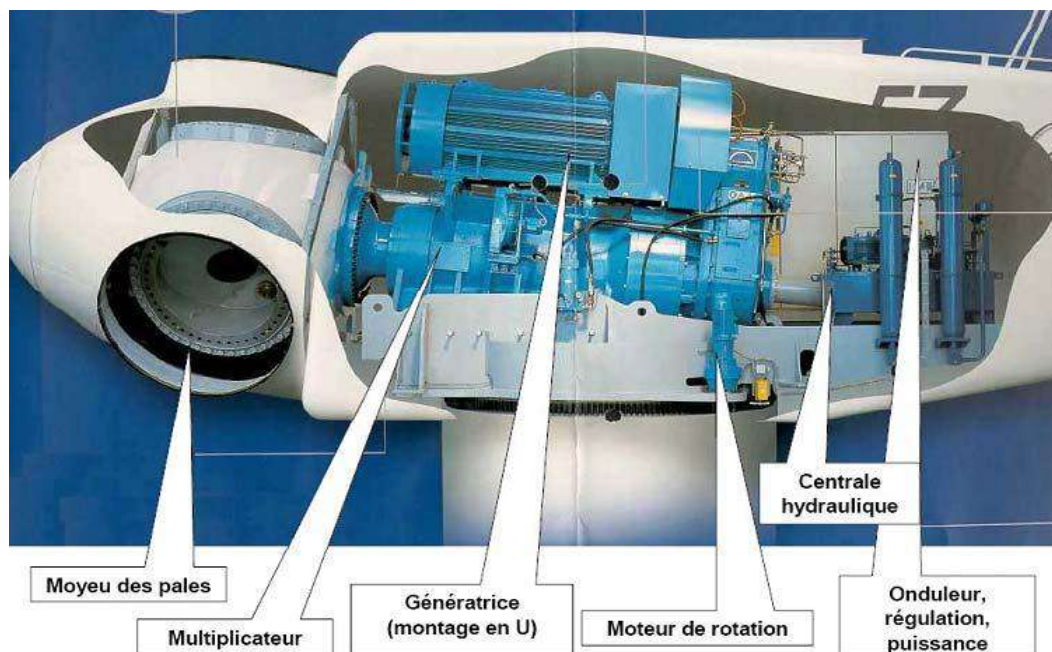


Figure N° 14 : Les composants d'un aérogénérateur [13]

d) Système d'orientation de la nacelle :

Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.

Une girouette, qui détermine l'orientation du vent, va déclencher les moteurs.



Figure N° 15 : Girouette d'une moyenne éolienne.

e) Le fonctionnement d'un aérogénérateur :

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique couplée à la turbine éolienne.

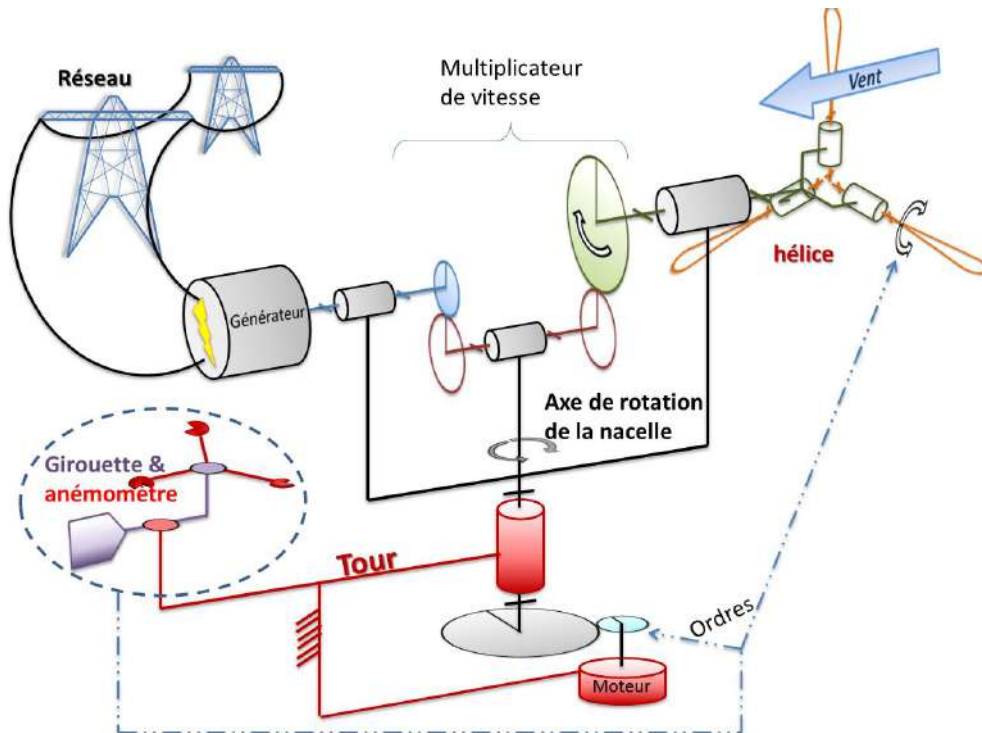
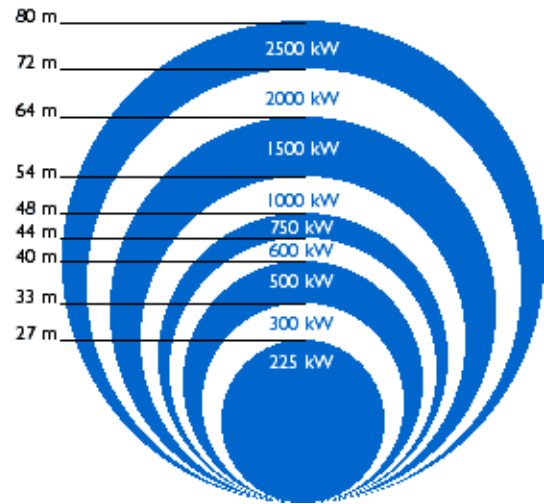


Figure N° 16 : Schéma synoptique du fonctionnement d'un aérogénérateur [14]

IV. Évolution de la taille des éoliennes :

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante dans un vent donné. La gamme des éoliennes disponible est très large, de 50 Watt (diamètre de 90 cm) à 2500 kW et plus (+ de 80 m de diamètre).

Figure N° 17 : Gamme de puissances d'éoliennes [15].



V. Le fonctionnement d'une centrale éolienne :



Figure N° 18: Fonctionnement d'une centrale éolienne [16].

1. La rotation des pales :

Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche.

2. La production de l'électricité :

L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.

3. L'adaptation de la tension :

Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur.

VI. Généralité sur le vent :

VI.1. L'étude du vent :

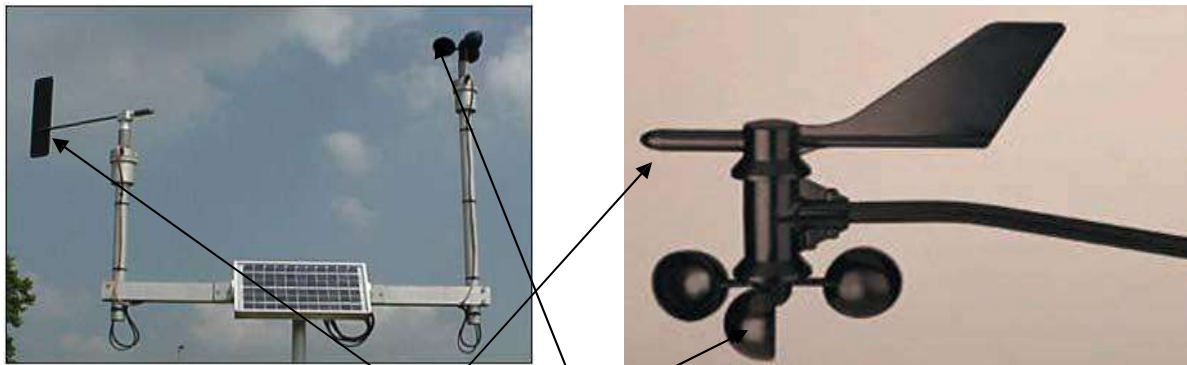
Le vent est un phénomène physique naturel qui consiste en un déplacement des molécules d'air. Or, nous savons que chaque corps en déplacement a emmagasiné de l'énergie cinétique. Le principe de l'hélice d'une éolienne est justement de capter cette énergie contenue par le vent.

Les principaux types du vent sont:

Les vents géostrophiques (globaux) : À haute altitude plus de 1000m
Les vents de surface :
Au niveau du sol jusqu'à 100m de hauteur.

VI.2. Les paramètres caractéristiques du vent :

La détermination de la direction, la fréquence, l'intensité, la vitesse du vent joue un rôle important lors de l'installation d'éoliennes.



Girouette / Anémomètre à coupelles

Figure N° 19 : La mesure de la vitesse et de la direction du vent [17].

VI.3. L'influence des obstacles sur la vitesse du vent :

L'obstacle au vent absorbe l'énergie cinétique du vent (un immeuble ou un arbre) et diminue fortement sa vitesse.

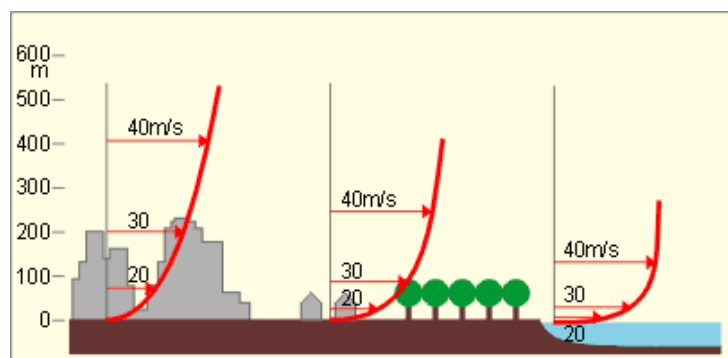


Figure N° 20 : Influence des obstacles

Le relief du terrain peut devenir un facteur positif qui accélère le vent dans certains cas :

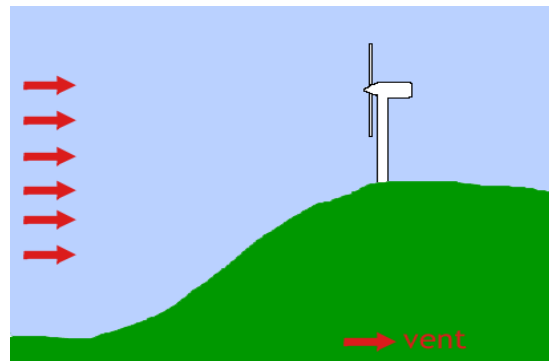


Figure N° 21 : Influence du relief.

VI.4.L'effet de colline :

À l'approche de la colline le vent va se retrouver comprimé par la paroi qui fait face, ainsi une zone de haute pression va se créer. Dans cette zone de haute pression, le flux d'air va accélérer vers l'éolienne pour pouvoir franchir l'obstacle et rejoindre la zone de basse pression qui se trouve de l'autre côté de la colline [18].

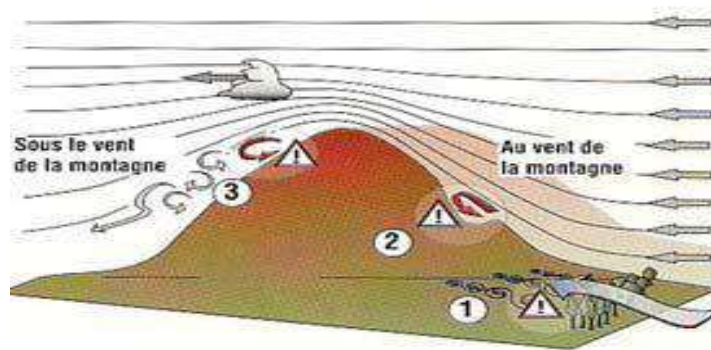


Figure N° 22: L'effet de colline

VI.5. L'effet tunnel :

Lorsque le flux d'air va arriver face à une paroi (montagne, immeuble...), il va se comprimer et la franchir par la moindre ouverture. Si l'on place une éolienne dans cette ouverture (col étroit par exemple), la vitesse des vents sera plus importante qu'aux alentours.

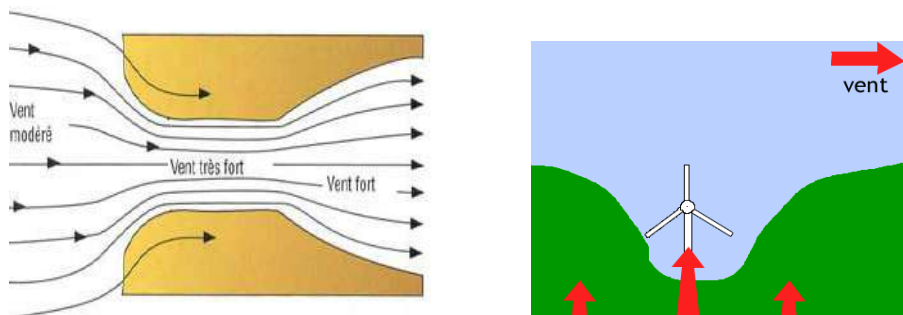


Figure N° 23 :L'effet tunnel.