

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mustapha STAMBOULI de Mascara



Faculté des Sciences Exactes
Département de Physique

Polycopié de Cours :

Les Energies

Fait par : Dr. SIAD Mohammed Benamar

Destiné aux étudiants de la troisième année licence en physique fondamentale

5^{ème} Semestre

Option : Physique Fondamentale

Année Universitaire 2021/2022

Sommaire

Sommaire.....	1
Avant propos.....	4

Chapitre 1 : Généralités et concepts de base

I.1	DÉFINITION DE L'ÉNERGIE.....	7
I.2	HISTOIRE DE L'ÉNERGIE.....	7
I.3	FORMES D'ÉNERGIE	8
I.3.1	Énergie de position, cinétique et mécanique	8
I.3.2	Énergie potentielle chimique	9
I.3.3	Énergie lumineuse	10
I.3.4	Énergie électromagnétique	10
I.4	ÉNERGIE DE STOCK ET ÉNERGIE DE FLUX.....	11
I.4.1	Les sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, uranium)....	11
I.4.2	Les sources d'énergie renouvelables (soleil, vent, eau, chaleur de la terre, biomasse).....	11
I.5	SEPT FORMES PRINCIPALES DE L'ÉNERGIE.....	12
I.6	IMPACTS DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR LA SANTE...	13
I.7	LES GRANDS PRINCIPES DE L'ÉNERGIE	13
I.8	LES SOURCES D'ÉNERGIE	14
I.8.1	Énergie primaire	14
I.8.2	Énergie secondaire.....	15
I.8.3	Énergie finale.....	15
I.8.4	Énergie utile.....	15
I.9	DÉCLINAISONS DE L'ÉNERGIE.....	16
I.10	RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE	16
I.11	EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE.....	17
I.12	LA CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE	17

Chapitre 2 : Les différentes sources d'énergie

II.1	LES SOURCES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ.....	20
II.1.1	Les sources primaires d'énergie	20
II.1.2	Les énergies secondaires	20
II.1.3	Les sources primaires et secondaires et leurs effets sur l'environnement ...	21
II.2	LES ÉNERGIES FOSSILES.....	21
II.2.1	Exemple de l'énergie nucléaire.....	22
II.3	LES ÉNERGIES RENOUVELABLES.....	23
II.4	PRODUCTION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	24

II.4.1	L'énergie hydraulique.....	24
II.4.2	L'énergie éolienne.....	24
II.4.3	L'énergie solaire.....	25
II.4.3.1	Principe des panneaux photovoltaïques	26
II.4.3.2	Principe des capteurs solaires thermiques	26
II.4.3.3	Les contraintes.....	26
II.4.4	L'énergie géothermique.....	26
II.4.5	La biomasse.....	27
II.4.5.1	Biomasse et effet de serre	27
II.4.5.2	Types de biomasse.....	28
II.5	AUTRES FORMES DE PRODUCTIONS ÉNERGETIQUES.....	29
II.5.1	L'hydrogène.....	29
II.5.1.1	Chimie et hydrogène.....	29
II.5.1.2	Production de l'hydrogène	29
II.5.1.3	Transport de l'hydrogène.....	30
II.5.1.4	Domaine d'utilisation de l'hydrogène.....	30
II.5.1.5	Perspectives de son utilisation	30
II.5.1.6	Les avantages de l'hydrogène.....	31
II.5.1.7	Conclusion	31
II.5.2	Cogénération.....	32
II.5.2.1	Le système de cogénération dans les sites d'incinération des déchets ménagers.....	33

Chapitre 3 : Équivalences des unités énergétiques

III.1	DÉFINITION DE L'ÉNERGIE.....	35
III.2	LA PUISSANCE.....	35
III.3	ÉQUIVALENCES ÉNERGÉTIQUES.....	36
III.3.1	Electron-volt (<i>eV</i>)	36
III.3.2	Erg (<i>erg</i>)	36
III.3.3	Calorie (<i>cal</i>)	36
III.3.4	British Thermal Unit (<i>Btu</i> ou <i>BTU</i>)	37
III.3.5	Kilowatt-heure (<i>kW.h</i> ou <i>kWh</i>).....	37
III.3.6	Tonne de <i>TNT</i>	37
III.3.7	Tonne d'équivalent pétrole (<i>tep</i>)	37
III.3.8	Tonne d'équivalent charbon (<i>tec</i>)	37
III.3.9	Le cheval-vapeur, autre unité de puissance.....	38
III.4	TABLEAUX DES UNITES ÉNERGÉTIQUES ET DE LEURS EQUIVALENCES.....	39
III.5	CONVERSIONS ENTRE UNITÉS	41
III.6	FACTEURS DE CONVERSION DES PRODUITS ÉNERGÉTIQUES.....	41
III.7	CALCUL DU NOMBRE DE CALORIES D'UN ALIMENT	42
III.7.1	1ère méthode : "méthode d'analyse des constituants d'un aliment"	42
III.7.2	2ème méthode : "méthode expérimentale".....	43

Chapitre 4 : Productions et consommations mondiales d'énergies, réserves et prévisions

IV.1	INTRODUCTION.....	45
IV.2	DÉFINITION DU MIX ÉNERGÉTIQUE.....	46
IV.3	LE MIX ÉNERGÉTIQUE MONDIAL EN 2019	46
IV.4	LES DIFFÉRENTES ÉNERGIES UTILISÉES DANS CHAQUE ZONE DU GLOBE.....	47
IV.5	DEFINITION DU RATIO RP	48
IV.6	RÉSERVES MONDIAUX D'ÉNERGIES.....	48
IV.7	PART DE L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE MONDIAL.....	49
IV.8	LA CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE.....	50
IV.8.1	Classification de la consommation énergétique.....	50
IV.8.2	La consommation d'énergie et sa répartition dans le monde	51
IV.9	MIX ÉLECTRIQUE MONDIAL.....	52
IV.10	CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET SON IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT.....	53
IV.11	LA LUTTE CONTRE LA PRÉCARITÉ ENÉRGÉTIQUE.....	53
IV.12	LES PERSPECTIVES D'AVENIR POUR L'ÉNERGIE	53

Chapitre 5 : Les sources d'énergie en Algérie

V.1	INTRODUCTION.....	55
V.2	SOURCES D'ÉNERGIE EN ALGERIE (NON- RENOUVELABLES).....	55
V.2.1	Pétrole.....	55
V.2.1.1	Réserves de pétrole	55
V.2.1.2	Production de pétrole.....	56
V.2.2	Le gaz Naturel.....	57
V.2.2.1	Réserves du Gaz naturel.....	57
V.2.2.2	Production de gaz naturel.....	57
V.2.3	Énergie nucléaire	58
V.2.3.1	Réserves de l'Algérie en Uranium.....	58
V.3	SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES EN ALGÉRIE.....	58
V.3.1	Perspectives énergétiques en Algérie	59
V.3.2	Énergie solaire	59
V.3.2.1	Centrale Photovoltaïque de 1,1 MW de Ghardaïa.....	60
V.3.2.2	Photothermie.....	61
V.3.3	Energie Eolienne.....	61
V.3.3.1	Ferme Eolienne de 10,2 MW d'Adrar.....	62
V.4	PLAN DE RELANCE D'ENERGIE VERTE EN ALGERIE	63
	Références Bibliographiques	66

AVANT PROPOS

L'Énergie est le domaine qui lie toutes les sciences contemporaines, stratégiques et historiques. C'est l'outil qui procure à son détenteur le pouvoir, la richesse et la sécurité lorsqu'il est sagement utilisé, comme il peut mener certaines sociétés à sa destruction s'il n'est pas géré avec un programme fiable et économique.

L'histoire de l'homme a été substantiellement marquée par les énergies libres auxquelles il pouvait avoir accès. Aujourd'hui, l'énergie est un facteur systématique et incontournable des activités humaines. Le futur s'inscrira probablement dans la même problématique.

L'accroissement de la population dans notre planète, l'augmentation du niveau de vie des habitants des pays émergents et la limite des réserves d'énergies fossiles contribueront à augmenter les besoins d'énergie libre. Face à cela, les réponses devront être trouvées dans une utilisation plus efficace de l'énergie, dans un surcroît d'utilisation des énergies renouvelables et nucléaires.

L'histoire de l'Énergie nous a permis de voir l'évolution et le développement des sociétés à travers le temps ainsi que les différentes ressources qu'a connues l'humanité à travers les périodes de son existence. La vitesse respective d'évolution de ces facteurs créera les conditions d'un développement harmonieux de l'économie mondiale ou au contraire une crise d'approvisionnement mondiale aux conséquences potentiellement tragiques.

L'Énergie s'explique d'une façon claire par la compréhension du domaine énergétique en évoquant son origine et son intéressement par l'humanité. Il est judicieux de différencier entre les deux formes énergétiques ; renouvelables et non-renouvelables.

En premier lieu, nous allons présenter les énergies dites de stock qui ne sont autres que les formes non-renouvelables. Discuter du potentiel productif mondial ainsi que l'évaluation des stocks de ces sources qui permettra de placer une stratégie et des perspectives à répondre aux besoins croissants de l'humanité en termes d'énergie.

Les Énergies renouvelables est l'issue de sortie et la solution aux problèmes liés à la diminution des stocks d'Énergies ainsi qu'aux problèmes liés à la pollution et la dégradation de la qualité de vie de notre environnement naturel causés par l'utilisation abusive des formes non-renouvelables.

Notre pays, l'Algérie comme tout autre pays possède un potentiel productif concurrentiel et très intéressant. Sa politique de l'exploitation de ses ressources énergétiques comme le pétrole et le gaz essentiellement, rentre dans un programme pour le développement

socio-économique de sa population. Néanmoins, cette exploitation des ressources énergétiques non-renouvelables a mis en jour un plan stratégique pour s'intéresser aux formes dites renouvelables.

Le potentiel solaire sera le sujet de discussion et de développement du domaine renouvelable par les instances scientifiques et politiques du pays. Ainsi le gouvernement a mis en place des plans de relance de ce projet par la création de laboratoires de recherches scientifiques aux niveaux des universités et centres dédiés à la recherche scientifique. Des fermes solaires thermiques, photovoltaïques ainsi qu'éolienne ont vu le jour dans le sud Algérien des régions d'Ain Salah et Adrar et ce, pour évaluer les capacités productives de tels projets.

Chapitre I

Généralités et concept de base

Chapitre 1: Généralités et concepts de base

I.1 DÉFINITION DE L'ÉNERGIE

L'**énergie** (du grec : **force en action**) est ce qui permet d'agir. Au sens physique, l'**énergie caractérise la capacité à modifier un état, à produire un travail entraînant du mouvement, de la lumière, ou de la chaleur**. Toute action ou changement d'état nécessite que de l'énergie soit **échangée**.

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur.

I.2 HISTOIRE DE L'ÉNERGIE

✓ L'énergie d'hier à aujourd'hui

L'émergence du concept d'énergie au XIX^{ème} siècle, a été une révolution en Physique, quand on a constaté que travail **mécanique** et **chaleur** pouvaient se transformer de l'un à l'autre (première révolution industrielle).

Le concept scientifique d'énergie a été au centre du développement des activités techniques et industrielles relatives à la production et à la transformation de l'énergie.

Le **charbon** est à l'origine de la première révolution industrielle (machine à vapeur, transports ferroviaires, métallurgie). L'essor de nouvelles sources d'énergie (**pétrole, électricité**) et des communications sont à l'origine de la deuxième révolution industrielle. Ces deux révolutions ont donné naissance à de nouveaux modes de vie et à nos sociétés modernes.

Elles ont également donné lieu à une ère de dégradation de l'environnement sans précédent dans l'histoire humaine. Les travaux du GIEC ont permis de prendre conscience du changement climatique induit par nos activités industrielles et l'utilisation des énergies fossiles depuis 200 ans, et d'en mesurer les conséquences sur la biodiversité, le cycle de l'eau, bref sur l'avenir de la vie.

✓ L'énergie et l'environnement

Comme l'énergie est nécessaire à toute activité humaine, l'approvisionnement en sources d'énergie utilisable a été, est et restera une préoccupation majeure des sociétés humaines.

Aujourd'hui, la lutte contre le changement climatique, et plus largement une meilleure prise en compte de l'impact de nos activités sur l'environnement, nous obligent à repenser notre système énergétique, et à réinventer nos façons de produire et de consommer l'énergie.

Ainsi, la diversification du bouquet énergétique est, avec la sobriété et l'efficacité énergétique, une des réponses aux enjeux de sécurité d'approvisionnement, de compétitivité et de lutte contre le changement climatique. Dans cette optique, les énergies renouvelables et/ou propres auront un rôle majeur à jouer

I.3 FORMES D'ÉNERGIE

L'énergie exprime la force des phénomènes physiques, c'est une quantité mesurable. Afin que l'énergie corresponde au phénomène qu'elle mesure, on distingue différentes formes d'énergie :

- Énergie de position, cinétique et mécanique
- Énergie potentielle chimique
- Énergie lumineuse
- Énergie électromagnétique

I.3.1 Énergie de position, cinétique et mécanique

• Énergie de position (ou énergie potentielle)

Un corps possède une énergie de position, notée E_p , qui dépend de son poids (la masse notée m) et de sa hauteur (notée h).

→ Plus sa masse et sa hauteur sont importantes, plus son énergie de position est grande.

L'expression mathématique de l'énergie de position est :

$E_p = m \times g \times h$ (avec m en kilogramme, g l'accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ sur Terre) en newton par mètre, h la différence d'altitude en mètre (altitude de départ - altitude d'arrivée) en mètre)

On appelle cette énergie potentielle car elle est emmagasinée dans le corps, ou le système, et pourra être transformée en énergie cinétique lorsque le corps sera mis en mouvement, lors d'une chute par exemple. Comme elle dépend de la masse de l'objet et de la pesanteur, c'est une énergie potentielle gravitationnelle.

• Énergie cinétique

C'est l'énergie liée au mouvement d'un corps ou d'une particule. On la note E_c . Cette énergie est proportionnelle au carré de la vitesse de déplacement : si le corps est immobile,

son énergie cinétique est nulle. Elle dépend aussi du poids du corps, qui est responsable du mouvement de chute (c'est à cause de son poids qu'il est attiré vers le bas).

L'expression mathématique de l'énergie cinétique est : $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ (avec E_c en Joule (J), la masse m en kilogramme (kg), et la vitesse v en mètre par seconde (m/s))

On remarque dans cette formule que l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse de l'objet. Cela signifie que si on double la vitesse d'un objet, on multiplie son énergie cinétique par 4. On voit bien les conséquences que cela peut avoir dans un accident de voiture : la gravité des dégâts et blessures occasionnés dépend de l'énergie cinétique du véhicule. Ainsi, une collision à 60 km/h entraînera des dégâts ou blessures 4 fois plus graves qu'une collision à 30 km/h. C'est aussi ce qui explique que la distance de freinage augmente avec la vitesse du véhicule : plus il y a d'énergie cinétique à dissiper, plus c'est long.

• Énergie mécanique

Lors de la chute d'un corps, l'énergie de position est peu à peu convertie en énergie cinétique. L'énergie mécanique (notée E_m) d'un corps qui chute est la somme de son énergie de position et de son énergie cinétique, d'où l'expression mathématique :

$$E_m = E_p + E_c$$

I.3.2 Énergie potentielle chimique

Lors d'une réaction chimique, de l'énergie est dégagée (ou absorbée suivant les réactions). Elle peut se présenter sous forme de chaleur, de lumière, d'agitation ou d'explosion.

Une réaction chimique est une transformation de la matière, au cours de laquelle les atomes se recombinent, provoquant un changement de nature chimique de la matière (à ne pas confondre avec un changement d'état (solidification, vaporisation), qui n'est pas une réaction chimique, car les atomes ne se recombinent pas).

Pour représenter la réaction chimique, on peut l'écrire sous forme d'équation chimique, par exemple lors de la combustion du carbone : $C + O_2 \rightarrow CO_2$

En se recombinant, les atomes libèrent de l'énergie.

→ La **combustion** est une manière de récupérer l'**énergie potentielle chimique**, emmagasinée dans un combustible (charbon, bois), en la **transformant** en une autre forme d'énergie, la chaleur (**énergie thermique**).

I.3.3 Énergie lumineuse

La lumière est une onde qui se propage à la vitesse de la lumière, soit environ 300 000 km/s. Elle transporte de l'énergie depuis une source de lumière (étoile, lampe, flamme) jusqu'à un récepteur (œil, plante, panneau solaire).

→ Un capteur solaire est un récepteur capable de capter l'énergie lumineuse de la transformer en une autre forme d'énergie, l'électricité ou chaleur.

A l'inverse, une source de lumière, comme une lampe, peut transformer l'énergie qui l'alimente (l'électricité) en énergie lumineuse.

La lumière est l'énergie de rayonnement des ondes électromagnétiques visibles à l'œil nu. L'énergie lumineuse est portée par des particules appelées photons.

I.3.4 Énergie électromagnétique

L'énergie électromagnétique est l'énergie associée aux ondes électromagnétiques (ondes radio ou de rayonnement).

La force électromagnétique est la combinaison de la force électrique (issue des interactions entre charges électriques) et de la force magnétique (celle des aimants). Elle est véhiculée par les photons. Le rayonnement électromagnétique est émis par les atomes ou leurs noyaux, et résulte de l'action à distance des particules électriquement chargées sur les autres.

Une expérience simple pour mettre en évidence un champ électrique Il est facile de créer un champ électrique, et de visualiser l'action à distance des particules chargées.

- On frotte un corps isolant (surface d'un CD, peigne) avec de la laine : il acquiert une charge électrique, et modifie les propriétés locales de l'espace en créant un champ.
- Des petits morceaux de papiers sont attirés et se collent à l'objet frotté : ils ressentent le champ électrique, c'est-à-dire qu'ils subissent la force d'attraction, due aux charges qui s'attirent ou se repoussent en fonction de leur signe (+/-).

L'onde se caractérise par une fréquence (nombre d'oscillations par seconde) et par une longueur d'onde (distance parcourue pendant une période d'oscillation). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière (300 000 km/s), et presque aussi vite dans l'air. En fonction de la longueur d'onde et de la fréquence, on obtient soit :

- des ondes radio
- des micro-ondes (grâce auxquelles on chauffe le café)
- des infra-rouges (pour voir à travers les murs)
- de la lumière (la seule onde que notre œil sache détecter, donc la seule visible)
- des ultra-violets (pour les coups de soleil)
- des rayons X (pour les radios à l'hôpital)
- des rayons gamma (processus nucléaires et radioactivité).

L'énergie électromagnétique est rayonnée par une source et peut être récupérée par un capteur.

On peut mesurer la puissance (en watt) rayonnée par une source : ainsi, la puissance solaire totale reçue sur Terre est de 170 PW (1 petawatt = 10^{15} W)

L'homme sait créer du rayonnement électromagnétique : courant électrique haute tension et domestique, lasers, ondes radios (radio, télévision), téléphones mobiles, technologies sans fil haut débit (WiFi, 3G), rayons X et gamma utilisés par la médecine, physique nucléaire. Ce rayonnement est largement utilisé pour transporter de l'information.

I.4 ÉNERGIE DE STOCK ET ÉNERGIE DE FLUX

En réalité, l'énergie est une notion quelque peu abstraite. On pourrait dire qu'elle existe sous 2 états différents : l'énergie stockée, et l'énergie échangée. Cette notion de stockage et d'échange est importante car elle va nous permettre de caractériser ce que l'on nomme parfois abusivement des sources d'énergie :

I.4.1 Les sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, uranium)

Les sources d'énergie fossiles sont des énergies de stock : elles sont le résultat de procédés naturels qui se sont produits sur plusieurs milliers à plusieurs millions d'années ; elles sont en quelque sorte un cadeau de la nature, dont les réserves peuvent être considérées comme épuisables à partir du moment où nous prélevons l'énergie stockée plus rapidement que la nature ne parvient à la régénérer.

I.4.2 Les sources d'énergie renouvelables (soleil, vent, eau, chaleur de la terre, biomasse)

Les sources d'énergie renouvelables sont des énergies de flux, qui s'inscrivent dans un cycle de période relativement courte à extrêmement longue, voire quasiment infinie à l'échelle de l'Humanité (durée de vie du soleil - encore quelques milliards d'années - et saisons pour l'énergie solaire, cycles quotidiens et saisonniers pour le vent et l'eau, cycles annuels ou plus pour la biomasse, etc.).

Les "énergies fossiles" sont donc des formes d'énergie stockée, alors que les énergies renouvelables sont des formes d'énergie échangée. Si les premières sont fort pratiques par leur caractère de "stock" dans lequel il est facile de puiser, en revanche les secondes sont beaucoup plus difficiles à collecter et à stocker.

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables implique donc une société et des technologies radicalement différentes qui reposent sur les formes renouvelables disponibles pour chaque société.

I.5 SEPT FORMES PRINCIPALES DE L'ÉNERGIE

L'énergie peut se présenter sous sept formes principales :

1. Energie lumineuse
2. Energie nucléaire
3. Energie chimique
4. Energie mécanique
5. Energie électrique
6. Energie hydraulique
7. Energie thermique

Le diagramme ci-dessous indique les transformations qui permettent de passer d'une forme à une autre :

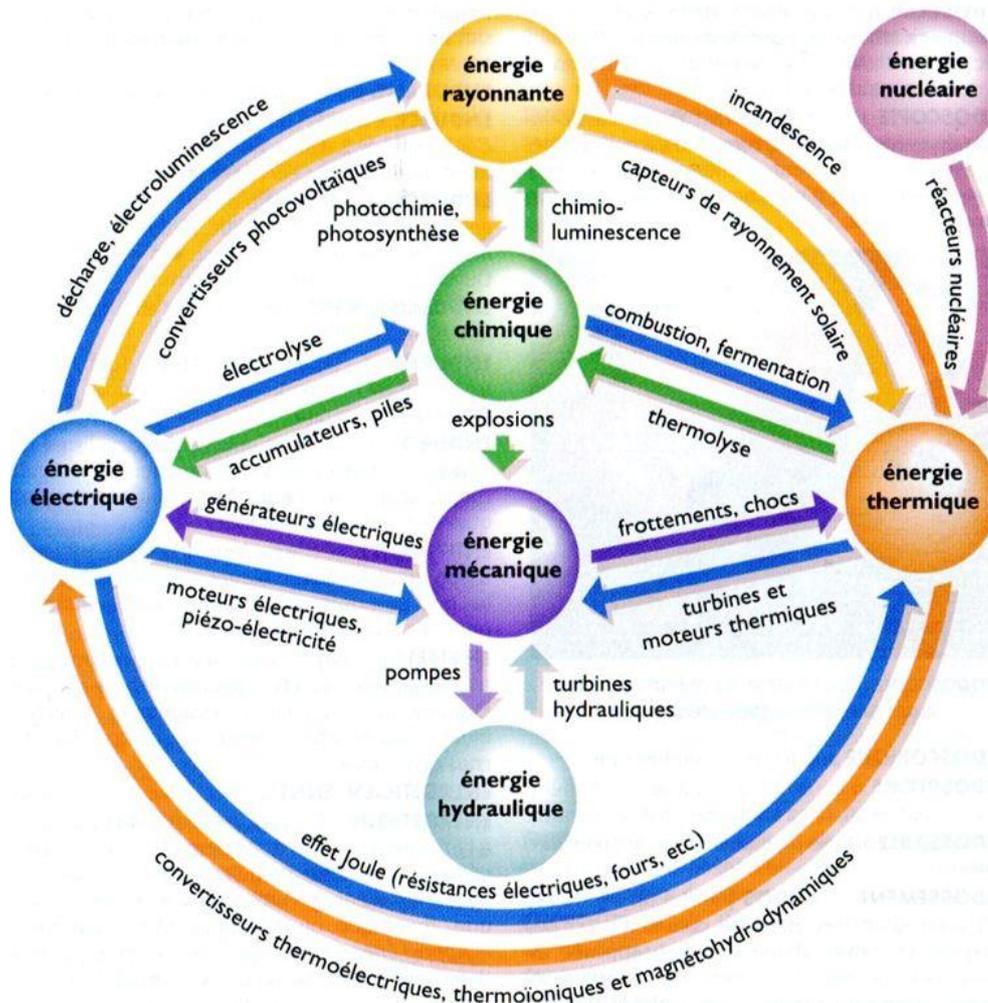


Figure I.1 : cycle et formes principales de l'énergie

I.6 IMPACTS DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR LA SANTE

Aujourd'hui, nous baignons dans un champ électromagnétique permanent : les sources d'exposition sont nombreuses (systèmes électroniques et de communication sans fil, antenne télé, téléphone mobile, radio, Box, Wifi, Bluetooth, micro-onde, interphone bébé...).

Notre niveau d'exposition et ses éventuelles conséquences dépendent de la puissance et de la distance des émetteurs, mais aussi de la durée de l'exposition, ou de la sensibilité de chacun. Ces champs électromagnétiques sont perçus par certains comme une « pollution électromagnétique » dangereuse pour la santé.

Pour être invisibles, les ondes n'en sont pas pour autant indétectables : on sait mesurer notre niveau d'exposition (en watts par kilogramme), ou la valeur du champ électrique sur un site (en volts par mètre), ce qui permet aux autorités de déterminer des niveaux d'exposition maximums (ou valeurs limites). Cependant, les impacts à long terme de l'exposition au rayonnement électromagnétique sont encore relativement méconnus.

I.7 LES GRANDS PRINCIPES DE L'ÉNERGIE

« Le principe de conservation de l'énergie »

Selon le principe de conservation de l'énergie, lors de toute transformation, l'énergie est conservée. L'énergie peut passer d'une forme à une autre, mais elle respecte la loi de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».



Figure I.2 : Portrait du scientifique Antoine Laurent Lavoisier

Energie initiale = Energie finale + pertes

Il s'énonce de la manière suivante : « Lors d'une transformation dans un système fermé, la variation de son énergie interne est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, sous forme de chaleur ou de travail. » Autrement dit, l'énergie acquise par le système est égale à celle que lui a transmis l'opérateur, même si celle-ci a changé de forme : l'un l'a acquise, l'autre l'a perdue, mais la quantité échangée est constante → l'énergie se conserve.

L'énergie est en quantité invariable dans la nature. On ne peut la produire à partir de rien : on ne peut que l'échanger, ou la transformer d'une forme à une autre.

Cependant, des frottements peuvent intervenir au cours de l'échange, comme dans un moteur, créant des déperditions. Dans ce cas, la quantité d'énergie restituée par le moteur est inférieure à celle qui lui a été fournie : on dit qu'il y a des pertes. Mais cela ne contredit pas le principe de conservation : toute l'énergie reçue a été transformée, une partie ayant été transformée en chaleur dans les frottements. L'énergie "perdue" n'a pas disparu : elle s'est dissipée dans le milieu extérieur. Cette quantité d'énergie non utilisée par le système peut être mesurée, c'est ce qui permet de définir le rendement.

I.8 LES SOURCES D'ÉNERGIE

Les énergies que nous utilisons au quotidien, à la maison ou pour le transport, ne sont pas disponibles dans la nature sous forme prête à l'emploi. L'énergie que nous qualifions de primaire, celle qui est disponible dans la nature, doit être transformée, convertie sous une autre forme pour être utilisable par le consommateur : le pétrole est raffiné avant d'arriver dans le réservoir de la voiture, l'électricité a été produite dans une centrale électrique à partir de la conversion d'une source d'énergie primaire. On appelle énergie finale l'énergie obtenue à partir de sources d'énergie primaires, celle qui peut être utilisée par le consommateur final. Du fait des pertes aux différentes étapes de transformation, de stockage, de transport, l'énergie primaire est toujours supérieure à l'énergie finale dans les bilans.

I.8.1 Énergie primaire

Au sens physique, l'énergie primaire correspond à l'énergie présente dans la nature, directement exploitable sans transformation : énergie éolienne (vent), énergie solaire (soleil), énergie hydraulique, énergie géothermique, énergie des combustibles fossiles (pétrole, charbon gaz) et nucléaires, et énergie biomasse. Exemple : le soleil qui fournit de la lumière naturelle, le vent qui sèche le linge ou pousse un bateau à voile (Dans les statistiques, le terme énergie primaire est utilisé avec un sens très différent du sens physique).

Conformément au principe retenu par l'AIE pour les conventions internationales, l'énergie primaire désigne la première forme d'énergie rencontrée, à savoir la chaleur pour

l'électricité d'origine nucléaire et les énergies fossiles, et l'électricité pour l'hydraulique, l'éolien et le solaire photovoltaïque. C'est donc cette première forme qui est comptabilisée dans les bilans.

On y rencontre aussi le terme d'électricité primaire : il s'agit de l'électricité d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire photovoltaïque et géothermique haute température.

Ces énergies sont classées de la manière suivante :

- Les énergies fossiles : pétrole, gaz naturel, charbon.
- L'énergie nucléaire : uranium
- Les énergies renouvelables : hydraulique, éolien, solaire ...

I.8.2 Énergie secondaire

Lorsqu'une énergie primaire n'est pas utilisable directement, elle peut être transformée en une source d'énergie secondaire, qui elle pourra être utilisée directement. C'est donc l'énergie issue de la conversion d'une énergie primaire.

Exemple : électricité produite par une centrale thermique

Énergie secondaire = énergie primaire x rendement de conversion

I.8.3 Énergie finale

C'est l'énergie mise à disposition de l'utilisateur final. Sa consommation entraîne une dernière conversion. Cela peut être une énergie primaire (bois pour la cheminée), ou une énergie secondaire (électricité, mazout).

Énergie finale = énergie secondaire x rendement de transport

Exemples :

- Tension électrique domestique 230V.
- Fioul disponible dans une cuve.
- Essence à la pompe.
- Gaz de ville.

I.8.4 Énergie utile

C'est l'énergie qui rend le service énergétique recherché par l'utilisateur final, issue de la dernière conversion.

Exemples : lumière d'une lampe, chaleur fournie par un radiateur ou un four.

Énergie utile = énergie finale x rendement d'utilisation

Exemples :

- énergie mécanique pour le transport automobile.
- énergie lumineuse pour l'éclairage.
- énergie thermique pour le chauffage des habitations.
- cuisson des aliments avec le gaz.

I.9 DÉCLINAISONS DE L'ÉNERGIE

L'énergie est multiforme, et quand on veut en parler, comparer les énergies entre elles, faire des bilans énergétiques, ou évaluer des actions de maîtrise de l'énergie, il faut savoir ce dont on parle et ce qu'on mesure vraiment.

Dans les bilans énergétiques, par exemple, il est courant de voir apparaître deux qualificatifs pour l'énergie : on parle tantôt d'énergie primaire, tantôt d'énergie finale. Qu'est-ce que cela change ? Pourquoi la part de l'électricité dans la consommation totale est-elle de 23,9% de l'énergie finale, alors qu'elle est de 43% de l'énergie primaire, variant quasiment du simple au double ? Tâchons d'y voir un peu plus clair !

I.10 RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

Il y a d'innombrables façons, à partir d'une forme d'énergie, de produire l'énergie de fonctionnement des objets techniques : lampes, radiateurs, moteurs... Mais les procédés techniques ne sont pas parfaits, et les conversions que ces systèmes réalisent pour transformer une forme d'énergie en une autre sont à l'origine de déperditions, souvent sous forme de chaleur (effet Joule). Ces quantités d'énergie non utilisée sont considérées comme des pertes, car elles ne peuvent pas toujours être récupérées et utilisées.

→ Le rapport entre l'énergie fournie à un système et l'énergie restituée définit son rendement.

Le rendement énergétique est compris entre 0 et 100% (ce qui en pratique n'existe jamais).

Quelques exemples...

Un moteur de voiture a un rendement de 20 à 30%. Une ampoule à incandescence a un rendement de 5% en éclairage (le reste de l'énergie étant dissipé en chaleur). Les centrales électriques ont un rendement moyen de 33% (pertes thermiques, pertes dans le transport).

Les rendements varient en fonction des formes d'énergies et des systèmes utilisés pour les convertir.

I.11 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'efficacité énergétique représente le rendement énergétique complet d'un système. Exemple : l'efficacité énergétique d'une maison dépendra du rendement des appareils de chauffage utilisés, mais aussi de son isolation, du système de ventilation.

L'Agence Internationale des Energies AIE considère que l'efficacité énergétique est « l'énergie du futur », et qu'il faut libérer son potentiel.

Et en effet, l'énergie la plus économique, la plus durable, la plus propre, la plus à même d'atteindre tous les objectifs d'indépendance énergétique, de lutte contre le dérèglement climatique, bref l'énergie la meilleure, c'est celle qu'on ne consomme pas.

I.12 LA CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE

L'ensemble des transformations qui ont lieu de l'énergie primaire à l'énergie utile forme une chaîne énergétique.

De l'énergie primaire à l'énergie utile, différentes énergies et conversions seront impliquées, ainsi que les pertes qui auront lieu à chaque étape.

En comparant l'énergie finale (ou utile) réellement récupérée en bout de chaîne, et l'énergie primaire qui a été consommée pour la produire, on peut mesurer l'efficacité énergétique du système utilisé pour transformer l'énergie. Pour cela, il faut tenir compte, à chaque étape, du rendement du dispositif de transformation/conversion utilisé pour passer d'une forme d'énergie à une autre

Tout au début de cette chaîne, on doit **obtenir et extraire** l'énergie dans sa forme première, c'est-à-dire le gaz naturel, le pétrole, les rayons de soleil, le vent ou le charbon. Cette énergie primaire ne nous est pas encore de grande utilité. La prochaine étape consiste à la **transformer** en énergie finale, telle que l'électricité ou l'essence. À ce stade, le charbon est, par exemple, transformé en électricité dans une centrale thermique au charbon. C'est l'énergie finale qui est **distribuée** aux consommateurs.

Finalement, divers appareils comme : les ampoules électriques, les téléviseurs, les cuisinières et les véhicules utilisent l'énergie finale pour produire quelque chose d'utile et livrer les différents services (voir croquis ci-dessous).

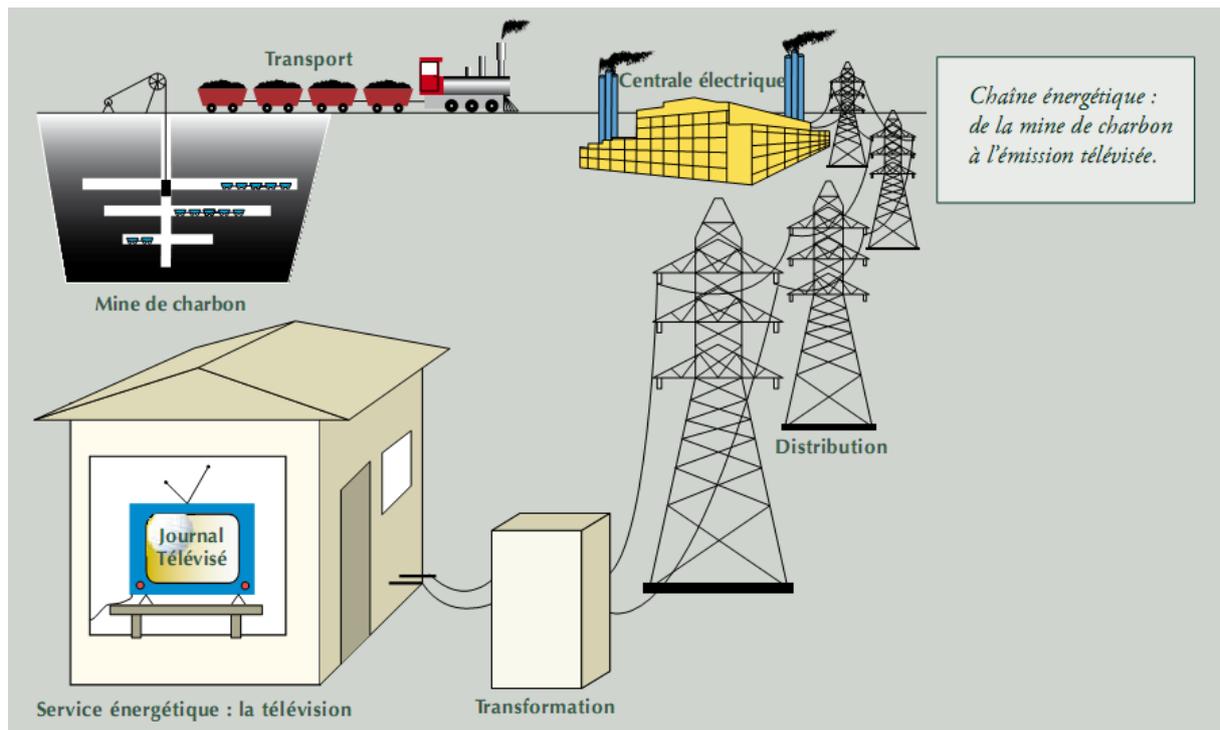


Figure I.3 : Croquis d'une chaîne énergétique

L'énergie est à la base de tout ce que nous faisons : nous avons besoin de **combustible** ou d'**électricité** dans presque toutes nos activités quotidiennes. Pour fournir toute l'énergie que nous utilisons, nous avons besoin de mines de charbon, de plates-formes de forage de pétrole, de pipelines, d'énormes navires qui assurent la distribution du charbon et du pétrole dans le monde entier, de centrales électriques, de réseaux de transmission, de stations-service et beaucoup d'autres. Ils forment ensemble un système complexe que l'on appelle *le système énergétique*.

Toutes ces formes d'énergie ont une caractéristique qui nous intéresse particulièrement dans notre vie quotidienne : elles peuvent se transformer, on dit aussi se convertir d'un type à un autre. Par exemple, un moteur à explosion transforme de l'énergie chimique (le carburant) en énergie *thermique* puis en énergie mécanique par le jeu des pistons dans le moteur.

Chapitre II

Les différentes sources d'énergie

Chapitre 2 : Les différentes sources d'énergie

Les sources d'énergie se répartissent en deux grands segments : les matières premières et les phénomènes naturels. De manière générale ;

- les premières fournissent les énergies dites fossiles
- alors que les secondes fournissent les énergies dites renouvelables.

II.1 LES SOURCES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

II.1.1 Les sources primaires d'énergie

Par définition, une source d'**énergie primaire** est issue de la **nature** avant d'être transformée. En cas de non-utilisation de la source primaire dans son état initial, elle est exploitée afin de la transformer en une source d'énergie secondaire utilisable et transportable.

Voici la liste des sources d'énergie primaires :

1. Uranium
2. Charbon
3. Hydrocarbures
4. Cours d'eau et chutes d'eau
5. Force de la mer
6. Rayonnement du soleil
7. Force du vent
8. Pétrole
9. Gaz naturel
10. Géothermie
11. Déchets et biomasse

II.1.2 Les énergies secondaires

Par définition, l'énergie **secondaire** est celle obtenue grâce à la **transformation d'énergie**. Contrairement à la source d'énergie primaire, l'énergie secondaire est plus simplement stockable, transportable et utilisable. Les énergies secondaires sont également connues sous le nom de "vecteurs énergétiques".

- Centrale nucléaire
- Centrale thermique à flamme (fossile)
- Centrale hydraulique
- Centrale éolienne

- Energie solaire photovoltaïque
- Centrale géothermique
- Cogénération
- Energie solaire thermique à concentration

II.1.3 Les sources primaires et secondaires et leurs effets sur l'environnement

Ce tableau regroupe les différentes sources d'énergie renouvelables ou fossiles et leurs effets sur l'environnement.

Tableau II.1 : Tableau des différentes sources d'énergie

Sources renouvelables ou non ?	Sources primaires	Sources secondaires
Non renouvelables	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Uranium ✗ Hydrocarbures ✗ Charbon ✗ Pétrole ✗ Gaz naturel 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Centrale nucléaire ✗ Centrale thermique à flamme (fossile)
Renouvelables	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Force de l'eau (hydraulique ou marine) ✓ Vent ✓ Rayonnement solaire ✓ Géothermie ✓ Déchets et biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Centrale d'hydroélectricité ✓ Centrale éolienne ✓ Énergie solaire photovoltaïque ✓ Centrale géothermique ✓ Cogénération ✓ Énergie solaire thermique à concentration

II.2 LES ÉNERGIES FOSSILES

Les **énergies fossiles** proviennent de la **combustion de matières premières** comme le charbon, le pétrole ou encore le gaz naturel. Ces combustibles sont le résultat d'un processus de fossilisation qui a pris plusieurs millions d'années, c'est pourquoi on les appelle « combustibles fossiles » produisant de l'« énergie fossile ». Les réserves en matières premières sont plus ou moins abondantes, mais malheureusement non renouvelables.

Les énergies fossiles sont donc polluantes et leurs réserves ne sont pas infinies. Le gaz naturel est aujourd'hui l'énergie fossile la moins polluante, du fait de ses émissions de CO₂ réduites. Ce type d'énergie est présenté aujourd'hui comme un bon complément aux énergies renouvelables, dont la production est intermittente, du fait de sa flexibilité.



Figure II.1 : Centrale thermique à Gaz

II.2.1 Exemple de l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est produite par les noyaux des atomes qui subissent des transformations : ce sont les réactions nucléaires.

- **Le principe :** Lorsqu'un neutron percute le noyau de certains atomes lourds, le noyau impacté se scinde en deux noyaux plus légers. Cette réaction, appelée fission nucléaire, se traduit par un dégagement d'énergie très important. Elle donne lieu à une réaction en chaîne entre les noyaux des autres atomes, qui dégage une énergie cinétique récupérée sous forme de chaleur dans les réacteurs nucléaires et transformée en électricité.

- **Les contraintes et atouts :** Les investissements initiaux sont très lourds et l'acceptabilité relative, notamment en raison des craintes d'accidents graves et des risques liés à la production et au stockage des déchets.

La hausse du prix du pétrole crée un contexte plus favorable au redémarrage du nucléaire. La mise au point d'une nouvelle génération (génération III) présentant un niveau de sécurité accru devrait faciliter ce redémarrage. A plus long terme, à l'horizon 2030-2040, des réacteurs à neutrons rapides (génération IV) seront développés. Les réserves d'uranium permettraient alors de produire de l'énergie pendant des milliers d'années au lieu d'une centaine seulement.



Figure II.2 : Image d'une centrale nucléaire

II.3 LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'augmentation continue du prix des énergies fossiles associée à la question du réchauffement climatique favorisent la croissance des énergies renouvelables.

En 2010, les énergies renouvelables représentaient 12,4 % dans la consommation brute d'énergie finale. Elles représentaient également 19,8 % de la production mondiale d'électricité.

Cette dynamique encore émergente nécessite, pour perdurer, des politiques ambitieuses avec des mesures de soutien qui, d'une part encouragent la baisse de la consommation d'énergie finale et, d'autre part accroissent la production d'énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ne sont **pas tarissables**. Appelées aussi « énergies vertes » ou « énergies propres » car provenant des phénomènes naturels (vent, rayonnement solaire, force des courants marins), elles ne causent **aucune pollution directe** - mais parfois indirecte à cause de l'extraction de minerais (lithium, coltan, cuivre...) permettant la création des éoliennes et panneaux solaires notamment.

Leur exploitation est en plein essor : elles ne permettent pas encore de remplacer les autres types d'énergie mais offrent la possibilité de réduire de façon significative l'utilisation des combustibles fossiles. La transition énergétique est par ailleurs l'un des plus grands défis du XXIème siècle.

II.4 PRODUCTION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les technologies produisant des énergies propres à partir des ressources naturelles sont :

1. L'énergie hydraulique
2. L'énergie **éolienne**
3. L'énergie **solaire**
4. L'énergie **géothermique**
5. La **biomasse**

II.4.1 L'énergie hydraulique

Les centrales hydrauliques convertissent la force des cours d'eau, des chutes d'eau et même des marées ou de la houle et constituent une **source d'énergie inépuisable et n'émettant pas de CO₂**.

Ce système de production d'électricité verte est la plus ancienne des énergies renouvelables. Tout comme les moulins à eau depuis l'Antiquité, les centrales hydrauliques captent la force de l'eau alimentant les turbines tournantes pour produire de l'électricité grâce à un générateur électrique. Cependant, les conséquences sur le milieu aquatique ou l'environnement en général peuvent être importantes, notamment si la construction d'un barrage conduit à l'inondation de terres sur grande superficie (ex : barrage des Trois Gorges, en Chine et le grand barrage de Brésil).

- **Le principe** : Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :
 - ✓ le **barrage** qui retient l'eau,
 - ✓ la **centrale** qui produit l'électricité
 - ✓ et les **lignes électriques** qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

La quantité d'énergie hydraulique, et donc d'électricité, produite par la centrale dépend du **débit de la rivière et de la hauteur de la chute de l'eau**.

- **Les contraintes** : La construction de nouvelles centrales se heurte à de nombreux obstacles de nature économique, mais aussi d'acceptation sociale ; la **protection des cours d'eau** exclut souvent tout nouvel aménagement. La **faible pluviométrie** certaines années peut freiner significativement la production hydraulique.

II.4.2 L'énergie éolienne

Cette énergie verte est promise à un bel avenir au vu de son caractère inépuisable. En théorie, capter un millième de l'énergie éolienne disponible sur Terre permettrait en effet de subvenir à la totalité des besoins mondiaux en électricité. Les progrès technologiques réalisés sur les dix dernières années ont permis de rendre les éoliennes à la fois plus efficaces et beaucoup moins coûteuses à produire.

L'énergie éolienne est produite grâce à la **force exercée par le vent sur les pales d'une hélice**. Cette hélice est montée sur un mât de 50 à 110 mètres de haut, et le diamètre du cercle balayé par les 3 pales varie de 40 à 120 mètres.

- **Le principe** : Le vent fait tourner les pales, entre 10 et 25 tours par minute. L'**énergie mécanique** produite est **transformée** par un générateur en **énergie électrique**, dont la quantité dépend de la surface balayée.
- **La production** : L'éolien représente une technologie relativement mature, produisant de l'électricité dans des conditions proches de la rentabilité. **La puissance installée a fortement augmenté** au cours de ces dernières années.

Il existe aussi une autre forme d'énergie éolienne « l'éolien maritime (offshore) et côtier », où les nuisances sont réduites et que le rendement est souvent bien supérieur. L'éolien offshore offre des perspectives de développement intéressantes. Jusqu'à 50 mètres de profondeur, les techniques sont similaires à l'éolien terrestre avec des structures fixes. Au-delà de 50 mètres, de nouveaux concepts de structures flottantes sont aujourd'hui à l'étude.

- **Les contraintes** : Parmi les contraintes de cette technologie :
 - ✓ Avant l'installation d'une éolienne ou d'un parc, une étude d'impact de plusieurs années est nécessaire.
 - ✓ Une éolienne doit être implantée dans un endroit où les vents sont suffisamment puissants (mais pas trop non plus) et réguliers (Donc un inconvénient majeur d'avoir une production intermittente).
 - ✓ Les systèmes de stockage de batterie, qui doivent permettre de contourner ce problème, doivent gagner en efficacité sur les prochaines décennies : c'est à cette condition que les énergies vertes pourront devenir la première forme d'énergie dans le monde.

II.4.3 L'énergie solaire

L'énergie lumineuse du soleil est recueillie grâce à des capteurs sur des panneaux solaires et est convertie en énergie électrique (solaire photovoltaïque) ou thermique (solaire thermique, comme pour les chauffe-eaux solaires). L'installation de panneaux photovoltaïques peut permettre aux particuliers de subvenir à plus de la moitié de leurs besoins en chauffage (eau et habitation).

A l'instar de l'énergie éolienne, le solaire photovoltaïque a **une production intermittente en fonction des éléments**. Dans le cadre d'une transition énergétique vers les énergies vertes, les Etats devront donc continuer de s'appuyer sur des sources d'énergie complémentaires.

L'énergie solaire comprend donc deux filières : la filière photovoltaïque pour produire de l'électricité et la filière thermique pour produire de la chaleur.

II.4.3.1 Principe des panneaux photovoltaïques : les rayons lumineux percutent les cellules photovoltaïques constituées de matériau semi-conducteur (en général le silicium). La lumière crée un déplacement d'électron dans le matériau et donc la production d'un courant électrique. L'électricité est alors directement utilisée pour des besoins domestiques, stockée dans des batteries ou injectée sur le réseau électrique de distribution public. Il faut 10 m² de panneaux pour obtenir une puissance de 1 kW.

II.4.3.2 Principe des capteurs solaires thermiques : Le flux solaire est directement converti en chaleur pour le chauffage de l'eau ou des habitations, par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques.

Le capteur absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur transmise à un fluide caloporteur (eau + antigel ou air). La chaleur ainsi captée est ensuite transférée vers un réservoir de stockage. Il se présente sous forme de caissons de différentes dimensions, ou sous forme d'éléments séparés à intégrer directement dans l'architecture des bâtiments. Ses dimensions peuvent varier de quelques mètres carrés (individuel) à plusieurs centaines de mètres carrés (installations collectives).

II.4.3.3 Les contraintes

Le coût d'installation des panneaux et capteurs, leur encombrement et leur rendement relativement limité freinent encore le développement de l'énergie solaire. Dans l'avenir des progrès sont escomptés dans le domaine des cellules photovoltaïques, qui devraient permettre la poursuite de la baisse des coûts.

Par ailleurs, il faut prévoir des systèmes de stockage car l'énergie solaire n'existe plus la nuit. Un large développement de l'utilisation des cellules photovoltaïques demandera donc des progrès dans le domaine du stockage d'électricité pour pallier l'intermittence de la fourniture d'énergie.

II.4.4 L'énergie géothermique

La géothermie utilise la température plus élevée du sous-sol de la Terre pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Le principe est d'exploiter le flux géothermique naturel à la surface du globe. En général, ce flux est assez faible et nécessite des dispositifs importants (forage...) pour pouvoir être capté. Cette forme d'énergie ne dépend pas des conditions atmosphériques et a donc l'avantage d'être quasi continu.

Les techniques se sont sophistiquées dans les pompes à chaleur géothermiques, qui absorbent la chaleur du sol via un réseau de capteurs horizontaux ou verticaux, puis la transmettent à des réseaux de chaleur qui la restituent à l'intérieur du logement.

- **Le principe** : La géothermie basse température est la plus facile d'accès : elle représente une énergie d'appoint pour le chauffage des bâtiments, en étant le plus souvent associée à des pompes à chaleur.

Pour produire de l'électricité, on utilise la géothermie à haute énergie, qui exploite des sources hydrothermales très chaudes (en Islande notamment) ou des forages très profonds, dans lesquels on injecte de l'eau sous pression dans la roche. Grâce à la vapeur qui jaillit, on obtient une pression suffisante pour alimenter une turbine et générer de l'électricité.

- **Atouts** : Parmi les énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent) : c'est donc une source d'énergie quasi-continue.

- **Handicaps** : Les coûts d'investissement sont élevés ; on ne peut pas avoir recours à la géothermie partout; les conditions géologiques doivent s'y prêter.

II.4.5 La biomasse

On appelle "biomasse" l'ensemble de la matière végétale qui constitue une importante réserve d'énergie captée par photosynthèse à partir du soleil. L'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques permet de diversifier les sources d'énergie, de gagner en autonomie par rapport aux énergies fossiles et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, pour la production d'énergie, on utilise des produits végétaux "nobles" (betterave, blé, colza, etc.) mais aussi des déchets végétaux (paille) ou animaux (lisiers).

L'énergie de la biomasse est donc produite par combustion de matières biologiques comme le bois, par conversion en biocarburants, ou par extraction de biométhane de déchets organiques dans des méthaniseurs.

Même si la combustion produit des gaz à effet de serre, la biomasse reste une énergie renouvelable : la croissance des arbres absorbe autant de CO₂ que leur combustion n'en libère dans l'atmosphère. Le gaz issue de matières organiques produit par un processus de méthanisation s'appelle « le biogaz ».

II.4.5.1 Biomasse et effet de serre :

La photosynthèse transforme une partie de l'énergie solaire en biomasse végétale tout en absorbant du CO₂. Lorsque l'on brûle celle-ci, on libère de l'énergie et à nouveau du CO₂ (le bilan total CO₂ est nul).

II.4.5.2 Types de biomasse :

On distingue :

- la **biomasse lignocellulosique** : bois, paille, cultures dédiées ;
- la **biomasse alcooligène** : betterave, blé, maïs, etc.
- **les oléagineux** : colza, soja, tournesol, etc.

Focus sur le biogaz

La méthanisation est un processus naturel qui permet la production de biogaz, un gaz riche en méthane, **à partir d'éléments organiques d'origine animale ou végétale**.

- **3 grands gisements de production** : les décharges, les stations d'épuration des eaux usées, les unités de méthanisation conçues spécifiquement pour la valorisation énergétique (déchets agricoles, agroalimentaires, ménagers)
- **3 modes de valorisation** : production d'électricité, production de chaleur, injection dans le réseau de gaz naturel



Figure II.3 : Image d'une unité de méthanisation

II.5 AUTRES FORMES DE PRODUCTIONS ÉNERGETIQUES

II.5.1 L'hydrogène

Bien qu'on le trouve en abondance dans l'univers, l'hydrogène est un gaz qui est généralement combiné avec d'autres atomes : on le trouve notamment dans l'eau, le pétrole ou le gaz naturel. L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique (qui transporte de l'énergie) et aujourd'hui il est produit à partir d'une source d'énergie. Il est utilisé essentiellement dans la chimie, le raffinage ou l'industrie. Mais à l'heure des préoccupations environnementales, l'hydrogène pourrait bien, à terme, jouer un rôle prépondérant dans le paysage énergétique futur.

II.5.1.1 Chimie et hydrogène

La molécule d'hydrogène, composée de deux atomes d'hydrogène, est particulièrement énergétique : 1 kg d'hydrogène libère environ trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence. En revanche, l'hydrogène occupe, à poids égal, beaucoup plus de volume que tout autre gaz. Ainsi pour produire autant d'énergie qu'1 litre d'essence, il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars (700 fois la pression atmosphérique).

Chaque molécule d'eau est le fruit de la combinaison entre 1 atome d'oxygène et 2 atomes d'hydrogène. On trouve aussi de l'hydrogène dans les hydrocarbures (pétrole et gaz) qui sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène.

II.5.1.2 Production de l'hydrogène

Il faut disposer d'une source d'hydrogène (hydrocarbures ou eau) et d'une source d'énergie.

Le gaz naturel est par exemple à la fois source d'hydrogène et source d'énergie. Dans ce cas, la technique de production la plus répandue est le **reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau**.

- Réaction chimique du procédé de reformage : $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

Dans le cas de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, la source d'hydrogène est l'eau et la source d'énergie l'électricité. La production par électrolyse de l'eau est moins répandue car nettement plus coûteuse.

On envisage aussi de produire l'hydrogène à partir de sources d'énergie renouvelables ou nucléaire mais la filière n'est pas encore économiquement rentable.

Aujourd'hui 96 % de l'hydrogène est produit à partir d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel et charbon), solution la plus rentable.

■ Gaz Naturel ■ Hydrocarbures liquides ■ Charbon ■ Electrolyse de l'eau

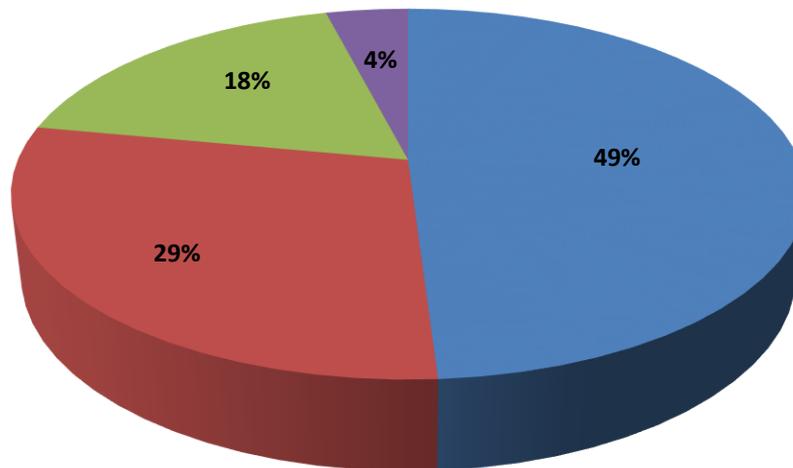


Figure II.4 : Principales origines de l'Hydrogène produites dans le monde (2006)

II.5.1.3 Transport de l'hydrogène

L'hydrogène est très léger, ce qui est un handicap pour son stockage et son transport. On utilise en général des bouteilles ou des pipelines dans lesquels il voyage sous forme comprimée. La forme liquide (à -253°) est beaucoup plus coûteuse. Le pipeline est le moyen le plus utilisé, avec un réseau de plus de 2500 km dans le monde, dont 1500 en Europe et 900 aux Etats-Unis.

II.5.1.4 Domaine d'utilisation de l'hydrogène

La consommation mondiale d'hydrogène est aujourd'hui de 56,6 millions de tonnes, représentant moins de 2 % de la consommation mondiale d'énergie.

Il est notamment utilisé comme matière de base pour la production d'ammoniac et de méthanol et pour le raffinage des produits pétroliers, carburants et biocarburants.

II.5.1.5 Perspectives de son utilisation

Associé aux piles à combustible (par réaction de fusion), l'hydrogène pourrait être utilisé beaucoup plus largement à l'avenir comme vecteur d'énergie pour les transports et la production d'électricité.

II.5.1.6 Les avantages de l'hydrogène

Les bénéfices d'une utilisation étendue de l'hydrogène, en particulier dans le domaine des transports, pourraient être réels : Pas d'émissions de gaz à effet de serre ni de polluants lorsqu'il est issu de sources renouvelables, sa consommation ne provoquant que de la vapeur d'eau.

Pour l'hydrogène produit à partir d'énergies fossiles, solution la plus économique aujourd'hui, il faut régler le problème du gaz carbonique (CO₂) dégagé en quantité importante lors de sa production, sous peine d'annuler l'un de ses principaux atouts. Cette étape pourrait passer par un système de stockage souterrain du CO₂ sur lequel chercheurs et industriels se penchent activement. Même avec le problème de stockage du CO₂, cette filière reste la plus économique des filières de production d'hydrogène.

II.5.1.7 Conclusion

Le vaporeformage du méthane, aujourd'hui procédé ultra-dominant, est condamné à plus ou moins long terme à disparaître dans la transition énergétique pour cause de pollution carbonée massive.

L'électrolyse de l'eau apparaît comme le remplaçant naturel du vaporeformage, Ses technologies sont pour l'essentiel matures et des espaces de progrès en rendements restent ouverts vers les matériaux, les pressions et les hautes températures. Mais ses coûts de production de l'hydrogène sont aujourd'hui rédhibitoires (trois fois ceux du vaporeformage) et dépendent de plus étroitement de ceux de l'électricité décarbonée, donc des prix des filières intermittentes et du nucléaire.

La biomasse apparaît, en appoint significatif de l'électrolyse, comme une solution crédible pour produire du biohydrogène industriel. Mais, là aussi, le coût de la matière première reste trop élevé et privilégie la production, plutôt que d'hydrogène, de biocarburants liquides directement injectables dans les réseaux existants.

La thermochimie enfin, qui permettrait la production massive d'hydrogène, en particulier pour la méthanisation du CO₂ capturé, dépend aujourd'hui de l'industrialisation de réacteurs nucléaires VHTR extrêmement performants qui n'apparaîtront pas avant 2030.

Entre-temps, sauf à ce que l'économie carbone renchérisse les coûts de production de l'hydrogène d'origine carbonée et que la chaîne logistique hydrogène puisse s'appuyer sur des infrastructures existantes, il est fortement probable que la transition énergétique aura privilégié l'autre vecteur d'énergie du futur, à savoir l'électricité décarbonée.

II.5.2 Cogénération

La cogénération consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie **thermique** à flamme et de l'énergie **mécanique**.

La chaleur est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur. L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur (voir figures II.5 et II.6).

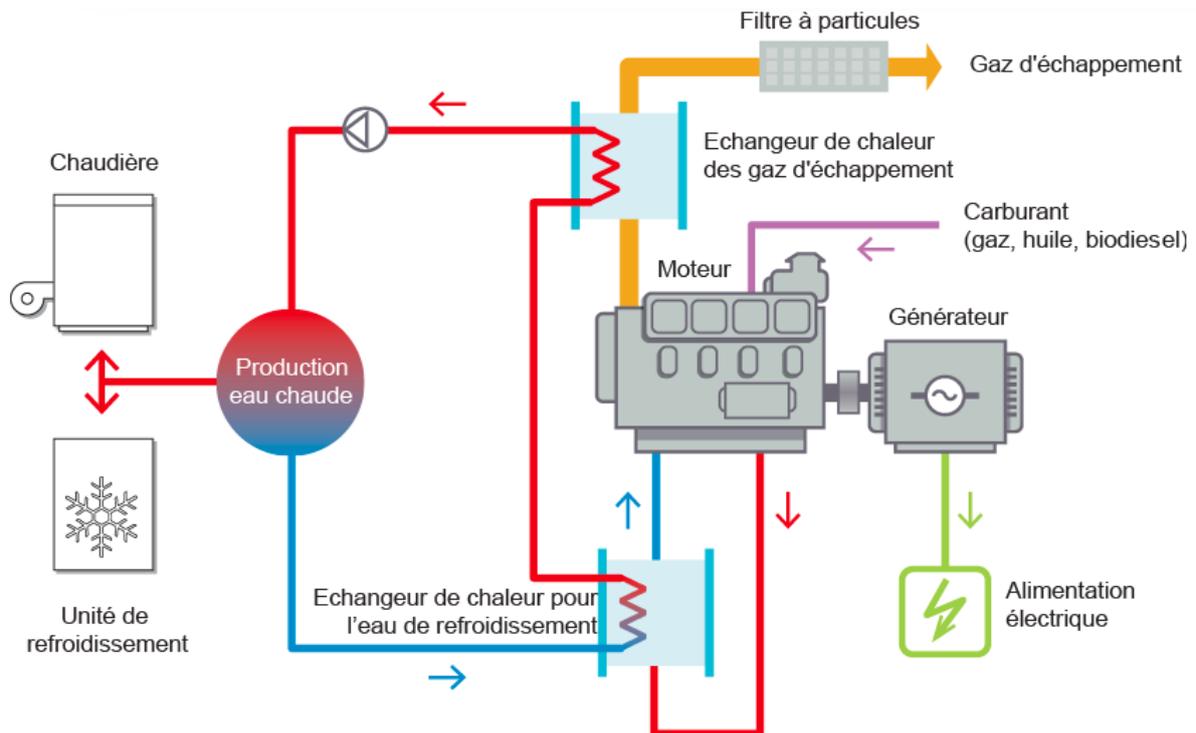


Figure II.5 : Schéma du système de cogénération

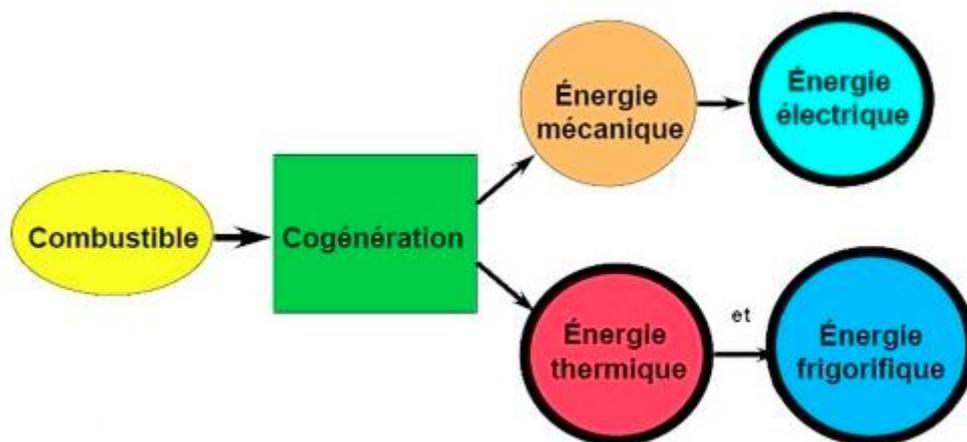


Figure II.6 : Schéma du principe de base du système de cogénération

Parmi les systèmes de cogénération, les centrales thermiques à flamme qui utilisent des énergies fossiles (gaz, fioul, charbon) permettant aussi de produire de l'électricité. La combustion de ces énergies dégage de la chaleur qui est utilisée pour chauffer de l'eau et la transformer en vapeur. Celle-ci est mise sous pression pour entraîner une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

Lors de ce processus, une grande partie de la chaleur est perdue (jusqu'à 60 %) alors qu'elle pourrait servir à d'autres usages. La mise en place d'un système de cogénération dans l'installation permettra de récupérer cette chaleur qui était perdue, en limitant par conséquent les pertes globales.

Au final, dans une centrale thermique à flamme, la cogénération permet d'atteindre un rendement « chaleur produite – énergie utilisée (chaleur + électricité) » de plus de 80 % au lieu de 40 % si la chaleur restante après la production d'électricité n'est pas exploitée.

II.5.2.1 Le système de cogénération dans les sites d'incinération des déchets ménagers

Les déchets brûlés produisent de la chaleur. Grâce à l'installation d'un système de cogénération, cette chaleur est récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine qui permet de produire de l'électricité. Cette électricité peut être consommée par l'usine d'incinération ou transférée au réseau électrique.

Chapitre III

Equivalences des unités énergétiques

Chapitre 3 : Équivalences des unités énergétiques

Ce chapitre sera consacré aux grandeurs énergétiques, à leurs unités ainsi que les définitions des différentes grandeurs énergétiques et leurs conversions.

III.1 DÉFINITION DE L'ÉNERGIE

L'unité de mesure de l'énergie dans la quasi-totalité des pays du monde est le joule (J) du système international d'unités (SI).

Le joule, unité d'énergie, tire son nom d'un physicien anglais James Prescott Joule (1818-1889). Il se consacra à l'étude des sciences notamment dans les domaines électriques, magnétiques et thermiques. Il formula entre autres la loi régissant les dégagements de chaleur provoqués par le passage d'un courant électrique dans un conducteur.

Le *joule* est défini comme *le travail d'une force d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.*

kilojoule (1 kJ soit 10^3 J), mégajoule (1 MJ = 10^6 J), gigajoule (1 GJ = 10^9 J), etc.

Le joule se définit en référence à d'autres unités de masse, de longueur et de temps du Système international, il est une unité dite dérivée ($\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$).

Comme l'énergie existe sous différentes formes, il existe de nombreuses unités différentes selon le type d'énergie :

- pour l'électricité : kiloWatt heure (kWh)
- pour la nourriture : calorie (cal)
- pour le pétrole : tonnes-équivalent pétrole (TEP)
- mesures scientifiques : Joule (J) et Electron-volt (eV)

III.2 LA PUISSANCE

La puissance correspond à un débit d'énergie. Elle est exprimée en watt, du nom du physicien écossais James Watt (1736-1819). Ainsi, elle caractérise l'intensité des transformations énergétiques et le dimensionnement des convertisseurs d'énergie.

Symbole : W ; équivalence $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$

Dans la pratique, contrairement à la plupart des autres unités du Système international, l'énergie est fréquemment mesurée en utilisant d'autres unités que le Joule.

III.3 ÉQUIVALENCES ÉNERGÉTIQUES

III.3.1 *électron-volt (eV) :*

L'énergie cinétique gagnée par un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt, utilisée principalement dans le monde scientifique des physiciens car elle correspond à l'ordre de grandeur de l'énergie d'un électron au sein d'un atome.
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

III.3.2 *erg (erg) :*

L'unité d'énergie constitutive d'un système différent du Système international, appelé CGS (dont les unités de base sont le centimètre, le gramme et la seconde).
 $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$

III.3.3 *calorie (cal) :*

L'unité historique de mesure de l'énergie définie initialement par Nicolas Clément en 1824 comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Celsius la température d'un kg d'eau. Cette définition imprécise a été par la suite spécifiée et déflatée d'un coefficient 1 000 en indiquant qu'il s'agissait de la quantité de chaleur nécessaire pour élever un gramme d'eau dégazée de 14,5°C à 15,5°C sous un bar de pression atmosphérique.
 $1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$

Remarques

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

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

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

III.3.4 *British Thermal Unit (Btu ou BTU) :*

L'unité d'énergie anglo-saxonne définie comme étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Fahrenheit une livre anglaise d'eau dans une atmosphère d'un bar. $1 \text{ BTU} = 1\,055 \text{ J}$

III.3.5 *kilowatt-heure (kW.h ou kWh) :*

Energie consommée par un appareil de 1 000 watts pendant une durée d'une heure. Cette unité est particulièrement utilisée dans les industries électriques. Il est fait usage également du watt-heure (Wh) et des multiples par milliers du kWh que sont le mégawatt-heure (MWh) et le gigawatt-heure (GWh).

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

III.3.6 *tonne de TNT :*

L'énergie libérée lors de l'explosion d'une tonne d'un explosif appelé TNT. Sa valeur est susceptible de varier suivant les conditions de l'explosion. Elle a cependant été normalisée. L'usage de la tonne de TNT est dans la pratique essentiellement réservé au monde militaire.

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

III.3.7 *tonne d'équivalent pétrole (tep) :*

Une tep correspond à l'énergie produite par combustion d'une tonne de pétrole brut standard. Un baril de pétrole standard (159 litres) fournit environ 0,14 tep ou 1 700 kWh, le baril devient ainsi également une unité d'énergie. D'une façon générale, au-delà des hydrocarbures liquides, la relation entre la quantité de combustible et l'énergie produite dépend fortement de la nature du combustible. Ainsi, la combustion d'une tonne de bois de chauffage fournit une quantité d'énergie comprise entre 0,3 et 0,5 tep.

- 1 tep = 7,33 barils de pétrole
- 1 tep = $4,186 \cdot 10^{10} \text{ J}$

III.3.8 *tonne d'équivalent charbon (tec) :*

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

On utilise la (tce) en anglais pour ton coal equivalent) :

- 1 tec = $2,930.10^{10} \text{ J} \approx 8\,140 \text{ kWh}$

III.3.9 *Le cheval-vapeur, autre unité de puissance*

Cette unité de puissance n'est pas retenue dans le système international (SI) mais elle est encore utilisée par les motoristes pour désigner la puissance maximale d'un moteur de voiture, de train, d'avion ou de bateau.

La définition du cheval-vapeur est la puissance développée pour élever une masse de 75 kg d'un mètre en une seconde (Figure ci-dessous). Son abréviation est ch. Cette unité, choisie comme référence pour les machines à vapeur, est de l'ordre de grandeur de l'effort que peut développer un cheval bien constitué. En comparaison de la puissance d'un kilowatt dépensée pour soulever 102 kg à la même vitesse d'un mètre seconde, le cheval-vapeur, soulevant une masse de 75kg représente une puissance de 735 W.

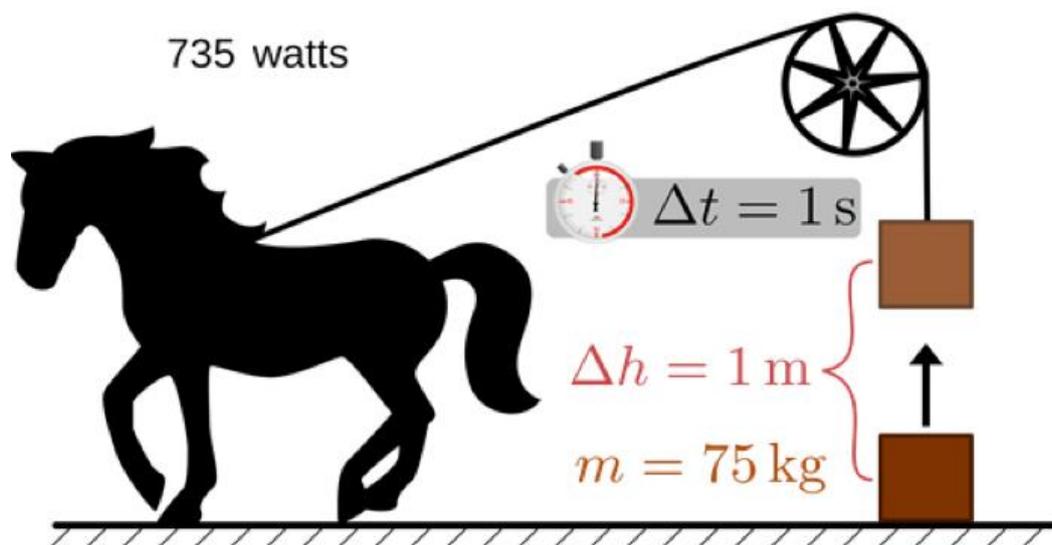


Figure III.1 : Schéma simplifié montrant l'unité du cheval vapeur

Exemple : Voici quelques exemples de puissance de moteurs : pour une voiture moyenne, c'est 100 ch et six fois plus pour une voiture de F1. Pour un TGV entre 9000 et 12 000 ch suivant le modèle. Mais l'usage du cheval-vapeur disparaît peu à peu dans ce secteur laissant le kilowatt comme seule unité de puissance. Cette simplification va dans le bon sens, à condition de garder présent à l'esprit l'ordre de grandeur que le kilowatt représente car le cheval-vapeur évoque bien un ordre de grandeur.

III.4 TABLEAUX DES UNITÉS ÉNERGÉTIQUES ET DE LEURS ÉQUIVALENCES

Tableau III.1 : Tableau de récapitulation des unités énergétiques et de leurs équivalences

Nom	Unité	Equivalence
Énergie	J	1 J = 1 N.m = 1 V.A.s
Puissance	W	1 W = 1 J.s ⁻¹
kilowattheure	kWh	1 kWh = 3600 000 J = 3,6.10 ⁶ J = 3,6 MJ
tonne équivalent pétrole	Tep	1 tep ≈ 11 630 kWh ≈ 41,8 GJ
baril (159 l ou 140 kg)		1 baril ≈ 1700 kWh
électron-volt (particule)	eV	1 eV = 1,602.10 ⁻¹⁹ J
british thermal unit	BTU	1 BTU = 1050 J
quadrillon BTU (US)	quadBTU	1 quadBTU = 10 ¹⁵ BTU

Tableau III.2 : tableau des symboles et des définitions des unités de mesures

Nom et symbole de l'unité de mesure	Définition de l'unité de mesure
baril (bbl)	Unité de mesure d'un volume, spécifique aux produits pétroliers 1 bbl = 158,99 l
Baril équivalent pétrole (bep)	1 bep correspond à l'énergie dégagée par la combustion d'un baril de pétrole
British Thermal Unit (BTU)	Unité de mesure anglo-saxonne de l'énergie 1 Btu ≈ 1055 J
calorie (cal), thermie (th)	Ancienne unité de mesure de l'énergie 1 cal = 4,184 J
cheval-vapeur (ch)	Ancienne unité de mesure de la puissance 1 ch = 735,5 W
gallon (gal)	Unité de mesure anglo-saxonne d'un volume 1 UK gal = 4,546 l et 1 US gal = 3,785 l

Nom et symbole de l'unité de mesure	Définition de l'unité de mesure
degré Celsius (°C)	Unité de mesure de la température, dérivée du système International
mètre cube (m ³)	Unité de mesure d'un volume
mètre cube par seconde (m ³ /s)	Unité de mesure d'un débit
mètre par seconde (m/s)	Unité de mesure d'une vitesse
joule (J)	Unité de mesure officielle de l'énergie
Kilowatt heure (kWh)	Unité de mesure habituelle de l'énergie 1 kWh = $3,6 \times 10^6$ J
pied cube (ft ³ ou cft)	Unité de mesure anglo-saxonne d'un volume 1 ft ³ = 28,32 l
stère (st)	Unité de mesure d'un volume de bois 1 st = 1 m ³ de bûches, incluant les espaces vides entre elles
tonne (t)	Unité de mesure d'une masse
tonne équivalent charbon (tec)	1 tec correspond à l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de charbon 1 tec = 0,66 tep (en moyenne)
tonne équivalent pétrole (tep)	1 tep correspond à l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole
watt (W)	Unité de mesure officielle d'une puissance

III.5 CONVERSIONS ENTRE UNITÉS

Tableau III.3 : tableau de conversion entre unités énergétiques

Equivaut à :	1GJ	1tep	1MBtu	1kWh	1m ³ de Gaz	1 baril de Pétrole
1GJ	1	0,0238	0,948	278	23,89	0,1751
1tep	41,855	1	39,68	11628	1000	7,33
1MBtu	1,0551	0,0252	1	293,1	25,2	0,185
1kWh	0,0036	0,086 10 ⁻³	3,412 10 ⁻³	1	0,086	630,4 10 ⁻⁵
1m ³ de Gaz	0,041855	10 ⁻³	0,03968	11,628	1	7,33 10 ⁻³
1 baril de Pétrole	5,7	0,1364	5,4	1580	136,4	1

III.6 FACTEURS DE CONVERSION DES PRODUITS ÉNERGÉTIQUES

Tableau III.4 : tableau des équivalences qui permettent d'assurer la conversion énergétique des produits les fréquemment utilisés.

<p>Pétrole :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 tonne = 6,84 barils • 1 baril/jour pendant 1 an \approx 50 t • 1 tep = 41,868 GJ • 1 tep = 11 628 kWh • 1 bep = 5,8 MBtu 	<p>Gaz Naturel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 m³ = 38 MJ • 106 m³ \approx 910 tep • 1 cf = 1020 Btu • 109 cf \approx 25 tep
<p>Charbon :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 t = 0,7 tep (houille) • 1 t = 0,55 tep (charbon sous-bitumineux) • 1 t = 0,25 tep (lignite) 	<p>Électricité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 MWh = 0,2606 tep (équivalence à la production) • 1 MWh = 0,086 tep (équivalence à la consommation)

ÉNERGIES FOURNIES PAR QUELQUES MATÉRIAUX

- 1 kg d'anthracite (teneur en humidité : 4 %) = 36 MJ = 10 kWh
- 1 kg charbon (teneur en humidité : 5 à 10 %) = 37 MJ = 10,3 kWh
- 1m³ de gaz naturel = 39 MJ = 10,8 kWh
- 1 litre d'essence = 34 MJ = 9,4 kWh
- 1 litre de carburant diesel = 40 MJ = 11,1 kWh
- 1 litre de gasoil = 41 MJ = 11,4 kWh
- 1 litre de mazout = 44 MJ = 12,2 kWh

(Les valeurs ci-dessus se fondent sur le pouvoir calorifique supérieur, la vapeur d'eau étant supposée condensée.)

- A titre de comparaison, 1 kg de carburant de source renouvelable tel que la biomasse d'origine forestière produit généralement 4,2 kWh.

III.7 CALCUL DU NOMBRE DE CALORIES D'UN ALIMENT**III.7.1 1ère méthode :** "méthode d'analyse des constituants d'un aliment"

Les aliments, grâce aux nutriments, apportent de l'énergie au corps humain. Cette énergie est quantifiée sous forme de calorie. Il existe trois nutriments différents : les protéines, les lipides, les glucides. Chaque gramme de nutriment apporte une quantité d'énergie particulière:

- 1 gramme de protéine : 4 calories
- 1 gramme de lipide : 9 calories
- 1 gramme de glucide : 4 calories.

Le calcul est donc simple pour connaître l'apport en calorie d'un aliment : il suffit de connaître la composition en nutriments de l'aliment et d'additionner la quantité de protéines, de lipides, de glucides.

Combien de calories pour 100 grammes de lait?

- 3.3g de protéines, soit 13.2 calories (3.3*4)
- 1.5g de lipides, soit 13.5 calories (1.5*9)
- 4.5g de glucides, soit 18 calories (4.5*4)

Pour connaître l'apport calorique de 100 grammes de lait, il nous faut donc additionner les nutriments :

$$13.2 + 13.5 + 18 = 44.7 \text{ calories.}$$

✓ Les 100g de lait apportent donc 44.7 calories.

III.7.2 2ème méthode : "méthode expérimentale"

Calculons cette fois ci l'énergie d'un aliment, la noisette :

Soit une noix de masse m qu'on brule pour évaluer son énergie emmagasinée par le process du *transfert de chaleur* et le principe de *conservation d'énergie*.

- La masse de la noix passe est de 1.75 g à 0.39 g après combustion totale de la noix.
- Le volume d'eau utilisé est conservé et est de 25 ml.
- L'eau passe de 22 °C à 95 °C à la fin de l'expérience.

Données :

$$C_{\text{eau}} = 25 \text{ J/}^\circ\text{K.kg}$$

Question :

Calculer l'énergie que peut fournir 100 g de noix.

Réponse :

- Masse de noix brulée :

$$m(\text{brulée}) = 1.75 - 0.39 = 1.36 \text{ g}$$

- Variation de température :

$$\Delta T = 95 - 22 = 73 \text{ }^\circ\text{C ou }^\circ\text{K}$$

- Masse d'eau qui a subit l'élévation de température est de 25 g.

- L'énergie absorbée par l'eau est de :

$$E = m_{\text{Eau}} \cdot C_{\text{eau}} \cdot \Delta T = 25 \cdot 4.2 \cdot 73 = 7665 \text{ J}$$

- L'énergie dégagée par la combustion de 1g de noix est :

$$7665 / 1.36 = 5636 \text{ J/g}$$

- Pour 100 g :

$$563.6 \text{ KJ}$$

Chapitre IV

***Productions et consommations
mondiales d'énergies, réserves
et prévisions***

Chapitre 4 : Productions et consommations mondiales d'énergies, réserves et prévisions

IV.1 INTRODUCTION

La production d'énergie mondiale atteint 10 milliards de tonnes équivalent pétrole (tep) chaque année. Elle est majoritairement dominée par le pétrole, le gaz et le charbon. Le gaspillage des pays riches et l'intéressement de nombreux pays en voie de développement qui sont très peuplés tendent légitimement à augmenter massivement leur consommation dans les décennies à venir. On prévoit une augmentation de 50 à 300% de la production mondiale d'énergie d'ici 2050.

Une telle augmentation ne pourra se faire sur le modèle actuel, basé sur les énergies fossiles, dont les réserves sont limitées, et dont l'utilisation conduit à des émissions massives de CO₂ responsable d'un changement climatique de grande ampleur. Le développement de nouvelles sources d'énergie est aujourd'hui incontournable, quelques soient les efforts que nous pourrons faire dans la maîtrise de la demande. Ces sources alternatives sont bien connues et relativement bien quantifiées.

- Le **nucléaire** apparaît comme la seule source non renouvelable disponible et capable de nous fournir le quota d'énergie demandé, mais nécessite une mobilisation importante de capitaux, de l'acceptation publique et du développement technologique pour la maîtrise du processus nucléaire.
- L'énergie **solaire** est un gisement important. Sa mise en œuvre reste relativement chère et complexe, mais elle est très compétitive dans les zones dépourvues de réseaux électriques.
- L'énergie **éolienne** représente un gisement très intéressant pour les pays exposés aux forces du vent. La production électrique est limitée et ne dépasse les 10% de la production électrique mondiale.
- La **biomasse** est une voie intéressante, mais difficile de développer à grande échelle.
- Les autres sources (**géothermie, vagues, marées, ..**) restent limitées pour répondre aux besoins à grande échelle de la demande énergétique.
- Pour la production de l'**hydrogène**, le stockage de cette énergie est loin d'être maîtrisé. Il représente un défi technologique important, et pourrait rendre les énergies intermittentes plus intéressantes dans l'avenir.
- Enfin, la **fusion thermonucléaire** représente une source massive, mais risque de ne pas être disponible avant la fin du siècle. Si le développement de l'électro-nucléaire au niveau mondial est sans doute la façon la plus rapide pour lutter contre l'effet de serre, cela ne sera en aucun cas suffisant.

Le défi énergétique et climatique auquel nous sommes confrontés, nécessite la mise en place de la capture du CO₂ émis par les centrales utilisant des combustibles fossiles et un développement soutenu des énergies renouvelables. Les alternatives aux énergies fossiles

présentent leurs propres inconvénients, mais il n'est pas certain que nous ayons encore le choix.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différentes statistiques touchant les formes d'énergies produites, consommées dans le monde ou nous vivons, ainsi que la répartition des énergies selon les différentes régions du monde et voir les raisons sociopolitiques qui interagissent dans cette répartition.

Le choix de notre étude s'est fait sur les statistiques des sources d'énergies utilisées recueillies sur l'année 2019 en comparaison avec ceux des années 1973 et 2018.

Mais avant, il est primordiale de présenter un terme fréquemment utilisé par les spécialistes du domaine de l'énergie qu'est le mix énergétique.

IV.2 DÉFINITION DU MIX ÉNERGÉTIQUE

Le **mix énergétique**, ou **bouquet énergétique**, est la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées dans une zone géographique donnée.

La part des énergies primaires dans la consommation mondiale, d'un pays, d'une collectivité, d'une industrie est généralement exprimée en **pourcentages**. Toutes les sources d'énergies primaires sont comptabilisées, notamment celles consommées pour les transports, le chauffage des bâtiments, etc.

Le mix électrique, avec lequel il ne doit pas être confondu, ne prend en compte que les sources d'énergie contribuant à la production d'électricité ; or l'électricité ne représente que 18,5 % de la consommation finale d'énergie au niveau mondial

IV.3 LE MIX ÉNERGÉTIQUE MONDIAL EN 2019

Les 3 principales sources d'énergies utilisées dans le monde sont : le **pétrole**, le **gaz naturel** et le **charbon** (3 énergies fossiles). A elles trois elles représentent 84,3% de la consommation énergétique mondiale. Le reste constituant les 15,7% sont de type renouvelable **énergies renouvelables** sont en progression. La transition énergétique est donc bel et bien en marche. Mais à tout petits pas.

Le pétrole et le charbon sont en recul sur 2019. Ces deux énergies ont perdues leur domination du marché énergétique mondial face au Gaz Naturel, considéré par certains comme une étape dans la transition énergétique du fait de son fort pouvoir calorifique associé à des rejets en CO₂ 30% inférieurs à ceux du charbon.

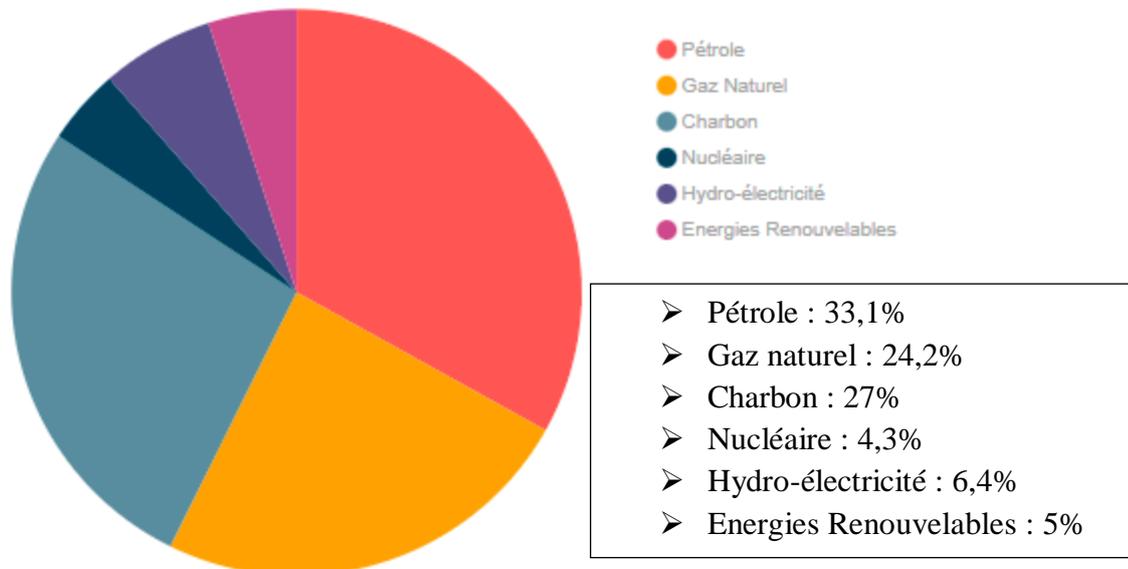


Figure IV.1 : Le mix énergétique mondial en 2019

IV.4 LES DIFFÉRENTES ÉNERGIES UTILISÉES DANS CHAQUE ZONE DU GLOBE

a) *CIS : Communauté d'Etats indépendants* : En matière de mix énergétique, on observe d'importantes disparités entre les continents. Le Moyen Orient utilise 98,8% d'énergies fossiles : 45,9% de pétrole, 51,8% de gaz naturel et 1% de charbon. Rien de surprenant pour cette zone qui est la principale productrice d'hydrocarbures au monde.

b) *Le continent Africain* dispose également de réserves de pétrole et de gaz naturel, mais sans commune mesure avec la zone moyen orientale. Son mix énergétique reste néanmoins très carboné (avec 91,3% d'énergie fossile). Le pétrole y occupe une place de choix (41,7%).

c) *La zone Asie et Pacifique* a au final un mix énergétique comparable à celui de l'Afrique (87,4% d'énergie carbonée). La grosse différence entre les deux zones réside dans le charbon qui est extrêmement utilisé en Asie où il représente 47,5% de l'énergie consommée.

d) Nous retrouvons ensuite les pays de la Communauté d'États Indépendants regroupant la fédération de *Russie* et des pays tels que l'*Ouzbékistan*, le *Tadjikistan*, le *Kazakhstan*... Leur mix énergétique est résolument tourné vers le fossile (89,5%), et en particulier vers le gaz naturel, ces pays disposant des principales réserves mondiales.

e) *L'Amérique du Nord et l'Europe* sont légèrement moins tournés vers les énergies rejetant du carbone (respectivement 81,7% et 73,6%)... Le nucléaire y occupe une place non négligeable (9,9 % pour l'Europe et 7,4% pour l'Amérique du Nord). L'Europe est également la zone la plus impliquée en matière d'énergie renouvelable (9,8% de son mix énergétique).

f) Pour autant, *l'Europe* n'est pas la zone la plus "verte" du globe. La première place revient à l'Amérique Latine, qui en plus de disposer 9,5% d'énergies renouvelables profite de très importantes infrastructures hydroélectriques. L'énergie qui y est produite couvre 22,3% de toute sa consommation énergétique.

IV.5 DÉFINITION DU RATIO RP

Le calcul du ratio R/P est le rapport des réserves prouvées sur la consommation constatée qui conduit à un chiffre qui caractérise la durée de vie des réserves. Ce chiffre reste néanmoins une estimation référentielle et pas absolue car il dépend de :

1. d'une part les progrès dans la recherche et l'exploitation des gisements ont tendance à augmenter le taux de récupération et donc, par là même, le volume des réserves prouvées et la « durée » de ces réserves,
2. d'autre part, la croissance de la demande dans les prochaines décennies conduit au doublement de la consommation annuelle ce qui a évidemment l'effet inverse sur la « durée » des réserves.

IV.6 RÉSERVES MONDIAUX D'ÉNERGIES

Le tableau IV.1 ci-dessous résume la situation en ce qui concerne le pétrole, le gaz naturel et les minéraux solides (charbon, bitumineux et lignite). Le fait que les 2/3 de ces réserves de pétrole soient situées au Moyen Orient dont 80% dans les Pays de l'OPEP, ne sera peut-être pas à l'avenir sans incidence sur le plan géopolitique. Néanmoins, les découvertes et les exploitations récentes de gaz de schistes, mieux répartis sur la surface du globe, semblent pouvoir modifier ces conclusions ainsi que la géopolitique associée, en augmentant significativement le R/P du gaz naturel. C'est ainsi, par exemple, que les USA, gros importateurs d'hydrocarbures jusqu'en 2010, deviennent maintenant exportateurs de gaz de schistes.

Tableau IV.1 : Tableau des réserves d'énergies primaires fossiles (base 2017)

	Réserves mondiales prouvées	R/P (au rythme actuel de la consommation) (années)
Pétrole (GTep $\equiv 10^9$ tep)	239,3	50,2
Gaz naturel (trillions m ³ $\equiv 10^{18}$ m ³)	193,5	52,6
Minéraux solides (milliards tonnes $\equiv 10^9$ t)	1035	134

IV.7 PART DE L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE MONDIAL

La part de l'approvisionnement en énergie dans le monde a vu une nette progression depuis 1973. Le développement socioéconomique des puissances mondiales, l'émergence des pays asiatiques tel : la Chine, l'Inde et la Corée du sud ont permis et la modernisation qui a touché les pays en voie de développement ont contribué à améliorer la consommation des différentes sources d'énergies fossiles ou renouvelables. Cette part en énergie de 2019 évaluée à 606 EJ a dépassée le double de ce qui se consommait en 1973 évaluée à 254 EJ (plus de 250%).

En ce qui concerne les sources d'énergies, nous remarquons à travers les chiffres des statistiques de 1973 et de 2019 que les sources fossiles ont conservées leurs dominations avec une légère avance du Gaz Naturel et un apport stable pour le Pétrole et le Charbon.

Les sources de type renouvelable connaissent depuis, une croissance et un intérêt au projet de la transition énergétique que connaît le monde depuis 1973 ; année de la crise énergétique mondiale.

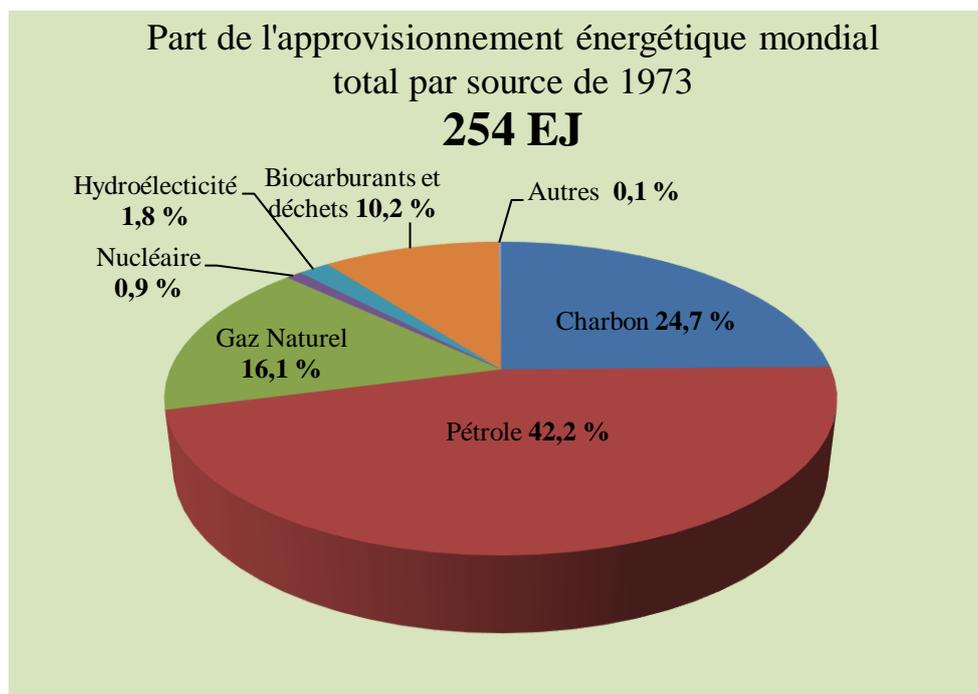


Figure IV.2 : Part de l'approvisionnement énergétique mondial par source de 1973

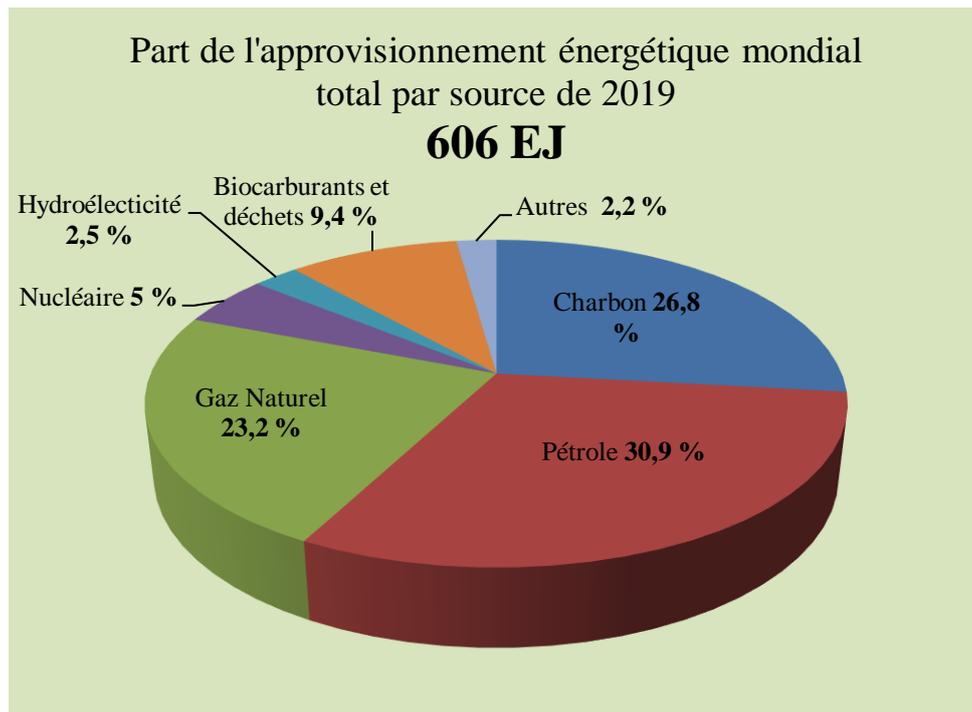


Figure IV.3 : Part de l'approvisionnement énergétique mondial par source de 2019

IV.8 LA CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE

En 2019, la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de 1,3 %. Une augmentation deux fois moins importante que celle de 2018 (2,8 %), et sous la moyenne de celle des 10 dernières années (1,6 %). Le gaz et les énergies renouvelables concentrent les $\frac{3}{4}$ de la croissance.

IV.8.1 Classification de la consommation énergétique

Sur le podium, le Pétrole occupe la première place, avec 33,1 % de la consommation mondiale. Il est principalement consommé en Asie-Pacifique et en Amérique du Nord (60,3 % de la consommation mondiale).

Deuxième place pour le charbon (27 %), dont la consommation diminue dans les pays de l'OCDE mais augmente dans les pays émergents, particulièrement en Chine et en Indonésie.

Enfin, le gaz naturel (24,2 %) est sur la 3^{ème} marche, très dominant dans la CEI et au Moyen-Orient. Dans le monde, la consommation de gaz naturel a augmenté de 2 %.

IV.8.2 La consommation d'énergie et sa répartition dans le monde

Sans surprise, les pays les plus peuplés sont aussi les plus consommateurs d'énergie : la Chine (18,5% de la population mondiale), l'Inde (17,7 %) et les USA (4,25 %).

« Plus un pays se développe, plus la demande d'énergie par habitant augmente »

En 1999, 24 % de la population mondiale consommait plus de 75,7 GJ/habitant (consommation moyenne mondiale). En 2019, ce chiffre est passé à 43 %.

En 2019, la Chine représente plus des trois quarts de la croissance mondiale d'**énergie primaire**. Mais ce pays ne figure qu'à la 42^{ème} place de la consommation d'énergie par habitant, loin derrière le Qatar, Singapour, et Trinidad et Tobago, le trio de tête. Les États-Unis, eux, sont 10^{ème}.

Le tableau IV.2 ci-dessous montre bien ces disparités de consommation par habitant :

Tableau IV.2 : Tableau de la consommation mondiale d'énergie primaire par habitant en 2019.

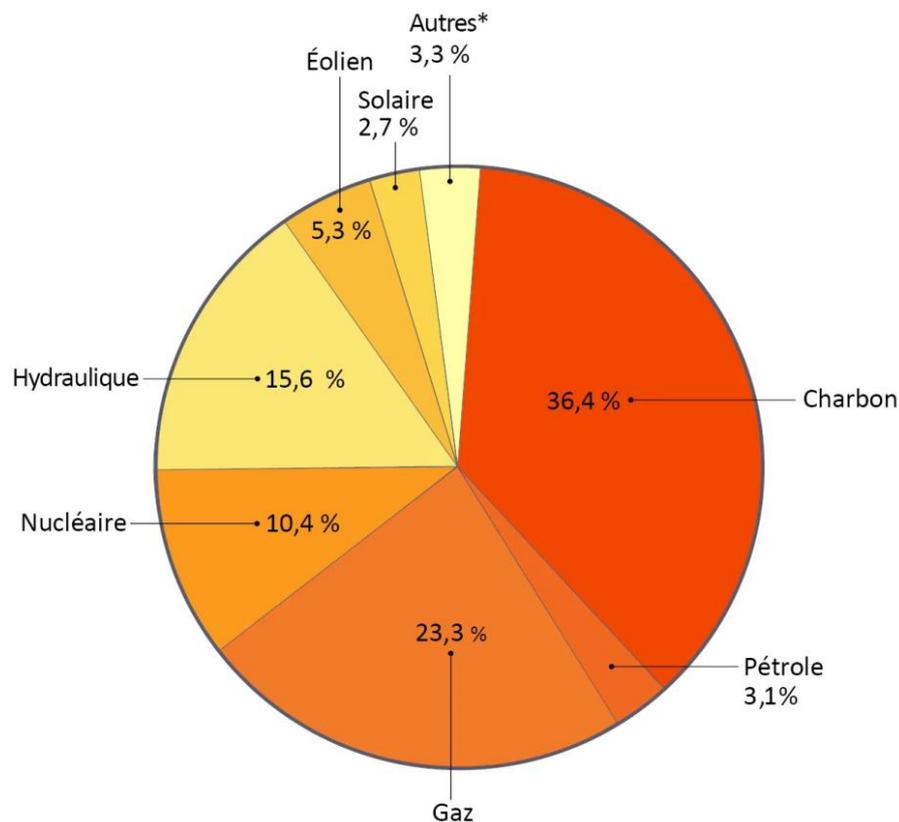
Pays	% de la population mondiale	% de la consommation mondiale	% de la consommation par rapport à la consommation moyenne par habitant (75,7 GJ)
Chine	18,47	24,27	130,51
Inde	17,70	5,83	32,89
Afrique	17,2	3,40	20,07
Europe	9,59	14,36	163,27
Etats-Unis	4,25	16,21	379,92

- La consommation par habitant aux USA est presque 20 fois supérieure à celle de l'Afrique, alors que les Américains sont 4 fois moins nombreux.
- Les Chinois sont 4 fois plus nombreux que les Américains, mais leur consommation est 3 fois moins importante.
- Les Européens, qui sont deux fois plus nombreux que les Américains, consomment plus de 2 fois moins d'énergie par habitant.

Lorsqu'on s'intéresse à la consommation par habitant, on voit bien que les conditions de vie et le niveau de développement du pays ont une forte influence. Les modes de vie des pays développés ne cessent d'évoluer : baisse des dépenses dans l'habillement et l'alimentation, mais hausse dans la communication, la santé, les transports et les loisirs, des secteurs pour la plupart très énergivores.

IV.9 MIX ÉLECTRIQUE MONDIAL

La production électrique repose sur l'utilisation de plusieurs formes de sources d'énergie. La figure IV.4 suivante présente les différents pourcentages des sources d'énergies responsables sur la production électrique dans le monde. Nous pouvons voir que le Charbon occupe la part majoritaire des matériaux devant le Gaz Naturel suivie de l'énergie hydromotrice et du Nucléaire



* Géothermie, biomasse, déchets et autres sources d'énergie renouvelable.

Figure IV.4 : Production électrique par source d'énergie en 2019

IV.10 CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET SON IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

Plus de consommation signifie plus d'énergie dépensée, plus d'émissions de **CO₂**, plus de déchets, plus de pollution. Les individus comme les États doivent faire face à leurs responsabilités, puisque la consommation est en partie responsable de la dégradation de l'environnement. Les individus peuvent changer leurs habitudes de consommation et les États peuvent agir : loi pour la **transition énergétique**, lutte contre l'obsolescence programmée des objets, modification du **mix énergétique**.

IV.11 LA LUTTE CONTRE LA PRÉCARITÉ ÉNERGÉTIQUE

Cette différence en termes de consommation par habitant se retrouve aussi au sein d'un même pays. Certaines personnes, du fait de leurs faibles revenus, souffrent de **précarité énergétique**. L'État peut alors prendre des mesures pour les aider : réduire les coûts de l'énergie grâce à des tarifs sociaux, des subventions, des aides au paiement de la facture ou des aides à la rénovation de l'habitat.

IV.12 LES PERSPECTIVES D'AVENIR POUR L'ÉNERGIE

L'avenir énergétique mondial repose sur l'application des intentions encore hésitantes des puissances économiques mondiales pour la réduction de l'utilisation des énergies fossiles et leur substitution par des sources d'énergies renouvelables afin de préserver l'environnement et de stopper l'effet néfaste du réchauffement climatique et de l'effet de serre causés principalement par l'utilisation abusif de ces sources fossiles.

Indépendamment de la fourniture des différentes énergies, l'avenir du secteur d'énergie doit passer par les **innovations technologiques**, tel que :

- le **stockage massif de l'électricité**,
- les **véhicules à hydrogène**,
- la meilleure coordination de la production et de la consommation, la compétitivité des filières d'**énergies renouvelables**
- ou encore la montée en **puissance** du **mix électrique** décarbonné.

Chapitre V

Les sources d'énergie en Algérie

Chapitre 5 : Les sources d'énergie en Algérie

V.1 INTRODUCTION

L'Algérie compte exclusivement sur les hydrocarbures; principalement sur le gaz naturel pour produire son énergie électrique. L'accroissement effréné de la demande nationale risque de controvertiser la balance énergétique du pays. Les volumes de gaz naturel qui devraient être extraits pour le marché domestique sont de 45 milliards de mètres cubes (Gm^3) en 2020 et de 55 Gm^3 en 2030, ceci sans compter les volumes qui seront dédiés à l'exportation. La consommation d'électricité a avoisinée 75 à 80 trillions de watts heure (TWh) en 2020 et devra atteindre 130 à 150 TWh en 2030.

De ce fait, l'intégration massive des sources d'énergie renouvelables dans le mix-énergétique représente un défi majeur pour la préservation des ressources fossiles, lesquelles peuvent être utilisées dans l'industrie pétrochimique. Les combustibles fossiles ne sont pas renouvelables, c'est-à-dire que le pays s'appuie sur des ressources limitées dont le stock ne cesse de diminuer, devenant trop onéreuses à exploiter. En revanche, les nombreux types de sources énergétiques renouvelables, comme l'énergie solaire et éolienne, sont constamment renouvelés et ne s'épuiseront jamais.

La plupart des énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. La lumière du soleil, ou l'énergie solaire, peut être utilisée directement pour le chauffage et l'éclairage des maisons et autres bâtiments, pour la production d'électricité, le chauffage de l'eau chaude, le refroidissement solaire et diverses utilisations commerciales et industrielles. Cependant, le principal problème est de produire l'énergie destinée aux installations industrielles du pays. L'Algérie s'est lancée dans un vaste et ambitieux programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.

V.2 SOURCES D'ÉNERGIE EN ALGERIE (NON-RENOUVELABLES)

V.2.1 Pétrole

V.2.1.1 Réserves de pétrole

Les réserves prouvées de pétrole en Algérie étaient estimées à 1,5 milliard de tonnes fin 2020 (12,2 milliards de barils), soit 27 années de production au rythme de 2020. Ces réserves classaient l'Algérie au 17^e rang mondial avec 0,7 % du total mondial, et au 4^e rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola.

Les figures V.1 et V.2 montrent clairement une stabilité des réserves pétrolières dues aux quantités découvertes par les équipes de forage dédiées aux recherches de futurs gisements pétroliers.

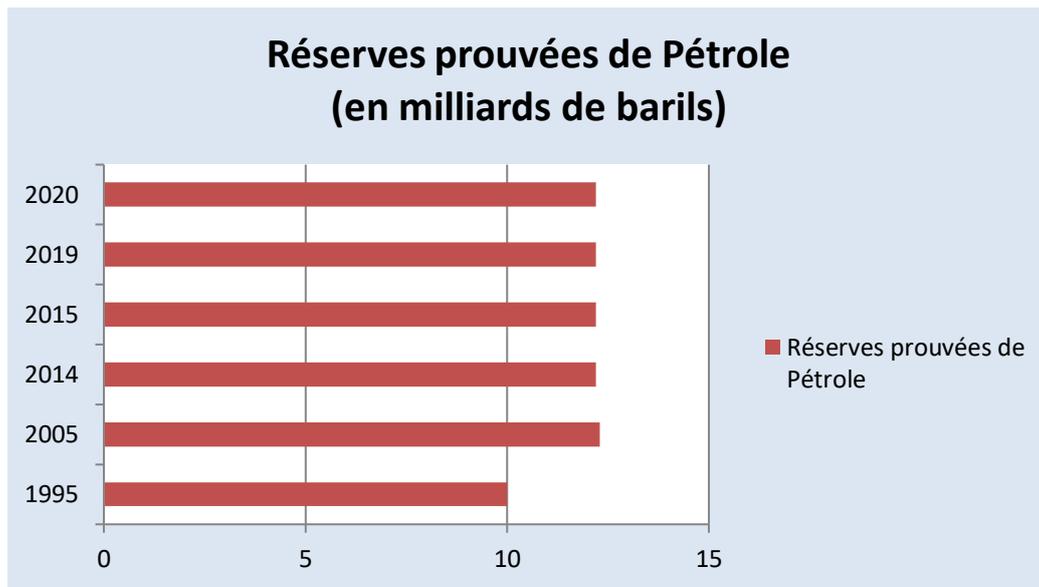


Figure V.1 : Réserves prouvées de Pétrole en Algérie



Figure V.2 : Courbe de statistiques des réserves de pétrole en Algérie

V.2.1.2 Production de pétrole

En 2020, l'Algérie a produit 68,5 Mt (millions de tonnes) de pétrole, soit 1,122 Mb/j (millions de barils par jour), en baisse de 0,4 % en 2015 et de 20,3 % depuis 2005. Elle se classe au 18^e rang mondial avec 1,6 % de la production mondiale et au 3^e rang en Afrique derrière le Nigeria (2,6 %) et l'Angola (2,0 %)

Actuellement, la production de Pétrole a chuté depuis la crise mondiale du COVID-19 et avoisine les 1,486 Mb/j ; c'est-à-dire 10% de moins à l'année 2015.

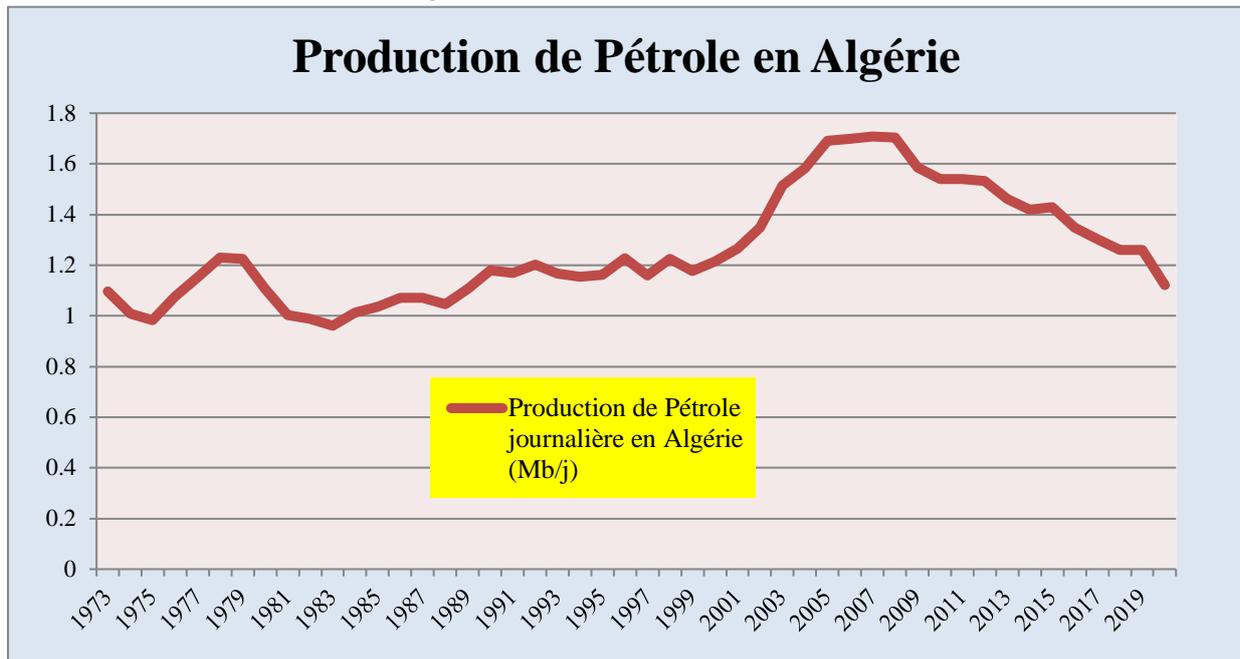


Figure V.3 : Production de Pétrole en Algérie

V.2.2 Le gaz Naturel

V.2.2.1 Réserves de Gaz naturel

Les réserves prouvées de gaz naturel de l'Algérie étaient estimées à 4 300 milliards de m³ fin 2019 (152,03 trillions US de pieds cubes), soit 51 années de production au rythme de 2019. Ces réserves classaient l'Algérie au 10^e rang mondial avec 2,4 % du total mondial, et au 2^e rang en Afrique derrière le Nigeria.

V.2.2.2 Production de gaz naturel

En 2019, l'Algérie a produit 86,2 milliards de m³ de gaz naturel, soit 77,58 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole), en baisse de 8,1 % par rapport à l'année de 2018. Elle se classe au 9^e rang mondial avec 2,3 % de la production mondiale et au 1^{er} rang en Afrique

Tableau V.1 : Tableau estimatif de la quantité de gaz naturel produite en Algérie

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Production de Gaz Naturel	76.6	77.4	79.6	78.4	79.3	80.2	81.4	91.4	93.0	93.8	86.2

V.2.3 Énergie nucléaire

Pour que l'Algérie diversifie ses sources d'énergie afin de faire face à l'après-pétrole, l'énergie nucléaire est parmi les sources énergétiques qui pourrait remplacer le pétrole et le gaz, sa matière première est abondante dans le sud du pays.

L'Algérie dispose de deux réacteurs nucléaires :

1. le réacteur nucléaire de Draria sur les hauteurs d'Alger est un réacteur nucléaire de recherche à eau légère d'une puissance de 3 Mégawatt. Il est conçu pour utiliser de l'uranium enrichi à 20 %, un modérateur en graphite et un refroidissement à l'eau légère. Construit en collaboration avec l'entreprise argentine INVAP, il a été inauguré officiellement en 1989.

2. et le réacteur d'Aïn Oussara à 250 km au sud d'Alger construit par les Chinois, d'une capacité de 15 MW. Le **réacteur nucléaire d'Aïn Oussara** également nommé **Essalam** est en fait un réacteur nucléaire de recherche algérien, destiné à :

- la production de produits radiopharmaceutiques,
- à l'analyse par activation neutronique,
- à l'exploration de la matière
- et à la formation.

Il peut délivrer une puissance de 15 Mégawatts. Il fut construit en coopération avec la Chine dans la région de Aïn Oussara, à 200 km au sud d'Alger qui est en service depuis 1993. Ce réacteur à eau lourde fonctionne avec de l'uranium naturel. Il avait suscité, dans les années 1990, des craintes américaines à cause de sa taille et de la large défense aérienne dont il bénéficiait.

V.2.3.1 Réserves de l'Algérie en Uranium

La disponibilité de réserves conséquentes d'Uranium et les perspectives de leur accroissement ainsi que la nécessité de leur valorisation à moyen et long termes : les gisements d'Uranium ont été découverts dans les années 1970. Près de 30000 tonnes d'Uranium, réparties dans quatre gisements, existeraient au sud de la région de Tamanrasset. Les perspectives de développement du secteur de l'Uranium en Algérie sont considérables, en particulier dans les régions du Hoggar et de Tindouf.

V.3 SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES EN ALGÉRIE

Un programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) a été lancé en l'Algérie en 2012 et qui visait une perspective d'installation de dispositifs d'énergies d'origine renouvelable et d'atteindre l'objectif des 22 000 MW de puissance d'ici 2030.

En 2015, l'Algérie a annoncé qu'elle a installé 270 MWc au cours de l'année, portant sa puissance solaire totale à 300 MWc

V.3.1 Perspectives énergétiques en Algérie

L'Algérie a adopté fin février 2015 un programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national.

Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13 575 MWc de solaire *photovoltaïque*,
- 5 010 MW d'*éolien*,
- 2 000 MW de *solaire thermodynamique* (CSP),
- 1 000 MW de *biomasse* (valorisation des déchets),
- 400 MW de *cogénération*,
- 15 MW de *géothermie*.

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4,5 GW qu'on devait atteindre en 2020. En raison de leurs coûts élevés, les centrales hélio-thermodynamiques ne seront véritablement développées qu'à partir de 2021. Ce programme devra permettre à l'Algérie de produire 27 % de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030 afin d'épargner ses réserves gazières.

Le groupe Sonelgaz s'est investi dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables. Dans son programme de développement des énergies renouvelables, le groupe prévoit la réalisation de 67 projets de centrales électron-solaires, dont :

- 27 centrales photovoltaïques,
- 27 centrales hybrides,
- 6 centrales solaires thermiques
- et 7 centrales éoliennes.

Les plus puissantes centrales solaires seront de type solaire thermique, avec une capacité maximale de 400 MW pour l'une d'entre elles. Pour une question d'efficacité optimale, elles seront toutes installées dans les régions du sud, notamment dans les wilayas d'Adrar, d'El Oued et de Béchar.

V.3.2 Énergie solaire

Pour préserver les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire.

Afin de concrétiser son programme d'exploitation de l'énergie solaire, l'Algérie a construit une centrale électrique mixte de Hassi R'Mel, mise en service en 2011 à **Tilghemt** dans la wilaya de Laghouat dans le sud du pays, d'une capacité de 150 mégawatts (30 MW solaire thermodynamique + 120 MW gaz).

La première usine privée algérienne de fabrication de panneaux solaires a été opérationnelle en 2012 avec un taux d'intégration nationale de 90 %.

V.3.2.1 Centrale Photovoltaïque de 1,1 MW de Ghardaïa

La centrale PV de Ghardaïa compte parmi les projets d'avenir énergétique du pays. Son potentiel de production a permis l'autonomie énergétique de toute région de la wilaya de Ghardaïa les tableaux V.2 et V.3 suivants mentionnent les matériaux semiconducteurs utilisés dans les panneaux PV et leurs rendements.

Tableau V.2 : Liste des matériaux PV utilisés dans la centrale de Ghardaïa

Panneau PV en :	Puissance en KWc	Surface en m ²	Energie produite en MWh/an
1. Si mono fixe 1	252	1661	464,7
2. Si mono fixe 2	100	684	188,3
3. Si mono motorisé	100	684	250,2
4. Si Poly fixe 1	252	1791	472,1
5. Si Poly fixe 2	100	684	177,1
6. Si poly motorisé	100	684	235,4
7. s-Si	100	1409	187,1
8. CdTe	100	907	193,6

Tableau V.3 : Tableau des caractéristiques électriques de la centrale de Ghardaïa

Désignation	Caractéristiques
Configuration	452 kWc mono cristallin 452 kWc mono cristallin 100 kWc CdTe 452 kWc Amorphe
Puissance totale	1100 kWc
Evacuation d'énergie	Poste 30 kV de Oued Nechou
Energie annuelle produite	2,1 GWh (irradiation global horizontal : 2110 kWh / m ² ; RP moy : 77%)
CO ₂ évité / an	

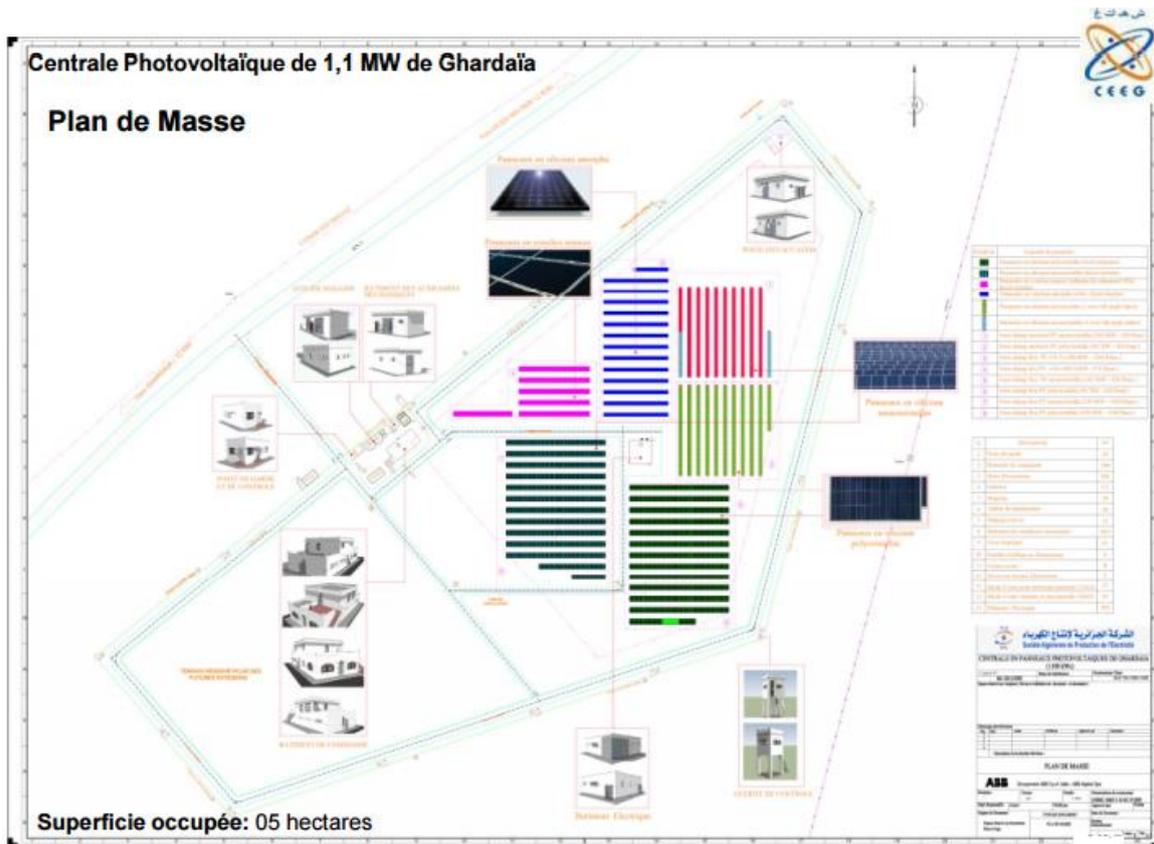


Figure V.4 : Plan de masse de la centrale de Ghardaïa

V.3.2.2 Photothermie

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune ont été lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire. Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1200 MW ont été mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

V.3.3 Énergie éolienne

Un autre domaine des énergies renouvelables est à développer et promouvoir en Algérie, c'est l'énergie éolienne. Un projet portant sur la réalisation d'une ferme éolienne à Adrar. Ce complexe éolien est d'une puissance de 10 MW et a été mis en service le 03 juillet 2014, alors que d'autres projets programmés dans le plan du gouvernement sont en attente de concrétisation.

V.3.3.1 Ferme Éolienne de 10,2 MW d'Adrar

Le site choisi pour accueillir des installations éoliennes est dans la wilaya d'Adrar. C'est après avoir mené plusieurs études dans le laboratoire de mesures météorologique, il s'est avéré que cette région de Adrar est idéale à cause de la disponibilité semi continue de la force du vent suffisant pour actionner les pales d'une éolienne qui est de l'ordre de 8 m/s.

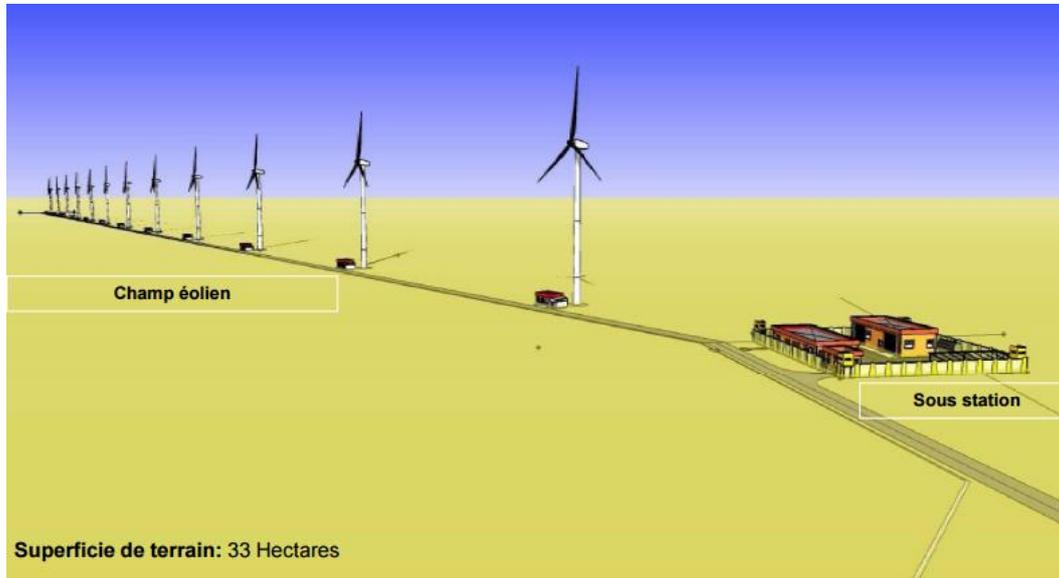


Figure V.5 : Image de la centrale éolienne d'Adrar

Les caractéristiques de cette ferme de production électrique à caractère éolien sont données dans le tableau V.4 suivant.

Tableau V.4 : Tableau des caractéristiques électriques de la centrale éolienne de Adrar

Désignation	Caractéristiques
Nombre d'éoliennes	12 (type Gamésa G52)
Nombre de pales	3 / éolienne d'une longueur de 26 m
Hauteur de mât	55 m
Puissance unitaire	850 kW
Evaluation d'énergie	Poste 230/30 kV de Kabertene
Energie annuelle produite	3,42 GWh ($V_{\text{moy}} : 8,5 \text{ m/s}$; $d_{\text{air}} : 1,225 \text{ Kg / m}^3$)
CO ₂ évité / an	Environ 1000 tonnes

V.4 PLAN DE RELANCE D'ÉNERGIE VERTE EN ALGÉRIE

La transition énergétique occupe une place importante dans le plan d'action du gouvernement qui se focalise sur « la sécurité alimentaire, la transition énergétique ». Le programme de transition énergétique vise, outre la diversification des sources énergétiques à travers le développement des énergies renouvelables, la promotion de l'efficacité énergétique en tant qu'action complémentaire de grande importance. Le pays ambitionne ainsi de s'affranchir de manière progressive de la dépendance vis-à-vis des ressources conventionnelles et amorcer une dynamique d'émergence d'une énergie verte et durable, disponible localement et en abondance comme le solaire.

La démarche, s'articule en fait sur les considérations suivantes :

- La préservation des ressources fossiles et leur valorisation ;
- Le changement du modèle énergétique de production et de consommation ;
- Le développement durable et la protection de l'environnement ;
- La maîtrise des coûts de réalisation des installations des énergies renouvelables.

Un appel d'offre de réalisation de centrale hybride essentiellement au sud Algérien est lancé pratiquement à la période de décembre 2018. Cet appel d'offre a été initié pour hybrider par du solaire photovoltaïque certaines de ses centrales diesel ou turbines à gaz, utilisées pour la génération d'électricité au profit des Réseaux Isolés du Sud (RIS). Neuf centrales solaires photovoltaïques totalisant 50 MWc (voir Tableau V.5 ci dessous).

Tableau V.5 : Données d'attribution du marché d'énergie hybride (Gaz ou Diesel / Photovoltaïque) de 50 MWc pour site isolé de 2019

N°	Désignation	Puissance photovoltaïque (MWc)
1	In Guezzem	6
2	Tinzaouatine	3
3	Djanet	4
4	Bordj Omar Driss	3
5	Bordj Badji Mokhtar	10
6	Timiaouine	2
7	Talmine	8
8	Tabelbala	3
9	Tindouf	11

Un programme de développement des énergies renouvelables d'une capacité de 16.000 MW à l'horizon 2030 et ce, exclusivement à base de solaire photovoltaïque, a été soumis comme une des pièces maîtresses de la transition énergétique en Algérie, selon le ministère de l'énergie. Ainsi, 15 000 MWc sont destinés à être produits exclusivement par des

centrales solaires connectées au réseau électrique national, dont une première tranche de 4000 MWc est à réaliser à l'horizon 2024 alors que les 1000 MWc restant, sont à déployer en autonome à l'horizon 2030.

Tableau V.6 : Perspectives énergétiques vertes à l'horizon de 2030

	Capacité jusqu'en 2020 (MWc)	Capacité prévue jusqu'en 2030 (MWc)	Capacité souhaitée (MWc)
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
photothermique	/	2 000	2 000
Eolien	1 010	4 000	5 010
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
Total	4 525	17 475	22 000

Nous pouvons voir au tableau V.6 ci-dessus que la composante solaire traduite par la quantité d'énergie du potentiel photovoltaïque et photothermique est très conséquente, c'est donc le domaine que le gouvernement mise dessus. Aussi, toute action permettant une optimisation accrue de la consommation interne de l'énergie, serait encouragée au même titre que celle pouvant contribuer à prolonger la durée de vie de nos réserves d'hydrocarbures en diversifiant les moyens de production d'énergie alternatives, notamment base de ressources renouvelables.

Cette reconversion, conjuguée au développement des énergies renouvelables notamment à travers surtout la composante solaire, dont jouissent assez équitablement toutes les régions du territoire national, permettrait d'assurer des revenus plus stables pour le pays qui, pourrait alors mener sereinement sa politique de développement, loin de certains aléas extérieurs.

Références Bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. « L'énergie : Ressources, technologies et environnement », Christian Ngô, 3^{ème} édition, Dunod, 2008.
2. Cours sur LES ENERGIES RENOUVELABLES, 1^{ère} année SM, Mohammed Benamar SIAD.
3. Xavier Pinon, « Les différentes sources d'énergie », 2022.
<https://www.kelwatt.fr/energie.php>
4. « 10 Million Metric Tons of Hydrogen Produced Annually in the United States », Energy.gov, mai 2018.
5. Bilan énergétique de la France en 2018, Ministère de la Transition écologique et solidaire.
6. « Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? », Note d'analyse de France Stratégie, août 2014.
7. « Could green hydrogen fuel a reduced-carbon world ? », Morgan Stanley, août 2018.
8. La thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, cours en ligne et simulateur de thermodynamique appliquée, 2022.
<https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/equivalences-energetiques.html>
9. « The Statistical Review of World Energy analyses data on world energy markets from the prior year. The Review has been providing timely, comprehensive and objective data to the energy community since 1952 », BP Statistical Review of World Energy, 2020
10. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, (2019).
11. World Population prospect (hydrocarbures), Online Edition, Rev 1, 2019.
12. Tableau de bord de la précarité énergétique, ONPE, Édition 2020 (1^{er} semestre),
13. Étude sur les perspectives stratégiques de l'énergie, Commission de régulation de l'Énergie, , mai 2018.
14. BP Statistical Review of World Energy 2020
15. « La consommation mondiale d'énergie en 2019 », Planète énergie médias, 2019
16. « Energies, Les ressources » , Jean Marie CHEVALIER, Daniel CLEMENT, François MOISAN et Jean Pierre TABET, universalis.
Site : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/production-d-energie/>

17. « Des réalisations et des engagements », Bilan Energétique National, Sonatrach, Edition 2018.
18. « L'énergie renouvelable en Algérie Quelles alternatives aux énergies fossiles? Solaire, nucléaire ou les deux à la fois », L'Energie renouvelable en Algérie, Revue de l'Énergie n° 609, 2012.
19. « Le Système Énergétique De L'Algérie, Développement d'un modèle de phases pour une transformation durable », Sibel Raquel Ersoy, Julia Terrapon-Pfaff, Mai 2021.
20. « Transition Énergétique en Algérie : Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Énergies Renouvelables », CEREFÉ, édition 2020.