



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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Industries Pétrochimiques**

Spécialité : **Génie du Raffinage**

Présentée par : **ARROUK Abdeslem**

Thème

**PERSPECTIVE DE DECARBONISATION PAR
L'INTEGRATION DU MIX ENERGETIQUE EN
ALGERIE**

Déposé le 20 / 09 / 2021

Devant le Jury :

Miloud AISSAT	Président	MAA	Univ-Tissemsilt
Rachid CHELLALI	Encadreur	MCB	Univ-Tissemsilt
Hanane MAHROUG	Examinatrice	MCB	Univ-Tissemsilt
Laila KERAI	Examinatrice	MAA	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Résumé :

Les énergies fossiles sont la première source d'énergie au monde, et avec la forte consommation d'énergie résultant principalement de la croissance démographique, du développement industriel et des risques d'épuisement des ressources fossiles, en plus du problème de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, il est devenu nécessaire de les pays du monde à revoir leurs politiques énergétiques à travers l'utilisation d'un mix énergétique durable basé sur les énergies renouvelables.

La décarbonisation et l'exploitation des énergies renouvelables en Algérie étant une nécessité absolue, l'Algérie a lancé un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables. L'objectif de cette étude est d'expliquer les stratégies nationales qui contribueront à la décarbonisation et à la transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables et propres.

Mots clés: Energies fossiles, réchauffement climatique, mix énergétique, énergies renouvelables, décarbonisation.

Abstract

Fossil fuels are the first energy source in the world, and with the large consumption of energy resulting mainly from demographic growth, industrial development and the risks of depleting fossil resources, in addition to the problem of increasing greenhouse gas emissions, it has become necessary for the countries of the world to review their energy policies through the use of a sustainable energy mix based on Renewable energy.

Decarbonization and exploitation of renewable energies in Algeria is an absolute necessity. Therefore, Algeria launched an ambitious program to develop renewable energies. The aim of this study is to explain the national strategies that will contribute to decarbonization and the transition from fossil fuels to renewable and clean energies.

Keywords: Fossil fuels, global warming, energy mix, renewable energies, decarbonization.

الملخص :

الوقود الأحفوري هو المصدر الطاقوي الأول في العالم ، ومع الإستهلاك الكبير للطاقة الناتج أساسا عن النمو الديموغرافي والتطور الصناعي ومخاطر إستنفاد الموارد الأحفورية إضافة لمشكلة تزايد إنبعاثات غازات الإحتباس الحراري، أصبح من الضروري على دول العالم مراجعة سياساتها الطاقوية وذلك من خلال إستعمال مزيج طاقي مستدام بالإعتماد على الطاقات المتجددة.

إزالة الكربون وإستغلال الطاقات المتجددة في الجزائر ضرورة مطلقة، لذلك أطلقت الجزائر برنامجا طموحا لتطوير الطاقات المتجددة. الهدف من هذه الدراسة هو شرح الإستراتيجيات الوطنية التي ستساهم في إزالة الكربون والإنتقال من الوقود الأحفوري إلى طاقات متجددة ونظيفة.

كلمات مفتاحية: الوقود الأحفوري، الإحتباس الحراري، مزيج طاقي، الطاقات المتجددة، إزالة الكربون.

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier Dieu le tout puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste mémoire.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Dr CHELLALI Rachid pour ses précieux conseils, sa patience, son aide et ses orientations ficelées tout au long de mon travail.

Mes remerciements les plus distinguées vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens à remercier tous les professeurs et administrateurs de l'Institut des sciences et technologies de l'Université de Tissemsilt.

Mes remerciements sont aussi à tous mes ami(e)s et collègues

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Merci à tous et à toutes

Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance envers :

Mon père Mohammed Saleh qu'ALLAH vous fasse miséricorde.

Ma mère l'amour de ma vie, qu'ALLAH la récompense.

Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

Je le dédie également à :

Tous mes frères...

Toutes mes sœurs...

Tous mes amis...

En un mot, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour m'aider.

ARROUK ABDESLEM

Liste des figures

Figure (I-1): La structure atomique du carbone	6
Figure (I-2): Les principaux réservoirs de carbone sur Terre	7
Figure (I-3): Cycle du carbone total	8
Figure (I-4): Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone	14
Figure (I-5): Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone pendant la période de 1970 a 2020	16
Figure (I-6): Mécanisme de l'effet de serre	18
Figure (I-7) : L'effet des GES sur la température de la terre	19
Figure (I-8): La différence de température moyenne mondiale	19
Figure (I-9): Structure de la molécule de dioxyde de carbone CO ₂	22
Figure (I-10): Le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre	24
Figure (I-11): Emissions humaines de GES	25
Figure (II-1): Schéma des installations éventuelles de CSC montrant les sources qui pourraient convenir, ainsi que les options de transport de CO ₂ et de stockage	31
Figure (II-2): Schéma de systèmes de la captage CO ₂	33
Figure (II-3): Méthodes de stockage du CO ₂ dans des formations géologiques profondes	37
Figure (II-4): Aperçu des principes de stockage dans les océans	39
Figure (II-5): Flux des matières et étapes de la carbonatation minérale de roches silicatées ou de résidus industriels	40
Figure (II-6): Les différents types d'énergies renouvelables	43
Figure (II-7): La centrale géothermique de Kra a pour la production d'électricité	48
Figure (II-8): Les quatre piliers de la décarbonisation	50
Figure (III-1): Atlas éolien de l'Algérie	56
Figure (III-2): Localisation des sources géothermales du nord de l'Algérie	57
Figure (III-3): Répartition des usages de la filière EnR en Algérie	63
Figure (III-4): Plan directeur de l'AIE pour la neutralité carbone d'ici 2050	65

Liste des tableau

Tableau (I-1): Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources	20
Tableau (I-2): Les grandes sources fixes mondiales de CO ₂	22
Tableau (II-1) : Les techniques de technologie de captage du CO ₂	32
Tableau (II-2): Les techniques de technologie de stockage du CO ₂	41
Tableau (II-3): Les sites dans lesquels des opérations de stockage du CO ₂ ont été réalisées sont en cours ou sont prévues au sein de projets pilotes ou d'applications commerciales à grande échelle	42
Tableau (II-4): La production d'électricité solaire dans le monde	45
Tableau (II-5): La production d'électricité éolienne dans le monde	47
Tableau (II-6): Les différents énergies et leurs émissions de CO ₂	49
Tableau (III-1): Potentiel solaire en Algérie par région	55

Liste de abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AIE : Agence International de l'Energie

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CSC : Captage et Stockage du Carbone

EnR : Energies Renouvelables

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GNL : Gaz de Naturel Liquéfié

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA : International Renewable Energy Agency

ONU : Organisation des Nation Unies

PIB : Produit Intérieur Brut

PV : Photovoltaïque

UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change

SOMMAIRE

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Liste de figures	
Liste de tableaux	
Liste de abréviations	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I: Généralités sur le changement climatique	
Introduction	5
I.1. Le carbone	5
I.1.1. Généralités sur le carbone	5
I.1.2. Les réservoirs de carbone de la Terre	6
I.1.3. Le cycle du carbone	8
I.1.3.1. Les processus biochimiques du cycle du carbone	8
I.1.3.2. Les processus géochimiques du cycle du carbone	10
I.2. Les combustibles fossiles	11
I.2.1. La définition de combustible fossile	11
I.2.2. L'origine des combustibles fossiles	11
I.2.3. Utilisations des combustibles fossiles	12
I.3. Le changement climatique	13
I.3.1. Les principales causes du changement climatique	14
I.3.1.1. Causes humaines	14
I.3.1.2. Causes naturelles	17
I.4. L'effet de serre	17
I.4.1. La définition de l'effet de serre	17
I.4.2. Mécanisme de l'effet de serre	18
I.4.3. Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources	20
I.4.4. L'effet de serre naturel déséquilibré par les activités humaines	24
I.5. L'utilité de la décarbonisation	25
Conclusion	27

Chapitre II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Introduction	30
II.1. Technologie de décarbonisation	30
II.1.1. La technologie de captage et de stockage du CO ₂ (CSC)	31
II.1.1.1 Les systèmes de la captage CO ₂	32
II.1.1.1.1. Le captage du carbone pré-combustion	33
II.1.1.1.2. Le captage du carbone post-combustion	34
II.1.1.1.3. Le captage du carbone oxy-combustion	34
II.1.1.1.4. Les techniques de séparation utilisées dans CSC	35
II.1.1.1.5. Les matériaux sont utilisés dans CSC	35
II.1.1.2. Les systèmes de la transport CO ₂	36
II.1.1.3. Les systèmes de la stockage CO ₂	36
II.2. Les énergies renouvelables et le mix énergétique	42
II.2.1. Généralités	42
II.2.2. Les différents types d'énergies renouvelables	43
II.2.2.1. L'énergie solaire	44
II.2.2.2. Energie éolienne	45
II.2.2.3. Energie hydraulique	47
II.2.2.4. Energie géothermique	47
II.2.3. Les énergies renouvelables et les émissions de CO ₂	48
II.2.4. Quelques exemples de décarbonisation	49
Conclusion	51

Chapitre III : Les énergies renouvelables en Algérie : potentiel et perspectives

Introduction	53
III.1. Généralités sur la situation énergétique en Algérie	53
III.1.1. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	54
III.1.1.1. Le potentiel solaire	54
III.1.1.2. Le potentiel éolien d'Algérie	55
III.1.1.3. Le potentiel de l'énergie géothermique à l'Algérie	57
III.1.1.4. Le potentiel de la biomasse	57
III.1.1.5. Le potentiel hydraulique	58
III.1.2. La stratégie énergétique algérienne dans le contexte du développement durable ..	58
III.1.2.1. Programme National pour le développement des CES	58
III.1.2.2. Loi sur la gestion de l'énergie	59

III.1.2.3. Loi sur la distribution d'électricité et de gaz par canalisation	59
III.1.2.4. Loi relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable	60
III.1.2.5. Quelques projets	60
III.1.2.6. L'économie de l'énergie en Algérie	61
III.1.2.7. Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables	62
III.1.2.8. Projets en cours et à venir	63
III.2. Les perspectives Mondiales et nationales dans ce contexte	65
Conclusion	69
CONCLUSION GÉNÉRALE	71
Références bibliographiques	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La transformation du système énergétique est un enjeu majeur du XXI^e siècle. La croissance de la population mondiale et du produit intérieur brut (PIB) augmente la demande d'eau, de nourriture et d'énergie alors que les ressources de la Terre sont limitées et s'épuisent. Jusqu'à présent, la croissance du PIB entraîne une croissance de la consommation d'énergie qui entraîne une augmentation de l'extraction et de la production d'énergie. Cette augmentation de la consommation d'énergie affecte et modifie l'environnement.

Selon les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le réchauffement climatique est dû à l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'air qui renforce l'effet de serre naturel de l'atmosphère (GIEC 2018). En outre, le GIEC conclut également que les activités humaines affectent négativement l'environnement. Elle conduit à une dégradation des écosystèmes de plus en plus alarmante.

Bien qu'il y ait de nombreux avantages à utiliser l'énergie fossile, l'un des inconvénients est la combustion de combustibles fossiles, qui est l'un des principaux facteurs de pollution de l'air et la cause du réchauffement climatique causé à son tour par les gaz (Surtout le dioxyde de carbone CO₂) qui enveloppent l'atmosphère et empêchent la chaleur réfléchi de la Terre de le transférer à l'extérieur de la planète, provoquant une augmentation des températures mondiales, une augmentation de la désertification et de la sécheresse.

Il est désormais clair que les émissions anthropiques de GES, principalement issues de la combustion du charbon, du pétrole et du gaz, provoquent une accélération du changement climatique mondial qui constitue un défi majeur à relever de toute urgence. Une telle reconnaissance croissante de la menace du changement climatique et de la sécurité énergétique a motivé de nombreux pays à essayer de réduire leurs émissions de GES et de diminuer leur dépendance aux combustibles fossiles.

L'objectif de cette étude est de montrer la nécessité de recourir dans un premier temps à la décarbonation par l'exploitation des énergies renouvelables, en commençant par l'utilisation du mix énergétique et l'abandon des énergies fossiles pour maintenir la sûreté et la sécurité de notre environnement. Un autre objectif est de montrer la stratégie poursuivie par l'Algérie dans le domaine des énergies renouvelables.

L'Algérie cherche à développer des projets d'énergies renouvelables, et à bénéficier des expériences de nombreux pays, afin de réaliser sa stratégie de transformation énergétique et la tendance à la décarbonisation. Pour cela, notre problématique consiste à savoir quelle est la situation de l'Algérie sur la technologie de décarbonisation ? et quelles sont les stratégies utilisées pour passer à un mix énergétique propre ?

A travers les questions posées, deux hypothèses sont proposées :

Première hypothèse : La technologie de décarbonation en Algérie n'est pas appliquée, et elle dépend des combustibles fossiles.

Deuxième hypothèse : la décarbonation en Algérie est en train de se développer et la stratégie suivie repose sur le lancement de projets dont la priorité est les énergies renouvelables.

Pour traiter ces deux hypothèses, ce travail sera divisé en trois chapitres :

Chapitre 01: la relation du carbone avec le changement climatique et l'effet de serre d'où l'utilité de la décarbonisation.

Chapitre 02: les techniques utilisées pour la décarbonisation mettre l'accent sur les énergies renouvelables et le mix énergétique en particulier dans le Monde.

Chapitre 03: la Situation en Algérie des énergies renouvelables et le mix énergétique et les perspectives Mondiales et nationales dans ce contexte.

CHAPITRE I :

***GENERALITES SUR LE CHANGEMENT
CLIMATIQUE***

Introduction

Toute matière vivante, végétale ou animale, est constituée de carbone lié à l'hydrogène, l'oxygène et/ou l'azote. Sans carbone, la vie n'existerait pas. Il est la base de la vie sur notre planète (et, éventuellement, dans l'Univers). Nous devons notre bonne fortune aux combustibles fossiles porteurs de carbone (carburants carbonés) qui ont alimenté la révolution industrielle et apporté le niveau de vie sans précédent dont nous bénéficions actuellement.

L'économie mondiale fonctionne à l'énergie et l'énergie fonctionne aux combustibles carbonés : pratiquement tous les biens et services nécessitent leur apport et, à mesure que la demande pour ces biens et services ne cesse de croître, la quantité de combustibles carbonés consommée augmente également. En raison du rôle le plus critique que les combustibles carbonés ont joué et continuent de jouer dans la création et le maintien de notre civilisation industrielle, cette dernière est souvent appelée civilisation du carbone. [1]

La Terre se réchauffe plus rapidement de nos jours avec une augmentation de la quantité de gaz à effet de serre, qui comprennent le dioxyde de carbone, le méthane et certains autres gaz dans l'atmosphère, et c'est ce qu'on appelle le phénomène de réchauffement climatique qui a de nombreux impacts sur notre planète et notre vie en général.

Le réchauffement climatique a de nombreux effets, comme moins de pluie, de sécheresse et d'élévation du niveau de la mer. En plus des tempêtes et des impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement naturel, économique, sanitaire et environnemental.

I.1. Le carbone

I.1.1. Généralités sur le carbone

Le carbone (du latin « carbo » qui signifie « charbon ») est l'élément chimique non métallique de symbole "C". Il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, infusible et combustible. Il est présent dans de nombreux composés naturels dont : le gaz carbonique de l'atmosphère, roches calcaires et combustibles (gaz, pétrole, charbons minéraux).

Le carbone est de plus un constituant fondamental de la matière vivante (il entre dans la composition de tous les tissus animaux ou végétaux). Les composés du carbone sont innombrables, ce qui a conduit les chimistes à créer un domaine particulier pour les étudier "la Chimie Organique". Les dérivés composés de carbone sont eux très nombreux, on en dénombre aujourd'hui 15 millions. Il n'y a pas de limites à la taille ou à la forme des molécules qui peuvent être formées avec des atomes de carbone, car le carbone a la capacité de former de longues chaînes les uns avec les autres (la possibilité de former des chaînes infinies d'atomes).

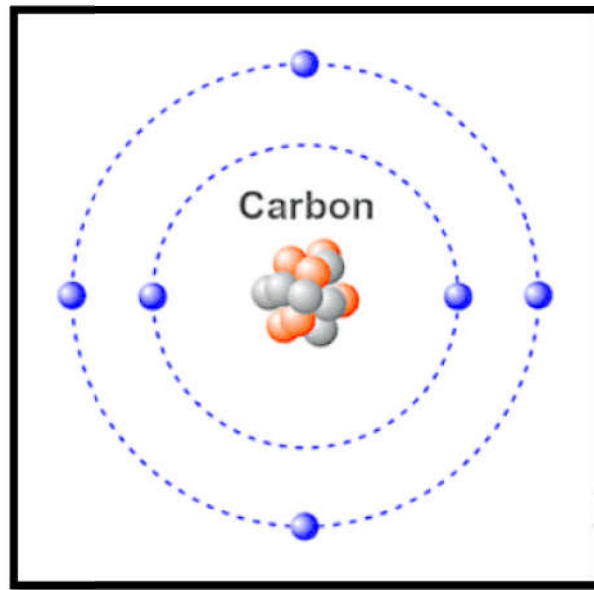


Figure (I-1) : La structure atomique du carbone

Le carbone ne se dissout pas et ne réagit pas avec l'eau, les acides ou la plupart des autres substances. Mais il réagit avec l'oxygène où il brûle avec l'air pour donner du dioxyde de carbone CO_2 et du monoxyde de carbone CO . Où la combustion du charbon a donné une impulsion à la révolution industrielle

I.1.2. Les réservoirs de carbone de la Terre

L'abondance du carbone sur notre planète est étonnamment faible : la lithosphère ne contient que 0,032% en poids de carbone sous toutes ses formes. Au cours de l'échelle de temps géologique, la plupart du carbone sur Terre s'est enfermé dans les roches sédimentaires sous forme de carbonates et de combustibles fossiles, et une partie importante s'est dissoute dans les océans sous forme d'ions CO_2 , carbonate (CO_3^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-).

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

Les données disponibles montrent que la concentration atmosphérique de CO_2 a progressivement atteint le niveau d'environ 0,02 à 0,03 % en volume et a fluctué dans cette plage pendant environ un demi-million d'années.

Le carbone est stocké sur notre planète dans les principaux réservoirs de carbone suivants [1] :

- Organismes vivants et morts dans la biosphère.
- CO_2 dans l'atmosphère.
- Matière organique des sols.
- Dépôts de combustibles fossiles.
- CO_2 dissous et carbonates dans l'océan.
- Carbonates et autres dépôts de roches sédimentaires dans la lithosphère.

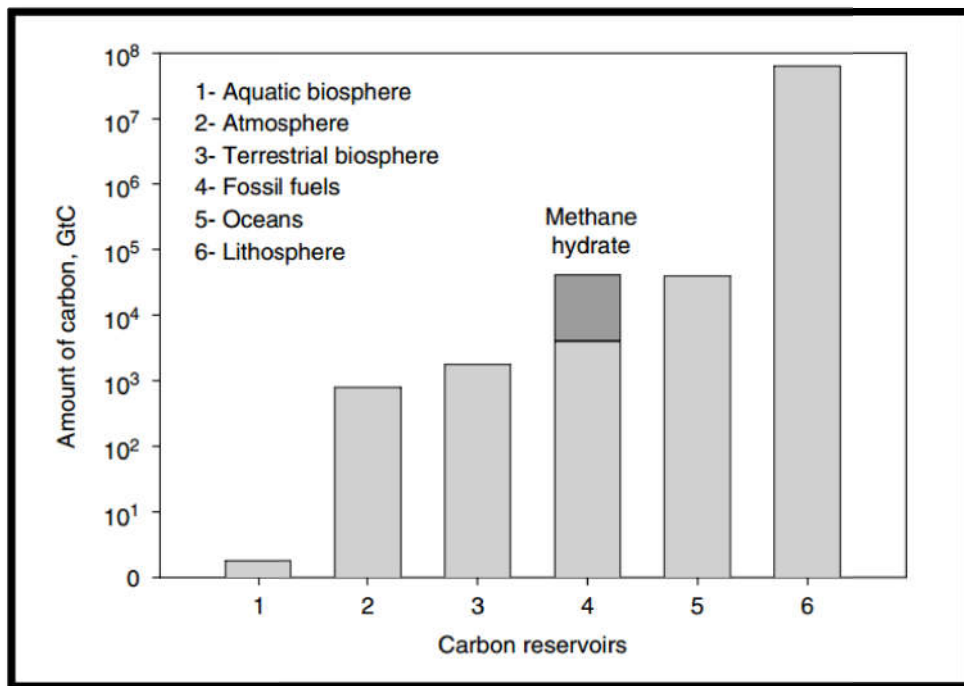


Figure (I-2) :Les principaux réservoirs de carbone sur Terre [1]

Les dépôts inorganiques de carbone dans la lithosphère (calcaire, dolomie, craie et autres carbonates) représentent le plus grand réservoir de carbone de notre planète. Alors que les dépôts de carbone organique (le carbone dans la biosphère comme les plantes et les organismes, et la matière organique du sol comme l'humus) représentent une part beaucoup plus faible du stock total de carbone que les formes inorganiques de carbone.

I.1.3. Le cycle du carbone

Le cycle du carbone est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges de carbone sur la planète. Il existe un échange constant de carbone entre l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. Toutefois, l'essentiel du cycle à court terme se déroule entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et des océans ainsi que la biosphère. Il existe deux grands réservoirs de carbone qui le piègent pour une longue période : la lithosphère et l'hydrosphère grâce aux sédiments, aux roches et aux océans. [1]

Le recyclage chimique du carbone est un élément critique pour le maintien de l'équilibre de notre planète. En effet, ce cycle influence directement la productivité biologique et le climat. Parmi les processus qui permettent le recyclage chimique du carbone, certains sont très rapides (processus biochimiques) alors que d'autres se déroulent sur plusieurs centaines d'années (processus géochimiques).

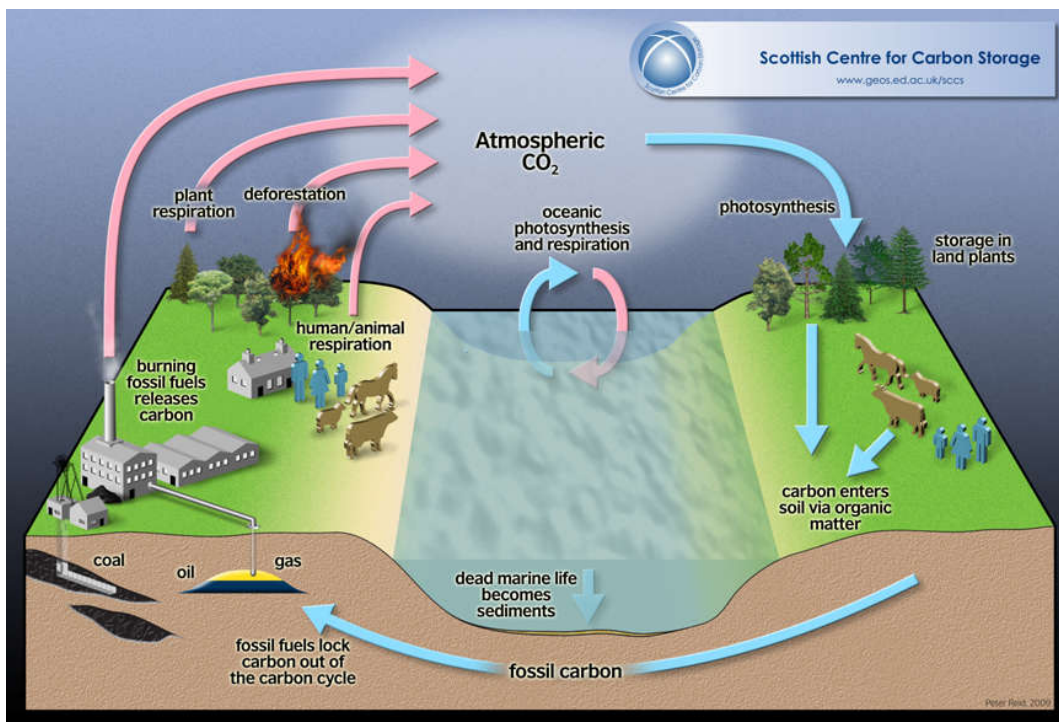


Figure (I-3) : Cycle du carbone total

I.1.3.1. Les processus biochimiques du cycle du carbone

❖ La photosynthèse : La photosynthèse se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Par ce processus, les végétaux emmagasinent du carbone d'origine atmosphérique ou du carbone dissous dans l'eau. Ils utilisent l'énergie solaire pour

transformer le dioxyde de carbone (CO_2) en glucose en produisant du dioxygène. Le glucose servira ainsi de matière organique servant à la fabrication des tissus végétaux.

❖ La consommation : la consommation se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Les animaux herbivores obtiennent le carbone nécessaire à leur croissance en consommant des végétaux. Les animaux carnivores, quant à eux, absorbent le carbone contenu dans les animaux dont ils se nourrissent. Le carbone est ainsi transféré d'un échelon à l'autre le long d'une chaîne alimentaire.

❖ La respiration : La respiration se déroule autant en milieu terrestre qu'en milieu aquatique. Le carbone est retourné à l'atmosphère par le processus de respiration. Tous les êtres vivants, qu'ils soient végétal ou animal, respirent. Ils rejettent donc dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère, sous forme de dioxyde de carbone, une partie de la quantité de carbone qu'ils avaient ingérée au départ.

❖ La décomposition et la fermentation : la portion du carbone qui n'est pas relâchée par la respiration s'élimine dans les déchets végétaux et animaux (urine, selles, organismes morts, etc.). Dans les sols et les sédiments des lacs et des océans, ces déchets sont décomposés par des microorganismes. Selon la présence ou l'absence de dioxygène, les décomposeurs effectueront la décomposition ou la fermentation de la matière organique. Ces processus libèrent du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4) tout en permettant de transformer la matière organique en matière inorganique.

❖ La déforestation et les feux de forêt : Sous l'action de la combustion, le carbone contenu dans les troncs et les feuilles des arbres se transforme en dioxyde de carbone (CO_2). La déforestation, quant à elle, diminue le nombre d'arbres en présence pouvant effectuer la photosynthèse. habituellement, en l'absence de ces deux phénomènes, la quantité de carbone fixée à l'échelle planétaire par les organismes qui réalisent la photosynthèse s'équilibre avec celle qui est libérée par la respiration et la décomposition des autres organismes. Toutefois, en présence de ces deux phénomènes, davantage de dioxyde de carbone sera relâché dans l'atmosphère.

I.1.3.2. Les processus géochimiques du cycle du carbone

❖ La dissolution et la fixation en carbonate de calcium : la dissolution du carbone se déroule dans l'hydrosphère. Une grande partie du dioxyde de carbone atmosphérique est dissous dans les océans. En effet, les océans sont des puits à carbone, car ils prélèvent globalement plus de carbone à l'atmosphère qu'ils ne lui en redonnent. Une partie du dioxyde de carbone dissous dans l'eau réagit avec les molécules d'eau, puis avec du calcium pour devenir du carbonate de calcium (CaCO_3). On retrouve le carbonate de calcium dans la composition des coquilles et squelettes des organismes marins.

❖ La sédimentation et la fossilisation : la sédimentation se déroule principalement dans l'hydrosphère. Les coquilles et les squelettes des organismes marins morts s'accumulent au fond de l'océan. Le carbonate de calcium s'accumule donc dans les sédiments et donne naissance à des roches carbonatées. Ces roches suivent le mouvement des plaques tectoniques. Elles plongent sous le manteau de la terre lors du processus de subduction et peuvent éventuellement être ramenées à la surface. Elles peuvent aussi être enfouies dans la croûte terrestre et y être piégées pour de nombreuses années.

❖ Le volcanisme : les éruptions volcaniques peuvent être en surface de la Terre ou sous-marines. Dans les deux cas, au contact du magma, le carbone contenu dans les roches carbonatées peut se libérer et retourner dans l'atmosphère. Les volcans et les geysers laissent échapper du dioxyde de carbone et du méthane dans l'atmosphère.

❖ La combustion de combustibles fossiles : les organismes morts qui tombent au fond de l'océan forment une couche de sédiments. Ils peuvent parfois se transformer en combustibles fossiles comme le charbon ou le pétrole s'ils demeurent enfouis dans les sédiments pendant des centaines de millions d'années. L'homme effectue la combustion de ces combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) pour répondre à ses besoins en énergie. Par ce fait, il augmente la quantité de dioxyde de carbone relâchée dans l'atmosphère et dérègle le cycle du carbone.

I.2. Les combustibles fossiles

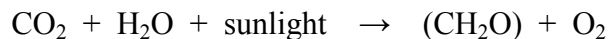
I.2.1. La définition de combustible fossile

Les combustibles fossiles sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde, ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée. Ils comprennent le charbon, le pétrole, le gaz naturel, les schistes bitumineux, les bitumes, les sables bitumineux et les huiles lourdes.

On peut dire qu'un combustible fossile est chaque composant de la classe de substances d'origine biologique qui contient des hydrocarbures présents dans la croûte terrestre et qui peuvent être utilisés comme source d'énergie. Tous contiennent du carbone et se sont formés à la suite de processus géologiques agissant sur les restes de matière organique produite par la photosynthèse, un processus qui a commencé à l'époque archéenne (il y a 4,0 à 2,5 milliards d'années).

I.2.2. L'origine des combustibles fossiles

Il est largement reconnu que l'apparition de CO₂ dans l'atmosphère primitive et l'environnement proche de la surface était le résultat du dégazage de l'intérieur de la Terre : à mesure que sa surface se refroidissait, les volcans ont libéré des quantités massives de CO₂, de vapeur (H₂O), d'ammoniac (NH₃), et le méthane (CH₄). Les premières formes de vie primitives ont commencé à photosynthétiser la nourriture, l'énergie et l'oxygène (O₂) en utilisant la lumière du soleil, le CO₂ et l'eau [1] :



(CH₂O : représente le produit de la photosynthèse).

Au cours de ce processus de développement précoce :

La concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a progressivement diminué et la concentration d'O₂ a augmenté, d'autant plus que les plantes vertes convertissent le dioxyde de carbone en O₂.

L'azote (N₂) dans l'atmosphère est formé en partie par l'oxydation du NH₃ avec l'O₂, mais principalement à partir de bactéries dénitrifiantes.

La concentration de méthane dans l'atmosphère a diminué via les voies oxydatives (réaction avec l'O₂). À mesure que les niveaux d'O₂ dans l'atmosphère augmentaient, la couche d'ozone s'est formée, qui a commencé à être altérée par les rayons ultraviolets.

Tous ces événements ont facilité l'évolution des organismes et des espèces dans les mers peu profondes et plus tard sur toute la Terre. Enfouis sous d'épaisses couches rocheuses, les restes d'organismes marins, de plantes marécageuses et de matières végétales incomplètement décomposées soumises à des pressions et températures élevées ont été transformés en combustibles fossiles : charbon et hydrocarbures (liquides et gazeux), par un processus de décomposition anaérobie au cours des centaines de millions d'années.

Selon cette théorie, les combustibles fossiles sont issus de la photosynthèse solaire de la matière biologique. Cependant, il existe des théories concurrentes sur l'origine des combustibles carbonés sur terre ; lequel :

➤ Le premier est que le carbone est arrivé sur notre planète sous une forme réduite, comme on le trouve dans presque toutes les météorites, et était abiotique.

➤ La seconde est que les combustibles fossiles (comme le pétrole) se sont formés à partir de profonds gisements de carbone, très probablement, lors de la formation de la Terre. Cette hypothèse suggère que le pétrole provient de fluides carbonés qui ont migré vers le haut depuis le manteau, ce qui signifie qu'il pourrait y avoir plus de pétrole sur notre planète que prévu.

I.2.3. Utilisations des combustibles fossiles

Tous les combustibles fossiles peuvent être brûlés dans l'air ou avec de l'oxygène dérivé de l'air pour fournir de la chaleur. Cette chaleur peut être utilisée directement, comme dans le cas des fours domestiques, ou utilisée pour produire de la vapeur pour entraîner des générateurs pouvant fournir de l'électricité. Dans d'autres cas encore, par exemple les turbines à gaz utilisées dans les avions à réaction, la chaleur dégagée par la combustion d'un combustible fossile sert à augmenter à la fois la pression et la température des produits de combustion pour fournir la puissance motrice.

L'énergie fossile était d'abord utilisée pour le chauffage et la lumière. Aujourd'hui, on la retrouve dans des industries diverses comme le transport. Quelques exemples d'utilisation des énergies fossiles :

- Le pétrole est utilisée dans tous les domaines : le plastique, l'essence, le gasoil, les tissus synthétiques, etc.
- Le gaz naturel est utilisée dans beaucoup d'habitations pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson. Elle est même de plus en plus présente dans l'industrie du transport.
- Le charbon est utilisé dans les foyers pour la cuisson, mais également pour se chauffer dans certaines régions.

De nombreux organismes étatiques concernés par la sécurité environnementale, dirigés par les Nations Unies, ont mis en garde contre les carburants carbonés afin de limiter les changements climatiques négatifs à l'échelle mondiale.

I.3. Le changement climatique

Le climat sur Terre a changé depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années. Jusqu'à récemment, des facteurs naturels étaient à l'origine de ces changements. Les influences naturelles sur le climat comprennent les éruptions volcaniques, les changements dans l'orbite de la Terre et les déplacements de la croûte terrestre.

Au cours du dernier million d'années, la Terre a connu une série d'âges glaciaires et de périodes plus chaudes. Les périodes glaciaires et interglaciaires cyclent environ tous les 100 000 ans, causées par des changements dans l'orbite de la Terre autour du soleil.

Cependant, depuis la révolution industrielle dans les années 1800, la température mondiale a augmenté à un rythme beaucoup plus rapide. En brûlant des combustibles fossiles et en changeant notre façon d'utiliser les terres, l'activité humaine est rapidement devenue la principale cause des changements de notre climat

Le climat, selon la définition de l'organisation météorologique mondiale (OMM) est la "synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère". Les changements saisonniers

comme le passage de l'hiver au printemps, à l'été et à l'automne dans les zones tempérées et de l'humidité à la sécheresse dans les régions tropicales font aussi partie du climat. [2]

Il existe de nombreuses preuves du changement climatique dont : augmentation de la température mondiale, augmentation de la température dans les océans, les calottes glaciaires rétrécissent, acidité des océans, élévation du niveau de la mer...

I.3.1. Les principales causes du changement climatique

I.3.1.1. Causes humaines :

L'homme est l'une des principales causes du changement climatique, en raison de ses activités qui conduisent à l'émission de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'air. Aujourd'hui, il y a plus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qu'il n'y en a jamais eu au cours des 800 000 dernières années (figure I-4) . Au cours des 20^{ème} siècle et 21^{ème} siècle, le niveau de dioxyde de carbone a augmenté de 40 %

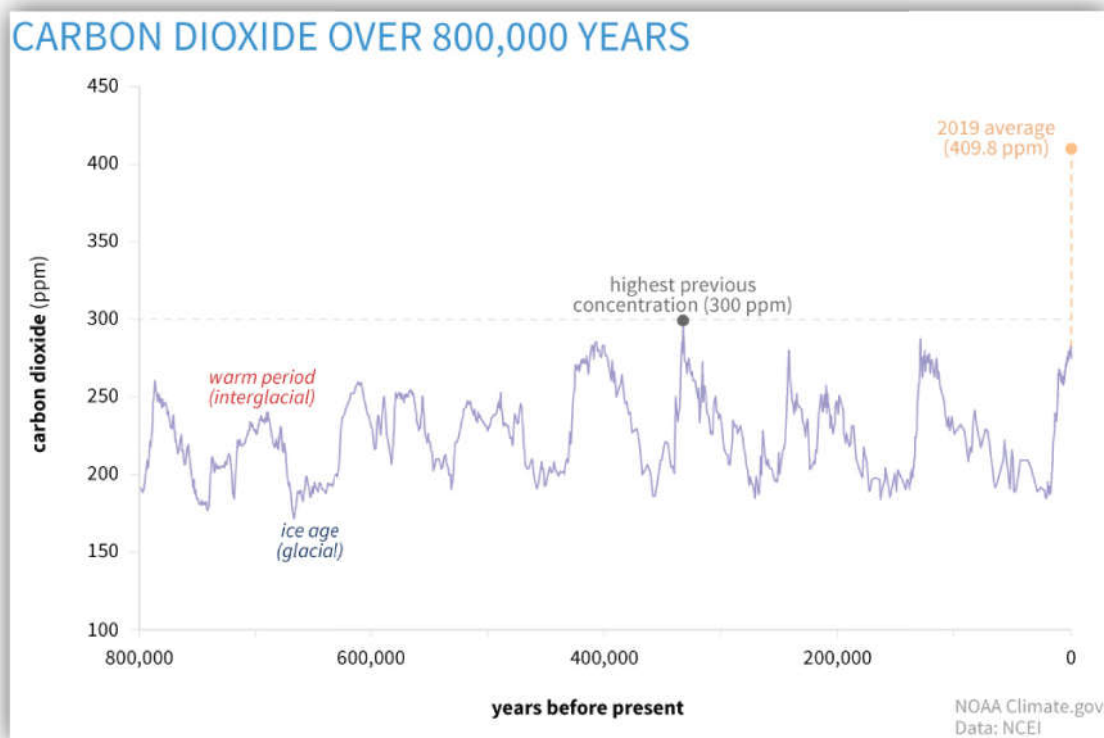


Figure (I-4): Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone atmosphérique moyen mondial en 2019 était de 409,8 parties par million (ppm en abrégé), avec une plage d'incertitude de plus ou moins 0,1 ppm. Les

niveaux de dioxyde de carbone sont aujourd'hui plus élevés qu'à n'importe quel moment au cours des 800 000 dernières années au moins.

Concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) en parties par million (ppm) au cours des 800 000 dernières années. Les pics et les vallées suivent les périodes glaciaires (faible teneur en CO₂) et les interglaciaires plus chauds (plus élevée en CO₂). Au cours de ces cycles, le CO₂ n'a jamais été supérieur à 300 ppm. Sur l'échelle des temps géologiques, l'augmentation (ligne pointillée orange) semble pratiquement instantanée.

En fait, la dernière fois que les quantités de CO₂ atmosphérique ont été aussi élevées, c'était il y a plus de 3 millions d'années, lorsque la température était de 2 à 3 °C (3,6 à 5,4 °F) plus élevée que pendant l'ère préindustrielle et que le niveau de la mer était de 15 à 25 mètres (50 à 80 pieds) plus haut qu'aujourd'hui.

Les points suivants représentent les pratiques humaines les plus importantes qui ont conduit au changement climatique :

1_ Déforestation (couper des arbres) : les forêts contribuent à l'élimination du dioxyde de carbone de l'atmosphère en l'absorbant et en le stockant dans les arbres. Par conséquent, abattre des arbres provoque une accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et leur combustion libère du dioxyde de carbone stocké à l'intérieur dans l'atmosphère.

2_ Agriculture et élevage : ces deux types de gaz émettent différents types de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, par exemple le méthane, qui est produit par les animaux, qui est environ trente fois plus puissant que le dioxyde de carbone comme gaz à effet de serre, en plus de l'oxyde d'azote, qui est utilisé dans la fabrication d'engrais, il est 300 fois plus puissant que le dioxyde de carbone.

3_ Production de ciment : La production de ciment émet 2 % des émissions totales de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui contribue au changement climatique.

4_ Combustibles fossiles brûlants : Les concentrations de dioxyde de carbone augmentent principalement à cause des combustibles fossiles que les gens brûlent pour produire de l'énergie. Les combustibles fossiles qui existent sous terre depuis des milliers d'années, comme le pétrole, le charbon ou le gaz, contiennent du dioxyde de carbone que les plantes ont extrait de l'atmosphère par photosynthèse sur une période de plusieurs millions d'années, nous renvoyons ce carbone dans l'atmosphère en quelques centaines d'années

seulement. L'extraction du carburant du sol et sa combustion libèrent du dioxyde de carbone stocké dans l'air.

De 1850 à 2018, 440 ± 20 Pg C ($1 \text{ Pg C} = 10^{15} \text{ g C}$) ont été émis sous forme de CO_2 par la combustion de combustibles fossiles. Pour la seule année 2018, les émissions mondiales de combustibles fossiles ont atteint $10 \pm 0,5$ Pg C an⁻¹ pour la première fois de l'histoire. Environ la moitié du CO_2 émis depuis 1850 reste dans l'atmosphère. Le reste s'est partiellement dissous dans les océans du monde. Alors que la biosphère terrestre est actuellement également un puits pour le CO_2 des combustibles fossiles, les émissions cumulées de CO_2 dues aux changements d'utilisation des terres tels que la déforestation annulent l'absorption terrestre au cours de la période 1850-2018.

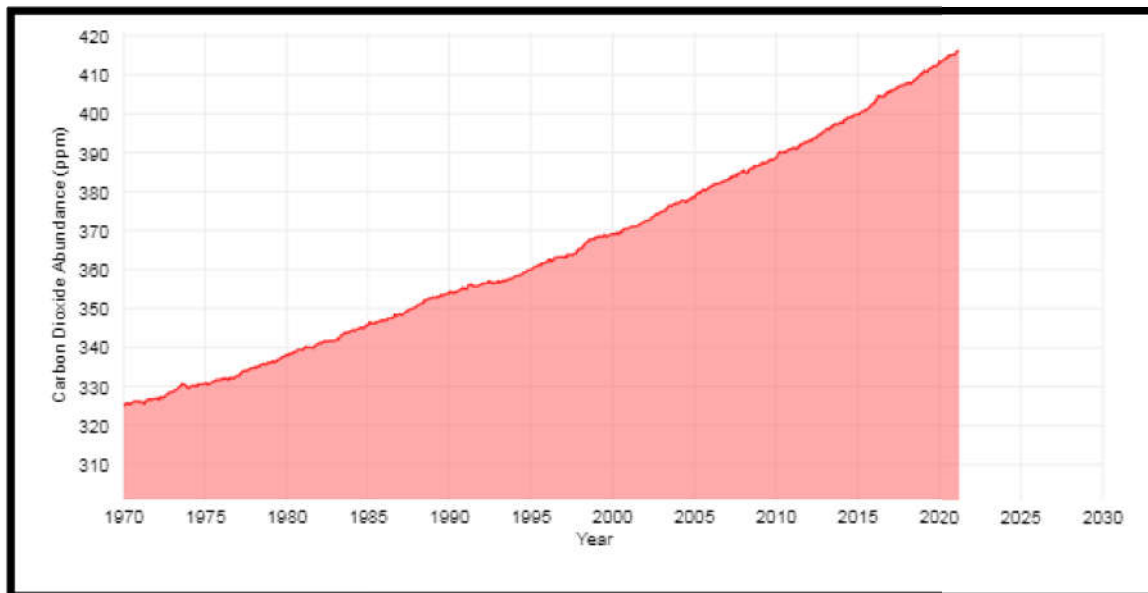


Figure (I-5) : Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone (CO_2)
Pendant la période de 1970 à 2020

Fin 2012, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère dépassait les 390 ppm (parties par million), contre 280 ppm au début de l'ère industrielle. Cette augmentation est à l'origine d'environ deux tiers de l'effet de serre additionnel accumulé depuis 1750.

Dans les années 1960, le taux de croissance mondial du dioxyde de carbone atmosphérique était d'environ $0,6 \pm 0,1$ ppm par an. Entre 2009-18, cependant, le taux de croissance a été de 2,3 ppm par an.

Le dioxyde de carbone atmosphérique mondial était de $409,8 \pm 0,1$ ppm en 2019, un nouveau record. Il s'agit d'une augmentation de $2,5 \pm 0,1$ ppm par rapport à 2018, identique à l'augmentation entre 2017 et 2018.

Le taux annuel d'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique au cours des 60 dernières années est environ 100 fois plus rapide que les augmentations naturelles précédentes, telles que celles qui se sont produites à la fin de la dernière période glaciaire il y a 11 000 à 17 000 ans.

I.3.1.2. Causes naturelles

Avant l'existence de l'homme, la terre traversait des périodes froides et chaudes, car il y avait de nombreuses forces naturelles qui affectent le climat, dont les plus importantes sont : l'intensité du soleil, les éruptions volcaniques et les changements naturels dans les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais ces raisons ne suffisent pas à expliquer le réchauffement climatique s'accélère considérablement à l'heure actuelle, surtout après le milieu du 20^{ème} siècle, et selon la NASA : « Ces causes naturelles existent encore jusqu'à l'heure actuelle, mais leur impact sur l'environnement est très faible, ou son accélération peut être lente, et donc elle ne peut pas l'être. Elle est à elle seule la cause de l'accélération de l'effet de serre qui s'est produite au cours des dernières décennies.

I.4. L'effet de serre

I.4.1. La définition de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel provoquant une élévation de la température à la surface de notre planète. Indispensable à notre survie, ce fragile équilibre est menacé. Les activités humaines affectent la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre additionnel, responsable en grande partie du changement climatique actuel. [3]

On peut dire que les causes de l'effet de serre en un mot sont principalement humaines et secondairement naturelles, car certains scientifiques disent que la pollution est l'une des raisons les plus importantes, tandis que d'autres disent qu'il s'agit d'un changement de nature, et 97% des scientifiques ont convenu qu'un grand réchauffement climatique se produit à ce degré. Actuellement, il est provoqué par l'homme.

I.4.2. Mécanisme de l'effet de serre

L'effet de serre est la rétention de chaleur dans la couche inférieure de l'atmosphère due à l'absorption et à la réémission par les nuages et certains gaz. La Terre reçoit son énergie du soleil sous forme de rayonnement solaire. Le rayonnement solaire (visible) à ondes courtes traverse l'atmosphère sans rencontrer d'obstacles ou presque et réchauffe la surface terrestre. Le rayonnement thermique à ondes longues émis par la surface réchauffée de la Terre est partiellement absorbé par un certain nombre de gaz à l'état de trace ou "à effet de serre" (GES). Ces gaz sont présents en petites quantités dans l'atmosphère et réfléchissent le rayonnement thermique à ondes longues dans toutes les directions. Une partie du rayonnement est dirigée vers la surface de la Terre.

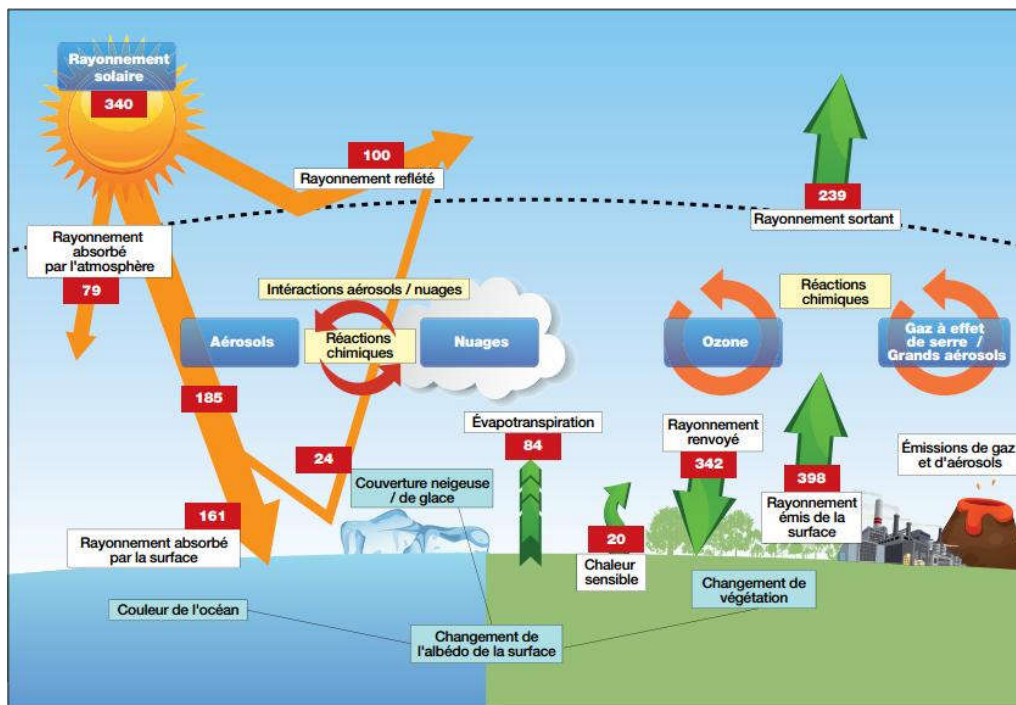


Figure (I-6) : Mécanisme de l'effet de serre [4]

Le principe de l'effet de serre est comparable à celui de serres utilisées pour couvrir les plantes. Les rayons du soleil vont frapper la Terre (auparavant freinés par l'atmosphère) mais certains d'entre eux vont se retrouver piégés par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les deux tiers de l'énergie en provenance du soleil sont absorbés par l'atmosphère, les sols et l'océan. Le tiers restant est directement réfléchi vers l'espace par les nuages, les aérosols, l'atmosphère et la surface terrestre. L'atmosphère et la surface terrestre émettent en retour un rayonnement infrarouge que les nuages et les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

carbone, ozone et méthane principalement) absorbent et réémettent en grande partie vers le sol. [4]

Les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane...) sont pratiquement transparents au rayonnement solaire (longueur d'onde du visible) et opaques au rayonnement infrarouge émis par la Terre. La chaleur est piégée. L'effet de serre piège une partie du rayonnement solaire et permet à la température de la basse atmosphère de se maintenir autour de 15°C en moyenne ce qui a permis le développement de la vie. Sans cet effet de serre, principalement dû à la vapeur d'eau, la température moyenne serait de -18°C et la vie sur Terre n'aurait pas connu un développement sous ses formes actuelles [5] . C'est-à-dire Si les gaz à effet de serre n'existaient pas, les températures sur terre seraient inférieure à -18°C .



Figure (I-7) : L'effet des GES sur la température de la terre

La quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère peut influencer sur les températures globales. Si ces gaz devaient augmenter, les températures pourraient s'élever. S'ils devaient diminuer, les températures globales s'abaisseraient.

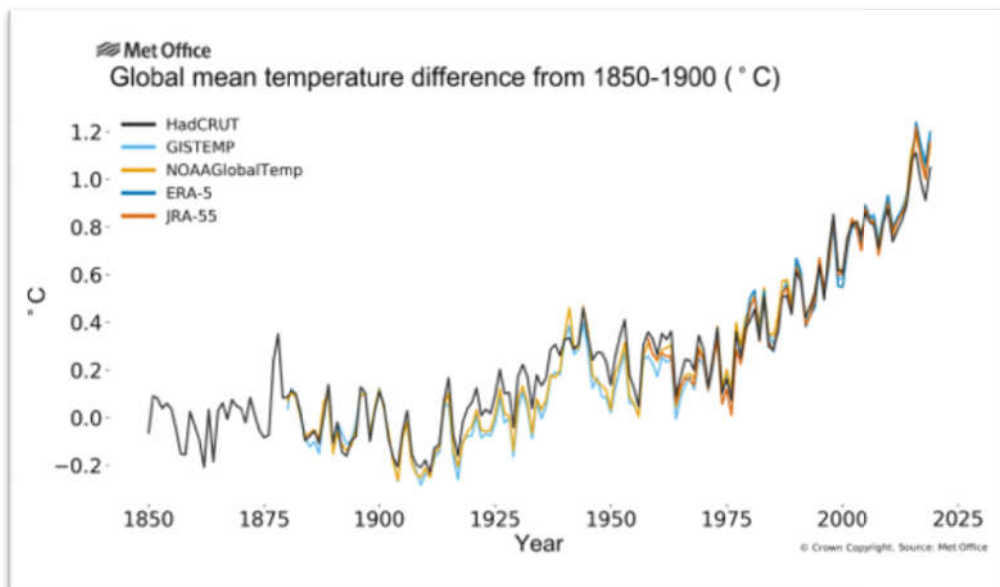


Figure (I-8) : La différence de température moyenne mondiale [6]

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

La période 2015-2019 représente les cinq années les plus chaudes jamais enregistrées et la période 2010-2019 est la décennie aux températures les plus élevées (L'année 2019 se classe deuxième en matière de températures enregistrées). Au regard de l'évolution actuelle des émissions de dioxyde de carbone, la température devrait augmenter de 3 à 5 °C d'ici à la fin du siècle. [6]

I.4.3. Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources

Il existe de nombreux gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère, naturellement, mais leur concentration varie du fait des activités humaines. Leurs impacts sur le climat dépendent de leur capacité à absorber et émettre du rayonnement infrarouge, de leur concentration dans l'atmosphère et de leur durée de vie. Les gaz à effet de serre les plus courants sont : la vapeur d'eau H₂O (55%), le dioxyde de carbone CO₂ (39%), le méthane CH₄ (2%), le protoxyde d'azote N₂O (2%), l'ozone O₃. (2%), En plus de tout l'Hydrofluorocarbures (HFC), le Perfluorocarbures (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF₆) avec de faibles concentrations.

Tableau (I-1) : Les principaux gaz à effet de serre et leurs sources

Gaz à effet de serre	Source naturelle	Source humaine
La vapeur d'eau (H ₂ O)	Evaporation de l'eau surtout au-dessus des océans	Centrales électriques – Irrigation
Le dioxyde de carbone (CO ₂)	Respiration des êtres vivants – Feux de forêt - Volcans...	Utilisation massive d'énergies fossiles pour les transports, les bâtiments et l'agriculture Déforestation
Le méthane (CH ₄)	Digestion des herbivores – Décomposition des végétaux- Volcans	Intensification des élevages (bovin) et des cultures (riz) - Décharge d'ordures
Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	Marécages	Utilisation d'engrais azotés
Ozone de basse atmosphère (O ₃)	Foudre	Industrie – Circulation automobile
Les gaz fluorés (CFC, HFC, PFC)	N'existent pas dans la nature	Gaz des bombes aérosols et des climatiseurs

➤ **La vapeur d'eau :** La vapeur d'eau est responsable à elle seule de la grande majorité de l'effet de serre naturel. Elle a également un effet de rétroaction important sur le changement climatique : lorsque la température augmente, l'évaporation augmente et la quantité de vapeur d'eau relâchée dans l'atmosphère aussi, accélérant encore le réchauffement.

➤ **Le dioxyde de carbone (CO₂) ou gaz carbonique :** Le dioxyde de carbone est un gaz inodore, incolore, inerte et non toxique, très présent dans notre vie quotidienne, est le principal gaz à effet de serre à l'état naturel, avec la vapeur d'eau. Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans. En effet, il est présent dans l'air que l'on respire, le taux moyen actuel de dioxyde de carbone dans l'air est de 0,038 %. C'est le physicien Joseph Black qui a identifié pour la première fois du dioxyde de carbone en 1750.

Le dioxyde de carbone ou CO₂, dont la concentration peut augmenter du fait de processus naturels comme les éruptions volcaniques et les feux de forêts ou de brousse. Mais ce sont les activités humaines avec l'utilisation de carbone fossile (pétrole, gaz naturel et charbon notamment pour l'industrie, le chauffage et les transports), ou encore la fabrication du ciment et les changements d'occupation des sols, qui sont responsables de l'essentiel de l'augmentation de sa concentration

Le carbone subit en permanence des transferts entre ces différents milieux. Une très large proportion du CO₂ est ainsi dissout dans les océans. Les plantes absorbent le CO₂ atmosphérique par la photosynthèse et le transforment en composés carbonés organiques (sucres, cellulose...). [7]

À l'inverse, elles rejettent une petite quantité de CO₂ dans l'atmosphère lors de la respiration et à la mort : les microorganismes du sol décomposent la matière organique végétale et libèrent une partie du carbone de la plante dans l'atmosphère, sous forme de CO₂. L'autre partie du carbone est stockée dans le sol. [7]

Le dioxyde de carbone a pour formule chimique : CO₂. Il est aussi appelé gaz carbonique. Cette molécule est composée d'un atome de carbone relié par double liaison à deux atomes d'oxygène.

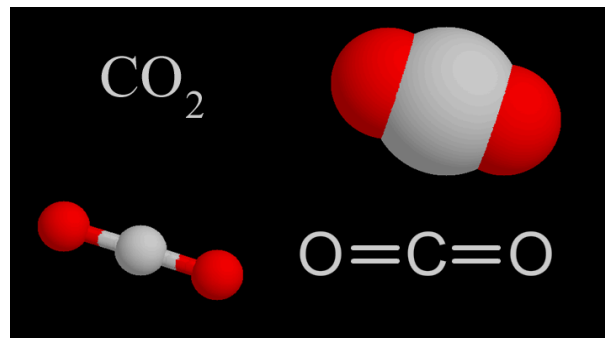


Figure (I-9): Structure de la molécule de dioxyde de carbone CO₂

En cas de surabondance, il est compliqué de le résorber entièrement, ce qui peut impacter l'environnement de manière catastrophique. Le dioxyde de carbone serait responsable de 39 % de l'effet de serre dans l'atmosphère d'après les analyses du Earth's Annual Global Mean Energy Budget. Les activités humaines libèrent maintenant plus de carbone que les océans. Les forêts ne peuvent pas tout absorber et cela déséquilibre le cycle naturel du carbone. Ce déséquilibre peut provoquer des changements climatiques importants. Par exemple, il représente la première cause du renforcement de l'effet de serre.

Tableau (I-2) : Les grandes sources fixes mondiales de CO₂ [8]

Processus	Nombre de sources	Émissions (MtCO ₂ /an)
Combustibles fossiles		
Énergie	4942	10539
Production de ciment	1175	932
Raffineries	638	798
Industrie sidérurgique	269	646
Industrie pétrochimique	470	379
Traitement du pétrole et du gaz naturel	Non disponible	50
Autres sources	90	33
Biomasse		
Bioéthanol et bioénergie	303	91
Total	7887	13468

L'homme participe indirectement à la hausse de ces émissions de gaz à effet de serre par la déforestation. Le fait qu'il y ait moins d'arbres signifie logiquement moins de

photosynthèse, et donc moins de traitement du CO₂. Déforestation et bétonisation sont un cocktail explosif pour le traitement de ce gaz dans l'atmosphère : avec une prévision de la disparition de 92 % des forêts d'ici 2020, la Terre aura de plus en plus de mal à endiguer la surabondance du gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces deux causes, l'une directe et l'autre indirecte, influent considérablement sur le développement de l'effet de serre dans l'atmosphère.

➤ **Le méthane (CH₄)** : Le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le CO₂, mais moins concentré. Il représente un peu plus de 15% de l'effet de serre anthropique. Il est généré dès que de la matière organique se décompose à l'abri de l'oxygène. Il est souvent lié aux processus de fermentation (marécages, décharges, digestion des ruminants, rizières, élevages). L'agriculture intensive est ainsi l'un des responsables de l'augmentation des concentrations de méthane dans l'atmosphère au cours des derniers siècles. Une partie des émissions provient de la production et de la distribution de gaz et de pétrole, de l'extraction du charbon, de leur combustion et des décharges. Dans l'atmosphère, le méthane piège la chaleur avec une efficacité 23 fois supérieure au CO₂. Sa durée de vie est cependant plus courte, entre 10 et 15 ans.

➤ **L'ozone (O₃)** : L'ozone Présent naturellement dans la stratosphère, vers 20 km d'altitude, il nous protège du rayonnement solaire ultraviolet qu'il absorbe. De l'ozone est également produit dans les basses couches de l'atmosphère à partir de composés organiques volatiles émis par les activités humaines (transports).

➤ **Le protoxyde d'azote (N₂O)** : Le protoxyde d'azote, appelé également « gaz hilarant », est émis naturellement par les sols, les activités agricoles et provient notamment de l'utilisation d'engrais azotés et les produits chimiques comme l'acide nitrique.

➤ **Les gaz fluorés** : Ces gaz n'ont pas d'émission naturelle et représentent 10% de nos émissions. les gaz fluorés (HFC, PFC, SF₆) sont utilisés dans les systèmes de réfrigération et employés dans les aérosols et les mousses isolantes. Les PFC et le SF₆ sont utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs. Les gaz fluorés ont un pouvoir de réchauffement 1 300 à 24 000 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone et une très longue durée de vie. C'est pourquoi ils représentent un réel danger malgré la modeste part qu'ils représentent dans les émissions totales de GES.

Le figure suivante représente le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre :

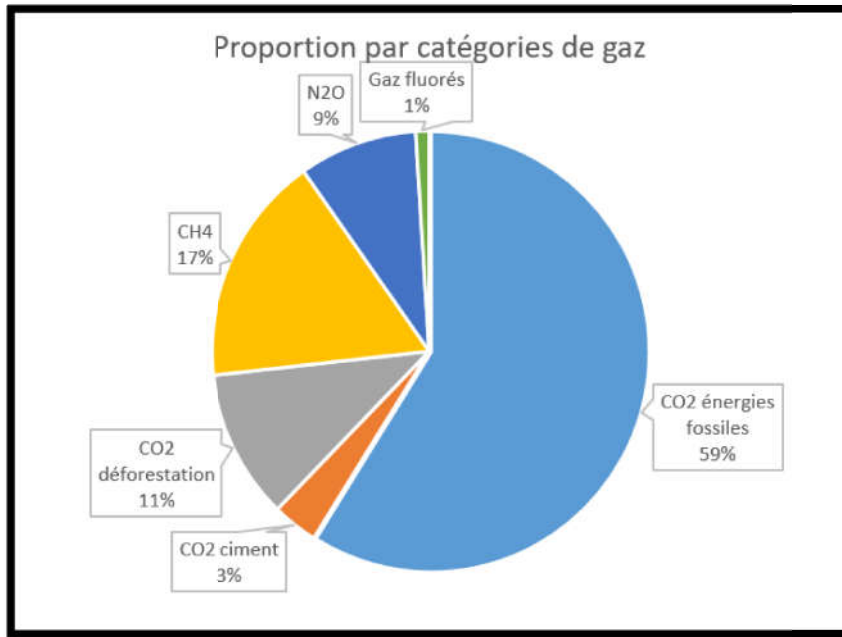


Figure (I-10): Le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre

➤ Les aérosols, un pouvoir refroidissant :

Les aérosols sont de fines particules en suspension dans l'air. Ils sont présents naturellement dans l'atmosphère (volcanisme, incendies...) mais leur concentration a grandement augmenté avec les activités industrielles. Contrairement aux gaz à effet de serre, les aérosols ont un effet généralement refroidissant sur le système terre-atmosphère. Ces poussières en suspension absorbent et diffusent le rayonnement solaire dont une partie est renvoyée vers l'espace. Une partie du rayonnement solaire manque donc à l'atmosphère, mais aussi à la surface terrestre, d'où cet effet refroidissant.

En plus de cette conséquence directe, les aérosols ont un impact sur la formation, la composition physique et l'albédo (pouvoir de réflexion) des nuages. Ces effets indirects provoquent également un refroidissement. A l'inverse, d'autres effets de réchauffement liés aux aérosols sont aussi possibles (en particulier pour les aérosols carbonés et le dépôt d'aérosols sur la neige), mais les effets refroidissant l'emportent globalement. Masquant en partie le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, les aérosols font l'objet de recherches pour mieux comprendre et quantifier leur impact.

L'effet de serre naturel déséquilibré par les activités humaines

Pour que la température du système terre-atmosphère soit stable, il faut que le bilan énergétique au sommet de l'atmosphère et en surface soit nul. En 2009, Kevin Trenberth et ses

collaborateurs ont proposé une estimation de ce bilan, en additionnant et soustrayant l'ensemble des échanges d'énergie estimés à partir d'observations et de modèles : le rayonnement solaire atteignant l'atmosphère, la part absorbée et réfléchie, le dégagement de chaleur de la surface, etc. Au final, ils estiment que le bilan d'énergie au sommet de l'atmosphère et en surface est excédentaire de 0,9 (de 0,7 à 1) W/m² (flux d'énergie par mètre carré). Selon ces auteurs, ce surplus d'énergie, responsable d'un réchauffement du système terre-atmosphère, proviendrait de l'effet de serre additionnel : celui qui est provoqué par un excédent de gaz à effet de serre libérés dans l'atmosphère par les activités humaines. [3]

Si l'effet de serre « naturel » est globalement bénéfique, l'effet de serre « additionnel » est néfaste. Le problème tient à l'addition. Or, depuis quelques années, les scientifiques ont constaté une augmentation très importante de ces GES dus à l'activité humaine. [9]

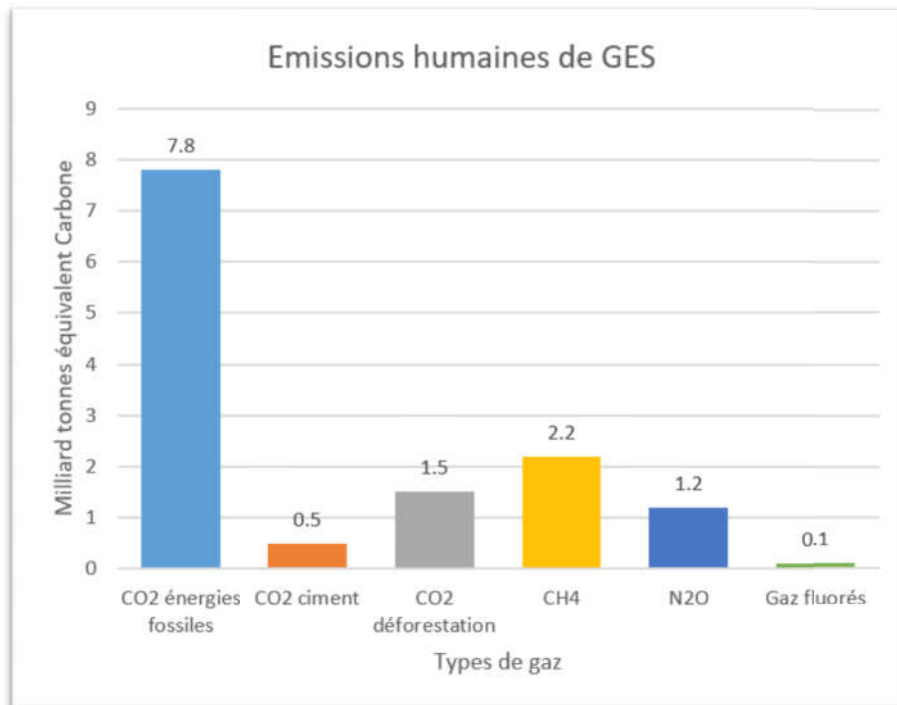


Figure (I-11): Emissions humaines de GES

I.5. L'utilité de la décarbonisation

Des efforts mondiaux intensifs sont en cours pour lutter contre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) et leurs effets potentiellement dévastateurs sur la biosphère et le climat de notre planète. Il existe de nombreuses façons de traiter les émissions de CO₂ d'origine humaine et certaines mesures sont déjà en cours. Une économie d'énergie généralisée, une augmentation de l'efficacité des centrales électriques et des appareils et une

amélioration de l'économie de carburant des véhicules sont également des premières étapes importantes vers les objectifs d'atténuation des émissions de carbone. On se rend compte, cependant, que ces mesures, quelle que soit leur efficacité, ne permettront probablement pas d'atteindre le niveau de réduction des émissions de CO₂ qui serait nécessaire pour stabiliser la concentration de CO₂ atmosphérique dans un contexte de demande mondiale toujours croissante en énergie. [10]

Des approches plus radicales du problème de l'atténuation du carbone sont recherchées, et une approche sur laquelle de nombreux experts fondent leurs espoirs est la décarbonisation des combustibles fossiles, considérée comme une solution à court terme réalisable et potentiellement rentable pour réduire les émissions de CO₂ d'origine humaine. L'objectif de l'approche de décarbonisation des combustibles fossiles est d'éliminer ou de réduire considérablement la quantité de CO₂ émise par l'utilisation de ressources fossiles primaires telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. La principale justification du concept de décarbonation fossile est qu'il offre potentiellement une extension de l'ère des combustibles fossiles de peut-être quelques centaines d'années sans impact négatif sur l'écosystème de notre planète.

Selon Intergovernmental Panel on Climate Change, la décarbonisation est un processus par lequel des pays, des individus ou d'autres entités visent à atteindre une existence zéro carbone fossile. Se réfère généralement à une réduction des émissions de carbone associées à l'électricité, l'industrie et les transports. [11]

La décarbonisation (ou décarbonation) peut être définie comme l'ensemble des mesures et techniques qui visent à réduire de manière importante les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre responsable du changement climatique. elle favorise la sobriété énergétique, la limitation de l'exploitation et de l'utilisation des combustibles fossiles grâce à l'essor des énergies renouvelables (elle est le fait de chercher à se passer de l'utilisation de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon ou le gaz pour les remplacer par des énergies renouvelables), ou encore la capture de CO₂ du combustible. La politique de décarbonisation va de pair avec celle de la transition énergétique.

La grande majorité des émissions de GES étant attribuable aux combustibles fossiles, une décarbonisation permettrait ainsi de faire face adéquatement aux causes des changements climatiques à travers une approche applicable à différentes échelles et niveaux au-delà des

négociations climatiques internationales simplement basées sur le rôle et l'implication des États. [12]

Actuellement, le terme « décarbonisation » est souvent utilisé dans un contexte plus large couvrant un large éventail de politiques visant à éliminer le carbone de l'équation énergétique et à diminuer l'empreinte carbone de l'économie. [1]

La décarbonisation est un terme également employé en matière d'économie. Il s'agit de faire baisser l'empreinte carbone des portefeuilles d'actions (l'empreinte carbone désigne la somme des émissions de CO₂ des entreprises dans lesquelles les investisseurs détiennent des parts). Dans une démarche d'investissement durable et responsable, les investisseurs retirent de leurs portefeuilles les entreprises qui émettent beaucoup de gaz à effet de serre ou qui financent les énergies fossiles (désinvestissement des combustibles fossiles).

On pense qu'à la suite de la décarbonisation des fossiles, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère pourrait être stabilisée à environ 450 ppm sans abandonner l'infrastructure des combustibles fossiles.

Conclusion

Les émissions de carbone ont un impact énorme sur notre planète, car ce sont les gaz à effet de serre qui ont les niveaux d'émissions les plus élevés dans l'atmosphère, ce qui provoque bien sûr le réchauffement climatique et éventuellement le changement climatique.

Le carbone est un type d'émissions de gaz à effet de serre qui se produit lorsque du dioxyde de carbone est libéré dans l'air après une activité ou un processus humain. Le dioxyde de carbone est libéré dans l'atmosphère lorsque des combustibles fossiles - charbon, gaz naturel et pétrole sont brûlés, mais en brûlant d'autres matériaux libèrent également du dioxyde de carbone, comme les déchets solides et les arbres.

Les émissions de carbone contribuent au changement climatique, qui peut avoir de graves conséquences pour l'homme et son environnement, car le rejet de carbone dans l'atmosphère (dioxyde de carbone et méthane) entraîne une augmentation de la température. Cette augmentation cause de nombreux problèmes (maladies respiratoires telles que l'asthme, la pollution de l'air, la désertification, les pluies torrentielles et les inondations, dommages aux appareils de refroidissement), et la présence de dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis

Chapitre I : Généralités sur le changement climatique

des milliers d'années et en grande quantité, met en danger notre planète, et donc afin de préserver et de sécuriser Notre environnement Nous devons trouver des solutions qui permettront de réduire les émissions de carbone dans l'atmosphère. La solution la plus importante est la décarbonisation des combustibles fossiles, qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment de dioxyde de carbone.

CHAPITRE II :

*La décarbonisation et les énergies
renouvelables dans le Monde*

INTRODUCTION

La lutte contre les changements climatiques passe inévitablement par la décarbonisation, soit l'abandon rapide des énergies fossiles et la transition vers l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, et non seulement par la réduction des émissions à la marge d'un mode de développement qui demeurerait inchangé. [12]

Pour l'ensemble des filières industrielles, les Gaz à Effet de Serre (GES) et notamment le CO₂ sont considérés comme des polluants à part entière dont il est nécessaire de contrôler et réduire les émissions. Le captage puis le stockage de CO₂ (CSC) est une solution envisagée pour la réduction des émissions de GES de l'industrie (production d'électricité, sidérurgies, cimenteries). [13]

La décarbonisation des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables, l'énergie nucléaire sont des mesures qui nous permettent d'obtenir une énergie propre et respectueuse de l'environnement. Réduisant ainsi les émissions de GES .

II.1. Technologie de décarbonisation

On peut dire que les principaux objectifs de la décarbonisation sont la recherche d'alternatives moins émettrices de dioxyde de carbone (énergie renouvelable, nucléaire, gaz naturel), de processus plus économes en énergie (performance énergétique, cogénération), de modes de production plus sobres (télétravail, services) ou encore la capture et la séquestration du CO₂ avant ou après l'utilisation de combustibles. La « décarbonisation » des combustibles fossiles paraît constituer la solution la plus évidente.

Malgré ces défis, la décarbonation est techniquement réalisable même sans grandes avancées technologiques. Le plus souvent il existe les cinq technologies suivantes [14] [15] :

➤ l'électrification de la chaleur : c'est-à-dire l'alimentation des fours à l'électricité et non en brûlant des combustibles. Bien évidemment, il faut que l'électricité soit produite à partir de sources renouvelables.

➤ l'utilisation de l'hydrogène comme combustible ou comme matière première dans les produits chimiques, ou comme réactif dans les procédés chimiques.

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

- l'utilisation de la biomasse comme combustible ou comme matière première : En d'autres termes, le remplacement du charbon par du biocharbon, ou du gaz par du biogaz.
- le captage et le stockage de carbone : il s'agit de séparer les gaz à effet de serre d'autres gaz industriels, puis de les compresser et de les injecter dans le sol afin qu'ils ne soient pas rejetés dans l'atmosphère.
- le captage et l'utilisation de carbone : ce procédé vise à transformer les gaz industriels en élément utile, par exemple en éthanol ou en matières premières en vue d'une utilisation dans l'industrie chimique.

II.1.1. La technologie de captage et de stockage du CO₂ (CSC)

La technologie de captage et de stockage du CO₂ regroupe plusieurs techniques industrielles visant à séparer (captage) le dioxyde de carbone de ses sources industrielles et énergétiques, à le transporter vers un lieu de stockage et à l'isoler de l'atmosphère sur le long terme. Cette technologie a été imaginée au cours des années 1970 par des chercheurs et des industriels principalement venus du secteur de l'énergie et faite de quelques applications dans le monde [16] [17]. Elle a depuis bénéficié d'un soutien croissant au niveau international.

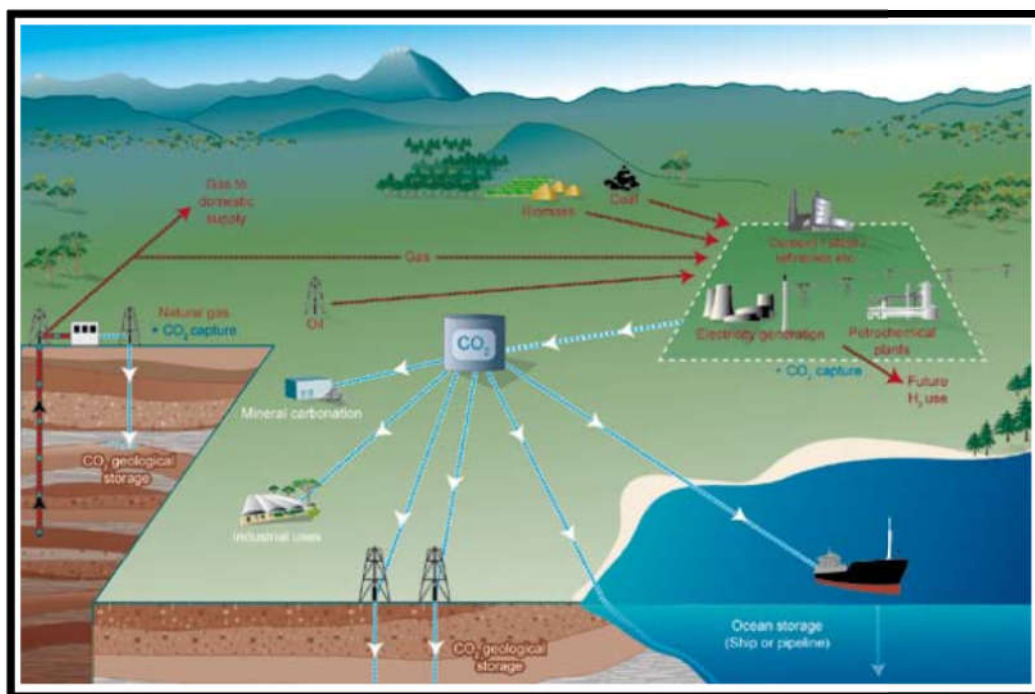


Figure (II-1): Schéma des installations éventuelles de CSC montrant les sources qui pourraient convenir, ainsi que les options de transport de CO₂ et de stockage [8]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

La technologie de captage et de stockage du CO₂ souvent appelée « CSC » regroupe plusieurs techniques industrielles visant à séparer (captage) le dioxyde de carbone de ses sources industrielles et énergétiques, à le transporter vers un lieu de stockage et à l'isoler de l'atmosphère sur le long terme [8]

Les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone peuvent capter plus de 90 % des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) des centrales électriques et des installations industrielles. Le captage du carbone peut atteindre 14 % des réductions mondiales des émissions de gaz à effet de serre nécessaires d'ici 2050 et est considéré comme le seul moyen pratique de parvenir à une décarbonisation profonde dans le secteur industriel.

II.1.1.1 Les systèmes de la captage CO₂

La technologie nécessaire au captage précombustion est largement utilisée dans la production d'engrais et d'hydrogène. Bien que la conversion du combustible dans l'étape initiale de précombustion soit plus compliquée et coûteuse, plus la concentration de dioxyde de carbone dans le flux gazeux est élevée et plus la pression est élevée, plus la séparation est facile. Il existe différentes techniques de captage du CO₂ : la postcombustion, la précombustion et l'oxycombustion.. [18]

Tableau (II-1): Les techniques de technologie de captage du CO₂

Post-combustion	Pré-combustion	Oxy-combustion
Constitue le système de capture le plus développé à l'état commercial et le plus étudié. La combustion de matières fossiles génère une fumée qui mélange différents gaz, principalement de l'azote. Avec l'aide notamment d'un solvant liquide, on capture du CO ₂ diffus dans le courant gazeux de la post-combustion. Les efforts de recherche se concentrent dans la performance des solvants, vu que le procédé technique est déjà complètement développé.	Ce procédé est le moins étudié. Il demande un système de gazéification de la matière fossile. L'objectif est de capturer le CO ₂ avant la combustion de la matière fossile, pour cela on parle de décarbonisation. Dans un premier réacteur, on transforme le combustible en gaz de synthèse. Il en sort un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H ₂), envoyés dans un deuxième réacteur, appelé de reconversion. On opère à une réaction entre le monoxyde de carbone et la vapeur, pour obtenir plus d'hydrogène et du CO ₂ , destiné au stockage. À ce stade, il y a la séparation de deux composants.	Ce système, ayant déjà beaucoup d'études et de projets, pourrait avoir l'avantage d'être très performant en termes de volume de captage de CO ₂ , supérieur à 90 %. Dans la pratique, des questions techniques se posent, notamment sur la pureté du CO ₂ obtenu, ou sur le contrôle d'opérations hautement réactionnelles. Le principe est de réaliser la combustion de la matière primaire avec de l'oxygène pur au moins à 95 %. L'obtention de l'oxygène pur est une étape particulièrement coûteuse. Les efforts se concentrent dans l'utilisation de la boucle chimique afin de produire de l'oxygène à bas coût.

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Le captage du CO₂ est une première étape du processus de CSC en plusieurs étapes. En général, le captage du CO₂ est un procédé énergivore et assez coûteux

La combustion de gaz contenant de l'oxygène nécessite de l'oxygène de haute pureté. Par conséquent, la concentration de CO₂ s'avère élevée dans le flux de gaz, il est donc facile de séparer le CO₂, et plus d'énergie est nécessaire pour séparer l'oxygène de l'air.

La concentration de CO₂ dans le flux gazeux, la pression du flux gazeux et le type de combustible (solide ou gazeux) sont des facteurs importants dans le choix d'un système de captage.

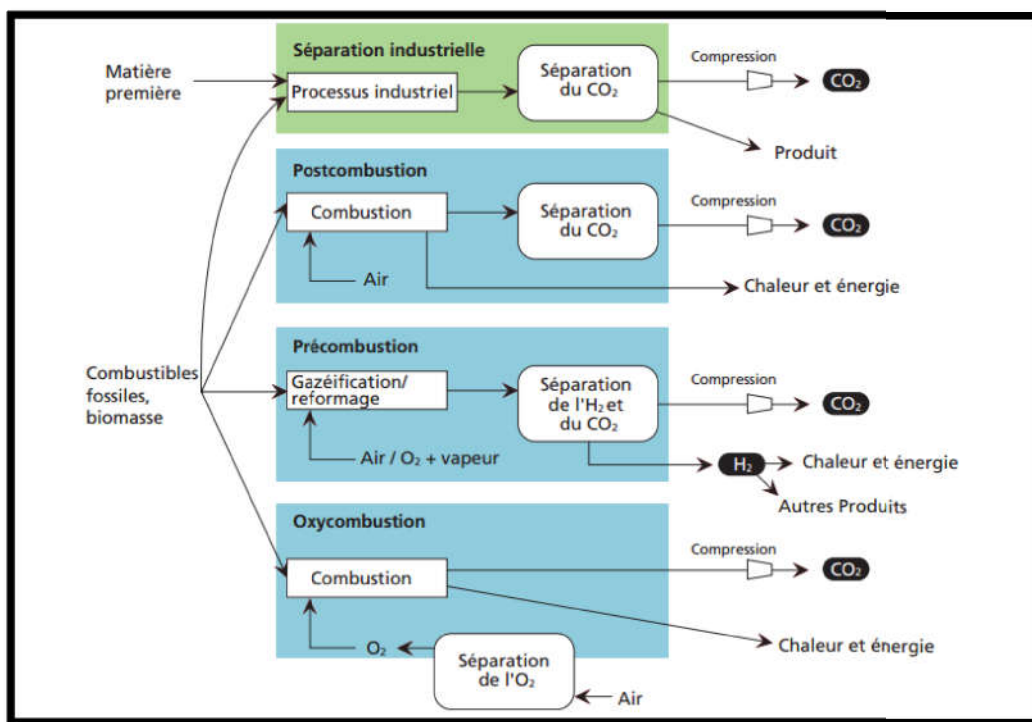
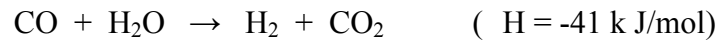


Figure (II-2): Schéma de systèmes de la captage CO₂

II.1.1.1.1. Le captage du carbone pré-combustion

Le captage avant la combustion fait référence à l'élimination du CO₂ des combustibles fossiles avant la fin de la combustion. Par exemple, dans les procédés de gazéification, une charge d'alimentation (telle que le charbon) est partiellement oxydée dans de la vapeur et de l'oxygène/air à haute température et pression pour former une synthèse de gaz. Ce gaz de synthèse, ou gaz de synthèse, est un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de CO₂ et de plus petites quantités d'autres composants gazeux, tels que le méthane. Le gaz de synthèse peut ensuite subir la réaction de conversion eau-gaz pour convertir le CO et l'eau (H₂O) en H₂ et CO₂, produisant un mélange gazeux riche en H₂ et en CO₂ :



La concentration de CO₂ dans ce mélange peut aller de 15 à 50 %. Le CO₂ peut ensuite être capturé et séparé, transporté et finalement séquestré, et le combustible riche en H₂ brûlé. Par rapport à la technologie de post-combustion, qui élimine le CO₂ dilué (concentration ~5-15% CO₂) des flux de gaz de combustion et est à basse pression, le flux de gaz de synthèse déplacé est riche en CO₂ et à une pression plus élevée, ce qui permet une élimination plus facile avant le H₂ est brûlé. En raison du CO₂ plus concentré, le captage avant la combustion est généralement plus efficace, mais les coûts d'investissement du processus de gazéification de base sont souvent plus élevés que les centrales électriques au charbon pulvérisé traditionnelles.

II.1.1.1.2. Le captage du carbone post-combustion

Le captage postcombustion fait référence au captage du dioxyde de carbone (CO₂) à partir d'un gaz de combustion généré après la combustion d'un combustible à base de carbone, tel que le charbon ou le gaz naturel. Dans les centrales électriques conventionnelles à combustibles fossiles, le charbon ou le gaz naturel est brûlé avec de l'air pour générer de l'énergie thermique qui est convertie en électricité.

L'un des plus grands défis du captage postcombustion consiste à séparer la concentration relativement faible de CO₂ des grandes quantités d'azote dans les gaz de combustion. De plus, la capture du carbone appliquée à divers types de flux de gaz de combustion implique des défis uniques. En général, la production d'électricité au gaz naturel produit un gaz d'échappement avec une teneur en métaux lourds pratiquement nulle, ce qui réduit les exigences de prétraitement des gaz de combustion. Cependant, les gaz de combustion des centrales à cycle combiné au gaz naturel (CCNG) contiennent généralement environ 4 % de CO₂ en volume (par rapport à une concentration de CO₂ de 12 à 15 % dans les gaz de combustion des centrales au charbon), ce qui fournit moins de force motrice pour la séparation du CO₂, et donc, nécessite un plus grand apport d'énergie

II.1.1.1.3. Le captage du carbone oxy-combustion

L'oxycombustion est un procédé qui consiste à brûler des combustibles fossiles dans un mélange oxygène-gaz enrichi plutôt que dans de l'air. Il en résulte des gaz de carneau essentiellement composés de CO₂ et de H₂O (eau), ainsi qu'un taux particulièrement faible de particules impures telles qu'argon ou oxygène. De cette façon, l'oxycombustion offre la

possibilité de capter le CO₂ en employant des méthodes de compression physique directe et de refroidissement (par exemple, séparation/distillation à basses températures). [19]

L'oxycombustion présente plusieurs avantages : un flux gazeux à forte concentration en CO₂, prêt à être capté et stocké, d'excellentes conditions en vue du contrôle intégré des émissions du fait de flux réduits de gaz de carneau, taille/volume du système de combustion potentiellement cinq fois moindre qu'un système équivalent de combustion à l'air. [19]

II.1.1.1.4. Les techniques de séparation utilisées dans CSC

Un certain nombre de techniques de séparation utilisées dans l'industrie peuvent être appliquées au captage du CO₂ dans des fumées de postcombustion [20] :

- Absorption par solvants chimiques ou physiques,
- Adsorption sur solides,
- Membranes,
- Cryogénie.

L'absorption (suivie de la régénération) par solvants représente l'option la plus avancée pour le captage du CO₂ en postcombustion et fait l'objet de nombreux développements. L'utilisation de solvants réactifs constitue pour l'heure la solution la plus efficace pour des faibles teneurs en CO₂. [13]

II.1.1.1.5. Les matériaux sont utilisés dans CSC

Les matériaux sont utilisés pour le captage du CO₂: "zéolithes, amines, charbons actifs, oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux, liquides ioniques, membranes polymériques, polymères microporeux, silice mésoporeuse modifiée par des amines, charpentes organométalliques" [21], En plus de amines aqueuses, ammoniac réfrigéré (NH₄OH) et carbonate de potassium chaud (K₂CO₃).

Les solvants à base d'amine les plus couramment utilisés pour la capture du CO₂ dans les systèmes commerciaux sont les alcanol-amines telles que la mono-éthanol-amine (MEA), la diéthanolamine (DEA) et la méthyl-diéthanolamine (MDEA). Les conditions les plus importantes en ce qui concerne la sélection ou la conception des matériaux de capture du CO₂ sont :

- Capacité d'absorption de CO₂.
- Cinétique de sorption/désorption.
- Température et pression de sorption/désorption.
- Interférence avec les composants ou contaminants courants des gaz de combustion (par exemple, SO_x, NO_x, H₂S).
- Stabilité et régénéralité.
- Coût et faisabilité économique.

II.1.1.2. Les systèmes de la transport CO₂

Le transport du CO₂ est une opération intermédiaire dans le CSC. Bien que dans certains projets, les sites de captage et de stockage du CO₂ puissent être à proximité les uns des autres ; dans la plupart des cas, le CO₂ doit être transporté d'un point à un autre sur des dizaines voire des centaines de kilomètres. Naturellement, les distances plus longues se traduisent par un coût plus élevé et, dans certains cas, des défis supplémentaires de nature technologique et non technique, par exemple, le besoin de recompression et de surveillance, un terrain défavorable. En principe, le CO₂ peut être transporté sous trois états physiques : gazeux, liquide et solide. Afin de transporter le dioxyde de carbone de manière économique, son volume doit être considérablement réduit: cela peut se faire par pressurisation (compression), liquéfaction, solidification ou hydratation . transport du CO₂ : [22]

- par canalisations incluant les équipements annexes (station de recompression, stockages tampons éventuels, vannes et soupapes),
- par bateaux, incluant les infrastructures de chargement et déchargement.

L'analyse des coûts du transport maritime du CO₂ est encore plus compliquée que celle du transport par pipeline. [10]

II.1.1.3. Les systèmes de la stockage CO₂

Le dioxyde de carbone est stocké en utilisant :

II.1.1.3.1. Stockage géologique ; comme les gisements de pétrole ou de gaz naturel, les gisements de charbon inutilisables et les formations salines profondes.

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Il a été démontré que l'utilisation de nombreuses technologies développées par l'industrie pétrolière et gazière pour stocker le CO₂ dans des formations géologiques profondes situées sous terre ou sous la mer est économiquement faisable sous certaines conditions. Champs de pétrole et de gaz et formations de sel, mais pas encore utilisés dans des filons de charbon inexploitable. Si la profondeur d'injection de CO₂ est supérieure à 800 m, divers mécanismes physiques et géochimiques de capture l'empêcheront de migrer vers la surface (par une couche de schiste argileux, appelée chapeau ou couverture, située au-dessus du réservoir).

Le stockage consiste toujours à injecter du dioxyde de carbone à haute densité dans les roches souterraines. Des formations poreuses contenant ou par exemple dans le cas de gisements de pétrole épuisés ou de gaz contenant des fluides tels que du gaz naturel, du pétrole ou de la saumure peuvent être utilisées pour le stockage. Ils existent dans des bassins sédimentaires sur terre ou en mer. Certains filons de charbon peuvent également convenir si une exploitation ultérieure est peu probable et que la perméabilité est suffisante. Les technologies permettant de stocker le dioxyde de carbone dans les filons de charbon ou de l'utiliser pour optimiser la récupération du méthane sont encore au stade de la démonstration.

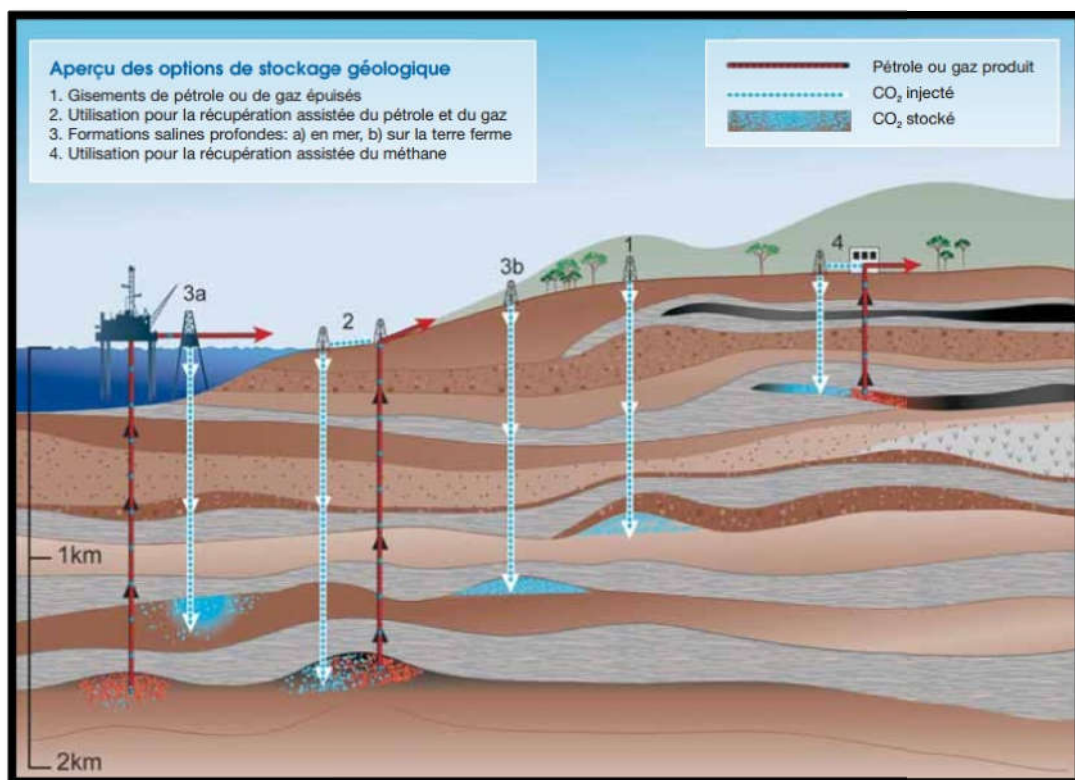


Figure (II-3) : Méthodes de stockage du CO₂ dans des formations géologiques profondes [8]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Les procédés employés pour injecter du CO₂ dans les formations géologiques profondes sont les mêmes que ceux qui ont été élaborés pour la prospection et la production du pétrole et du gaz naturel.

Le stockage du gaz naturel, l'injection de déchets liquides en profondeur et l'élimination de gaz acides (mélanges de CO₂ et de H₂S) sont réalisés au Canada et aux États-Unis d'Amérique depuis 1990, à une échelle de plusieurs mégatonnes. [8]

En principe, le stockage du CO₂ dans des réservoirs d'hydrocarbures ou dans des formations salines se fait à plus de 800 m sous terre. À cette profondeur, le gaz est généralement en phase liquide ou supercritique en raison de la pression et de la température ambiantes; sa densité se situe alors entre 50 et 80 % de celle de l'eau, valeur proche de la densité de certains pétroles bruts, ce qui crée des forces tendant à faire remonter le CO₂. Il est donc important que le réservoir choisi soit recouvert de roche étanche pour que le gaz reste emprisonné à l'intérieur. [8]

Lors de l'injection sous terre, le CO₂ se comprime et remplit les espaces interstitiels en déplaçant une partie des fluides présents (les «fluides in situ»). Dans les réservoirs de pétrole et de gaz naturel, le déplacement de ces fluides peut permettre au gaz d'occuper la majeure partie du volume poreux. Dans les formations salines, le volume potentiel de stockage est plus faible, allant de quelques points de pourcentage à 30 % du volume total de la roche. [8]

II.1.1.3.2. Stockage océanique ;

Rejet direct dans la colonne d'eau océanique ou les grands fonds marins. Il peut être stocké dans l'océan de deux manières :

- Par des gazoducs fixes ou des navires en mouvement, injectez et dissolvez du CO₂ dans les plans d'eau à des profondeurs supérieures à 1000 m.
- Il se dépose au fond de l'océan à l'aide de gazoducs fixes ou de plates-formes offshore jusqu'à une profondeur supérieure à 3 000 m, où le CO₂, plus dense que l'eau, devrait former un « lac », retardant ainsi sa dissolution dans l'environnement.

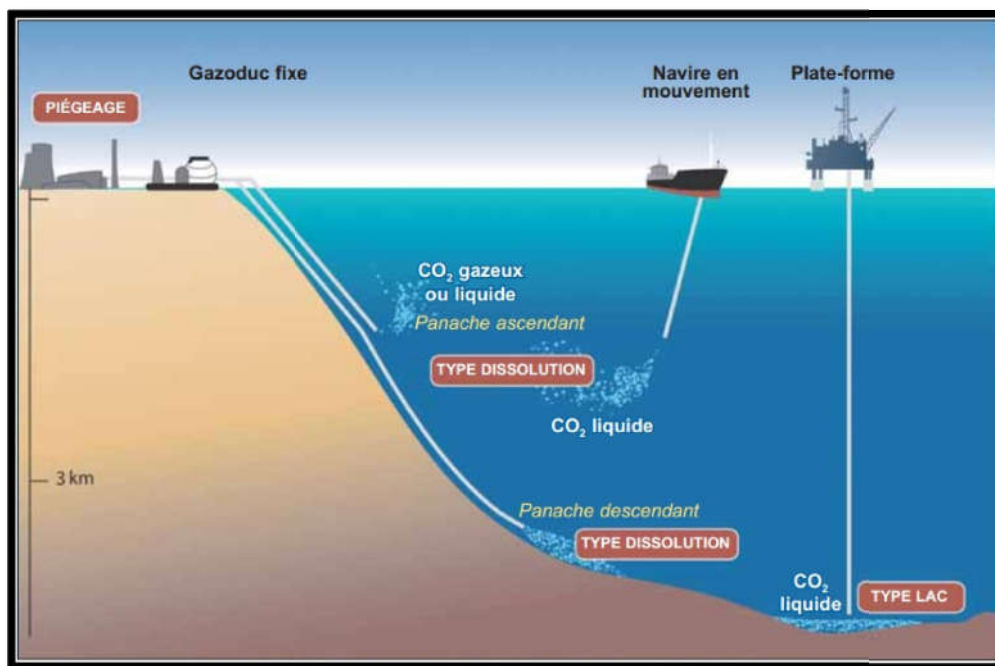


Figure (II-4): Aperçu des principes de stockage dans les océans [8]

Le CO₂ pourrait être acheminé par gazoduc ou par navire jusqu'à l'emplacement choisi et injecté dans la colonne d'eau ou déposé au fond de l'océan. Le gaz dissous et dispersé s'intégrerait ensuite au cycle global du carbone.

II.1.1.3.3. Fixation industrielle du dioxyde de carbone dans les carbonates inorganiques:

La carbonatation minérale: Cette technique consiste à fixer le CO₂ au moyen d'oxydes alcalins et alcalino-terreux (tels l'oxyde de magnésium MgO et l'oxyde de calcium CaO), que l'on trouve à l'état naturel dans des roches silicatées, par exemple la serpentine et l'olivine. Les réactions chimiques qui surviennent entre ces matières et le CO₂ produisent des composés comme le carbonate de magnésium (MgCO₃) et le carbonate de calcium (CaCO₃ couramment appelé calcaire). Les quantités d'oxydes métalliques présentes dans la croûte terrestre excèdent celles qui seraient nécessaires pour fixer la totalité du CO₂ que produirait la combustion de toutes les réserves actuelles de combustibles fossiles.

Certains déchets industriels, par exemple les cendres et les scories de la production d'acier inoxydable, renferment également de petites quantités d'oxydes métalliques. La carbonatation minérale produit du silicate et des carbonates qui sont stables sur de longues périodes et que l'on peut donc éliminer dans des sites tels que des mines de silicate ou réutiliser dans la construction

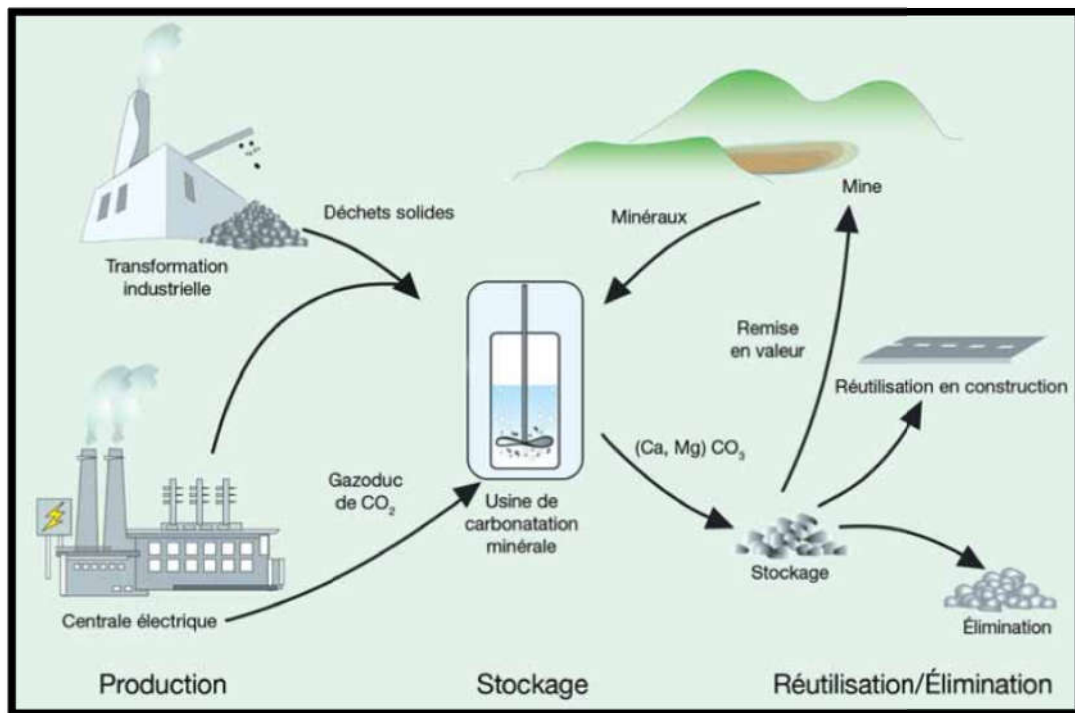


Figure (II-5): Flux des matières et étapes de la carbonatation minérale de roches silicatées ou de résidus industriels [8]

L'utilisation industrielle du CO₂ sous forme gazeuse ou liquide, ou comme matière première dans les procédés chimiques, peut produire des produits carbonés intéressants dans ces procédés, mais ils ne devraient pas réduire significativement les émissions de dioxyde de carbone. Le potentiel d'utilisation industrielle du CO₂ est très faible et ce gaz peut être stocké pendant une courte période.

Le CO₂ est utilisé comme réactif dans plusieurs procédés chimiques et biologiques, par exemple pour produire de l'urée et du méthanol, ainsi que dans diverses applications directes (horticulture, réfrigération, conditionnement alimentaire, soudage, boissons, extincteurs d'incendie)

Le CO₂ dissous et dispersé fera partie du cycle mondial du carbone et finira par s'équilibrer avec le CO₂ dans l'atmosphère. Une usine avec CCS peut réduire les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère d'environ 80-90 % par rapport à une usine sans CCS.

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Tableau (II-2): Les techniques de technologie de stockage du CO₂

Méthodes et lieux de stockage		État actuel des recherches
Géologique	Dans les puits de pétrole et gaz (en état d'exploitation ou abandonné)	Opérationnel. Couplage avec des techniques d'extraction du pétrole (EOR).
	Dans des aquifères salins	En étude et opérationnel : formations géologiques peu connues, mais compte avec le projet industriel de Sleipner.
	Dans les mines de charbon inexploitées	En étude, peu de projets. Peu avoir couplage avec techniques d'extraction du méthane
Océanique	Dans l'océan par dilution (fertilisation des océans)	Option nulle pour le (CCS)
	Dans l'océan par formation de lac	Option interdite en Europe. Problème d'acidification de l'eau.
Carbonates, minérale	Par réaction et transformation en carbonates minéraux	Option en étude R&D.

L'importance du CSC en tant que stratégie d'atténuation des émissions de carbone a été renforcée par un certain nombre d'organismes intergouvernementaux et de comités internationaux [1].

La technologie CSC a fait ses preuves commercialement depuis 1996 (projet Sleipner, Norvège) et est considérée comme une technologie mature. Début 2013, il y avait huit projets CSC à grande échelle en exploitation dans le monde et neuf projets en construction avec une capacité totale de capture et de stockage de CO₂ de 37 millions de tonnes par an [23].

À l'échelle mondiale, il existe près de 300 activités actives ou planifiées liées au CSC, ce qui indique un engagement croissant envers cette option technologique.

Trois projets de stockage d'envergure industrielle sont en cours d'exécution dans le cadre du projet de Sleipner, réalisé en Norvège dans une formation saline sous-marine, du projet de RAP de Weyburn, au Canada, et du projet d'In Salah réalisé en Algérie dans un champ de gaz naturel. D'autres projets sont prévus et encadrés. [8]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Tableau (II-3) : Les sites dans lesquels des opérations de stockage du CO₂ ont été réalisées, sont en cours ou sont prévues au sein de projets pilotes ou d'applications commerciales à grande échelle

Nom du projet	Pays	Début de l'injection (année)	Taux moyen d'injection approximatif (tCO ₂ /jour)	Stockage total (prévu) (tCO ₂)	Type de réservoir
Weyburn	Canada	2000	3000-5000	20 000 000	RAP
In Salah	Algérie	2004	3000-4000	17 000 000	Gisement de GN
Sleipner	Norvège	1996	3000	20 000 000	Formation saline
K12B	Pays-Bas	2004	100 (1000 prévu à compter de 2006)	8 000 000	Récupération assistée du GN
Frio	États-Unis	2004	177	1600	Formation saline
Fenn Big Valley	Canada	1998	50	200	RAMCH
Qinshui Basin	Chine	2003	30	150	RAMCH
Yubari	Japon	2004	10	200	RAMCH
Recopol	Pologne	2003	1	10	RAMCH
Gorgon (prévu)	Australie	~2009	10000	inconnu	Formation saline
Snøhvit (prévu)	Norvège	2006	2000	inconnu	Formation saline

II.2. Les énergies renouvelables et le mix énergétique

II.2.1. Généralités

Une énergie renouvelable est une énergie exploitée par l'homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.[24]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Les énergies renouvelables sont le plus souvent opposées aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon ou uranium). À l'inverse de ces dernières, elles sont inépuisables, car sans cesse reconstituées par la nature. Les énergies renouvelables proviennent du soleil, du vent, de la chaleur terrestre, ou encore des marées.

La baisse du réchauffement climatique passe par une réduction de la dépendance aux énergies fossiles. Autre avantage par rapport à la combustion de ressources fossiles : l'exploitation des énergies renouvelables est peu carbonée. En raison de leur faible impact environnemental, elles sont aussi appelées « énergies vertes ».

Au cours de la dernière décennie, l'essor des énergies renouvelables a été constant, grâce à la multiplication des installations de production : éoliennes, barrages, panneaux photovoltaïques, biomasse, etc. La part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique de la plupart des territoires progresse ainsi, année après année.

Tout développement ne sera vraiment durable que s'il devient économiquement viable et est acceptable socialement. [25]

II.2.2. Les différents types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont divisées en plusieurs catégories, dont : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, les panneaux photovoltaïques, la biomasse, l'énergie hydraulique...



Figure (II-6): Les différents types d'énergies renouvelables

II.2.2.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. c'est une énergie verte car sa production n'émet pas directement de CO₂. le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. [26]

Il existe deux types de l'énergie solaire:

A) L'énergie solaire thermique:

On désigne par « solaire thermodynamique » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique

B) L'énergie solaire photovoltaïque:

Parfois on cherche à produire le plus possible d'énergie solaire dans les périodes les moins ensoleillées pour assurer un fonctionnement minimal hiver comme été, pour une consommation constante ou plus élevée en hiver qu'en été.

Dans ce cas, il vaut mieux placer le panneau en position « hiver » très élevées à la verticale, pour produire le plus possible avec des soleils bas. Cette position est fonction de l'hauteur du soleil en hiver et donc de l'attitude de lieu. [27]

L'énergie solaire photovoltaïque s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés, tels que les régions de montagnes, les îles et les zones rurales des pays en développement, particulièrement en Afrique et en Asie.

Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire photovoltaïque a pris une toute autre dimension, à l'échelle mondiale, suite à la prise de conscience de l'enjeu environnemental lié au réchauffement climatique et à la nécessité de développer des énergies renouvelables, non émettrices de CO₂.

Tableau (II-4) : La production d'électricité solaire dans le monde

Production d'électricité solaire photovoltaïque (TWh)										
Pays	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	% 2016	2017*	2018*
 Chine	0,7	2,6	6,4	15,5	29,2	44,8	75,3	23,0 %	117,8	177,5
 États-Unis	3,1	5,3	9,2	14,9	23,1	32,1	46,6	14,2 %	74,0	92,6
 Japon	3,5	4,8	6,6	12,9	23,0	34,8	51,0	15,5 %	61,8	71,7
 Allemagne	11,7	19,6	26,4	31,0	36,1	38,7	38,1	11,6 %	39,4	46,2
 Italie	1,9	10,8	18,9	21,6	22,3	22,9	22,1	6,7 %	24,4	22,7
 Inde	0,1	0,8	2,1	3,4	4,9	5,6	14,1	4,3 %	21,5	30,7
 Royaume-Uni	0,04	0,2	1,4	2,0	4,1	7,5	10,4	3,2 %	11,5	12,9
 France	0,6	2,1	4,0	4,7	5,9	7,3	8,2	2,5 %	9,6	10,2
 Espagne	6,4	7,4	8,2	8,3	8,2	8,3	8,1	2,5 %	8,5	7,8
 Australie	0,4	1,4	2,3	3,5	4,0	5,0	6,2	1,9 %	9,0	12,1
 Corée du Sud	0,8	0,9	1,1	1,6	2,6	4,0	5,1	1,6 %	7,1	9,3
 Chili				0,01	0,5	1,3	2,6	0,8 %	3,9	5,1
 Afrique du Sud				0,05	1,1	2,2	2,6	0,8 %	4,3	4,9
 Thaïlande	0,1	0,1	0,5	1,0	1,6	1,9	2,7	0,8 %	4,5	4,7
 Grèce	0,2	0,6	1,7	3,6	3,8	3,9	3,9	1,2 %	4,0	3,8
 Belgique	0,6	1,2	2,1	2,6	2,9	3,1	3,1	0,9 %	3,3	3,6
 Canada	0,3	0,6	0,9	1,5	2,1	2,9	3,1	0,9 %	3,3	3,5
 Pays-Bas	0,06	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,6	0,5 %	2,2	3,2
Monde	32,2	63,2	99,0	139,5	190,2	250,2	328,0	100 %	453,5	584,6

On peut dire que l'industrie de l'énergie solaire photovoltaïque est suffisamment structurée, puissante et performante pour continuer sa croissance et apporter au monde une énergie propre, sûre et durable.

Cuisiner avec le soleil au lieu du charbon et du carburant

Plusieurs modèles de cuiseurs solaires ont été construits et distribués dans le monde rural à travers la planète. En Afrique et dans la région sub-saharienne, la vulgarisation de la cuisson solaire est soutenue par plusieurs organisations gouvernementales et non gouvernementales pour la lutte contre la déforestation et afin de répondre aux besoins des populations des régions dépourvues des ressources énergétiques conventionnelles comme le Tchad, le Mali, le Niger, le Burkina-faso et autres.

Cette forme d'énergie n'est issue ni d'une mine, ni d'une raffinerie ou encore d'une centrale nucléaire. Elle est gratuite et disponible en tout lieu. Certes, la cuisson solaire est lente et ne peut être pratiquée à tout moment surtout par ciel couvert ou à la tombée de la nuit, mais elle offre une alternative non polluante à l'utilisation des énergies fossiles. [28]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Avec la demande énergétique sans cesse croissante et les prix élevés des énergies conventionnelles notamment le pétrole et le gaz; il devient plus que jamais nécessaire de développer et vulgariser la cuisson solaire dans le monde, en général et dans les régions Sahariennes isolées en particulier.

II.2.2.2. Energie éolienne

L'utilisation de la force du vent pour produire de l'énergie n'est pas nouvelle, l'énergie du vent est apparue pour la première fois sous l'image de voiles pour les bateaux leur permettant d'avancer se passant de l'énergie des galériens.

Quant à l'énergie éolienne elle fut pour la première fois exploitée par les perses dans une conception très simple pour l'irrigation de leurs cultures etc. techniques qui se répandit dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades.



Elles ont ensuite été utilisées pour pomper l'eau et couper le bois, puis en 1891 le premier aérogénérateur fut inventé par le danois Poule La Cour qui a pour but de produire de l'électricité. Puis la première éolienne à axe vertical fut inventée bien que la puissance générée était assez faible jusqu'en 1957 où la puissance atteignit 200kw par le constructeur danois Gedser. Mais le marché de l'éolien ne prit de l'ampleur qu'après le premier choc pétrolier en 1973. [29]

Énergie renouvelable la plus utilisée en Europe, l'énergie éolienne consiste à transformer la force du vent en électricité à l'aide d'éoliennes. Celles-ci peuvent être installées sur terre et la mer, on parle alors d'éolienne off-shore.

L'aérogénérateur ou l'éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (au niveau de la turbine) puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice qui sera transmise au réseau électrique. [30]

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

Tableau (II-5): La production d'électricité éolienne dans le monde twh

Pays	1990	2000	2010	2015	2017	2018	2019	% 2019	Variation 2019/2010	part mix 2019*
 Chine	0,002	0,6	44,6	185,8	295,0	365,8	405,7 ^{b 1}	28,4 %	+810 %	5,4 %
 États-Unis	3,1	5,6	95,1	193,0	257,2	277,9	303,4	21,2 %	+219 %	6,9 %
 Allemagne	0,07	9,4	38,5	80,6	105,7	110,0	126,0	8,8 %	+227 %	20,4 %
 Inde	0,03	1,7	19,7	35,1	51,1	60,3	66,0	4,6 %	+235 %	4,1 %
 Royaume-Uni	0,01	0,9	10,2	40,3	50,0	57,1	64,1	4,5 %	+528 %	19,8 %
 Brésil	-	0,002	2,2	21,6	42,4	48,5	56,0	3,9 %	+2445 %	8,9 %
 Espagne	0,014	4,7	44,3	49,3	49,1	50,8	55,6	3,9 %	+26 %	20,3 %
 France	-	0,08	9,9	21,4	24,7	28,5	34,6	2,4 %	+249 %	6,1 %
 Canada	-	0,3	8,7	27,0	28,8	29,7	34,2	2,4 %	+293 %	5,2 %
 Turquie	0	0,03	2,9	11,7	17,9	19,9	21,8	1,5 %	+652 %	7,2 %
 Italie	0,002	0,6	9,1	14,8	17,7	17,5	20,2	1,4 %	+122 %	6,9 %
 Suède	0,006	0,5	3,5	16,3	17,6	16,6	19,8	1,4 %	+466 %	11,8 %
 Australie	0	0,06	5,1	11,5	12,6	15,2	17,7	1,2 %	+247 %	6,7 %
 Mexique	0	0,02	1,2	8,7	10,4	13,1	17,6	1,2 %	+1367 %	5,3 %
 Danemark	0,6	4,2	8,7	14,1	14,8	13,9	16,1	1,1 %	+106 %	55,2 %
 Pologne	0	0,005	1,7	10,9	14,9	12,8	15,0	1,0 %	+804 %	9,2 %
 Portugal	0,001	0,17	9,2	11,6	12,2	12,6	13,7	1,0 %	+50 %	25,9 %
Total mondial	3,9	31,3	342,2	833,7	1 132,8	1 273,4	1 430⁹⁷	100,0 %	+319 %	5,3 %

II.2.2.3. Energie hydraulique

Découverte au XIXe siècle, l'énergie hydraulique provient de la force motrice des chutes et cours d'eau. L'installation de barrages sur des lacs ou des rivières permet de retenir l'eau et de l'acheminer jusqu'à une centrale, où une turbine transforme l'énergie de la gravité de l'eau en électricité.

L'énergie hydraulique est l'énergie renouvelable la plus exploitée aujourd'hui au niveau mondial. La part de l'énergie hydraulique dans la production électrique mondiale (16%). Il s'agit de la troisième source d'énergie la plus utilisée pour produire de l'électricité, derrière le charbon (40%) et le gaz (19%), mais devant le nucléaire (15%). [31]

Sur le plan mondial, l'Asie représente 27% de la production totale d'hydroélectricité. La Chine en est le plus gros producteur, devant le Brésil, le Canada et les États-Unis.

II.2.2.4. Energie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Cette énergie peut être valorisée soit sous forme d'électricité, soit sous forme de chaleur et chaque type se distingue ses technologies et ses applications multiples. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

Par exemple; Au pays d'Islande, La centrale géothermique de Krafla (Fig II-7) utilise l'eau chaude du champ géothermique de la région pour produire de l'électricité. La capacité de production est d'environ 60 MWe. [32]



Figure (II-7): La centrale géothermique de Krafla pour la production d'électricité [33]

II.2.3. Les énergies renouvelables et les émissions de CO₂

L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de CO₂ notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, les EnR sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées.

Pour mesurer les émissions de CO₂ des énergies renouvelables, on utilise l'outil d'ACV (Analyse de Cycle de Vie) qui permet de connaître les émissions de CO₂ par kWh d'électricité produite, en intégrant les émissions de CO₂ issues de la fabrication des infrastructures, de l'extraction des ressources et de la fin de vie. D'après le rapport du GIEC

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

(Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat), les énergies renouvelables bénéficient d'ACV favorables par rapport à beaucoup d'énergies. Voici la liste des énergies en fonction de leurs émissions de CO₂ d'après le rapport du GIEC, Annexe 3 (de la moins polluante à la plus polluante, en valeurs médianes) :

Tableau (II-6) : Les différents énergies et leurs émissions de CO₂

Les différents énergies	leurs émissions de CO ₂ (gCO ₂ eq/kWh)
Éolien terrestre	11
Nucléaire	12
Hydroélectricité	24
Solaire thermodynamique	27
Géothermique	38
Solaire photovoltaïque	41-48
Biomasse	230
Gaz naturel	490
Charbon	820

II.2.4. Quelques exemples de décarbonisation

➤ Les formes de production d'électricité neutres en carbone reposent sur l'utilisation de sources d'énergie renouvelable (éoliennes, énergie solaire photovoltaïque ou à concentration, grands barrages et petites centrales hydroélectriques, et biomasse), mais aussi sur l'énergie nucléaire et les ressources en combustibles fossiles dotées de systèmes de capture et séquestration du carbone (CSC). Il convient d'ajouter que la bioénergie associée au CSC peut produire une électricité dont le bilan des émissions de CO₂ est négatif. Il est possible de produire de l'électricité sans émissions de carbone en ne mettant en œuvre que

CHAPITRE II : La décarbonisation et les énergies renouvelables dans le Monde

certaines de ces technologies, par exemple en écartant l'énergie nucléaire et sans utiliser le CSC si cette option n'est pas disponible.

➤ La substitution des combustibles fossiles par une électricité à faible émissions de carbone réduira considérablement les émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs énergivores que sont le transport, le bâtiment et la production industrielle. Les véhicules électriques et les véhicules hybrides rechargeables, ainsi que les cuisinières, pompes à chaleur et chaudières électriques sont autant de technologies plus économes en énergie que leurs alternatives alimentées par des combustibles fossiles ; alimentées par une électricité propre, elles sont en mesure de réduire les émissions de CO₂.



Figure (II-8) : Les quatre piliers de la décarbonisation

➤ La promotion de l'efficacité énergétique permet de diminuer les émissions, facilite l'électrification et réduit les factures énergétiques. L'efficacité énergétique offre un excellent potentiel dans les secteurs du bâtiment, du transport et de l'industrie. Dans le domaine de l'agriculture et de la sylviculture, elle suppose de minimiser la perte et le gaspillage de nourriture, d'accroître l'offre de produits à plus faible intensité de carbone (biocarburants, matériaux en bois), de modifier la demande de produits alimentaires pour orienter les consommateurs vers des aliments impliquant peu d'émissions de CO₂ et de libérer des terres qui serviront ainsi à d'autres activités de réduction des émissions.

➤ Une meilleure gestion des terres permettra aux pays d'améliorer leur capacité à servir de puits nets de carbone. Les modèles analysés par le GIEC montrent que le secteur de l'agriculture et de la sylviculture devra probablement parvenir à la neutralité carbone d'ici 2030 pour que l'objectif d'une hausse des températures limitée à 2°C puisse être atteint. Dans ce domaine, les politiques d'atténuation du changement climatique peuvent réduire les émissions dues à l'utilisation des terres et à leur changement d'affectation, et favoriser la diminution du carbone présent dans l'atmosphère.

CONCLUSION

Le captage puis le stockage de CO₂ est une solution envisagée pour la réduction des émissions de GES sur des usines de production d'électricité ou des industries telles que les sidérurgies et les cimenteries, c'est-à-dire prioritairement sur les grands sites émetteurs de CO₂

Le captage et stockage de CO₂ est une technologie qui s'inscrit pleinement dans les objectifs de réduction des émissions des gaz à effet de serre limitant le réchauffement climatique. En effet, les énergies renouvelables ne pourront répondre massivement à ces besoins de la croissance mondiale qu'à une échéance de moyen à long terme et, à moins de renchérir fortement le coût de l'énergie, les moyens actuels de production doivent continuer à être opérés, en étant progressivement équipés d'installations CCS afin de diminuer leur impact environnemental.

Plusieurs technologies de captage existent. Le prix du captage est actuellement trop important sans une valorisation du CO₂ ou un cadre législatif contraignant pour assurer un déploiement à grande échelle. Néanmoins, les travaux en cours permettent d'être optimiste quant à la possibilité de réduire ce coût via le développement à court-moyen terme de procédés plus efficaces. En parallèle, des travaux importants sont réalisés sur le stockage géologique de CO₂ permettant de garantir sa pérennité via la caractérisation des sites et de leurs capacités. Des premières réalisations à l'échelle commerciale sont également en cours, qu'il s'agisse d'actions d'EOR ou d'injection dans des aquifères.

Il est évident qu'une réduction des rejets anthropiques de CO₂ à l'atmosphère est obtenue de façon plus sûre et moins coûteuse grâce au recours à des sources d'énergie non émettrices de CO₂, en remplacement des combustibles fossiles. La production d'électricité est une des industries pour laquelle cette transition est possible, grâce au nucléaire et aux renouvelables. On pourrait alors réserver les techniques de captage-stockage aux industries qui ne peuvent fonctionner sans les combustibles fossiles.

CHAPITRE III :

***LES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE
POTENTIEL ET PERSPECTIVES***

INTRODUCTION

Depuis le début du XXI^e siècle, l'un des problèmes majeurs de l'humanité est d'allier l'énergie, le respect de l'environnement et le développement économique, notamment pour les pays du Sud, un enjeu de développement durable a été clairement démontré au Sommet de la Terre à Johannesburg 2002.

Dans cette perspective, de grands combats sont à mener au cours du siècle pour la survie de la planète : activer la technologie de décarbonisation, faire de l'efficacité énergétique une priorité de la politique internationale, réduire les émissions de gaz à effet de serre, économiser l'énergie pour le développement économique et réduire les inégalités, responsabiliser les parties prenantes, renforcer la régulation mondiale.

Algérie est située dans une zone vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques. Donc sensible aux déséquilibres environnementaux engendrés par le réchauffement climatique que subit la planète. Parmi les secteurs émetteurs de gaz à effet de serre responsables de ce réchauffement, le secteur du transport, aujourd'hui responsable d'un quart des émissions, il pourrait être à l'origine d'un tiers de celles-ci en 2030.

De plus, la demande en énergie, notamment dans les pays en voie de développement, va en augmentant, pour une source d'origine fossile, épuisable. Pour pallier à ces deux problèmes, les énergies renouvelables sont la meilleure alternative durable. L'Algérie a inscrit sa stratégie énergétique dans le cadre du développement durable en intégrant la promotion des énergies renouvelables. En outre, un cadre juridique favorable au développement des énergies renouvelables a été adopté.

III.1. Généralités sur la situation énergétique en Algérie

En Algérie, tout comme à l'échelle globale, le secteur de l'énergie est l'un des principaux facteurs du changement climatique. Le rapport de la Commission économique de l'ONU pour l'Afrique et de son bureau Afrique du Nord avait relevé en 2011 que l'Algérie possède de grandes réserves de pétrole et de gaz naturel et dépend largement de ces ressources pour générer des recettes d'exportation. Le secteur du gaz et du pétrole représente 45.9% du PIB algérien. Les exportations totales d'hydrocarbures ont représenté presque 98% du volume total des exportations pour l'année 2007.

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

Selon le rapport l'ONU, l'Algérie est le 4ème plus important exportateur de gaz naturel liquéfié (GNL) dans le monde, le 3ème plus grand exportateur de gaz de pétrole liquéfié (GPL) et le 5ème exportateur de gaz naturel. A cela s'ajoute l'augmentation de la consommation énergétique de ce pays d'Afrique du Nord, liée à la croissance économique, à l'accroissement de la population et à l'augmentation de la consommation énergétique par personne. Entre 2002 et 2011, la consommation énergétique moyenne a augmenté de 5,7% .

En Algérie, l'ensoleillement annuel moyen est évalué à 3000 heures, avec une moyenne d'ensoleillement de 6,57 kWh/m²/jour. Avec un territoire composé de 86% de désert saharien et par son positionnement géographique, l'Algérie possède le champ solaire le plus important au monde. Si on devait comparer le solaire au gaz naturel, le potentiel solaire algérien est équivalent à un volume de 37 000 milliards de mètres cubes par an, soit plus de 8 fois les réserves de gaz naturel du pays, avec pour différence supplémentaire que le potentiel solaire est renouvelable, contrairement au gaz naturel.

La situation énergétique du pays n'est pas en faveur du développement des Energies Renouvelables en général et plus particulièrement des applications de l'énergie solaire thermique et du chauffage solaire. En effet : les recettes de l'Algérie proviennent à 98% des hydrocarbures. Le taux d'électrification du pays est à 97% ; Le taux de couverture en gaz est de 57% ; 96% de la production d'électricité est produite à partir du Gaz Naturel ; 3% d'électricité à partir du Diesel (pour les régions isolées du sud algérien) ; 1% d'électricité à partir de l'eau (une centrale hydraulique de 100 MW) ; La production d'électricité à partir des ENR est très faible: < 1MW. Néanmoins, plusieurs sociétés nationales et internationales ont investi dans le domaine grâce aux programmes nationaux lancés par le ministère de l'énergie et des mines, le cadre réglementaire ainsi les campagnes de sensibilisation. [34]

III.1.1. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie:

III.1.1.1. Le potentiel solaire:

L'Algérie est considérée comme l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. En effet, de part sa position géographique, ce pays dispose d'un potentiel qui dépasse les cinq (5) milliards GW h /an, avec plus de 2 500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une partie très importante de son territoire. Cette durée peut dépasser 3 800 heures d'ensoleillement dans les hauts-plateaux et Sahara.

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KW / h sur la majeure partie du territoire national, ce potentiel est décomposé comme suit : au nord, près de 1 700 KW h / m²/ an et 2263 KW h /m² /an au sud.

Si on compare le potentiel solaire au gaz naturel en Algérie, le potentiel solaire Algérien est équivalent à un volume de 37 000 milliards de mètres cubes, soit plus de huit fois les réserves du gaz naturel du pays, notant que le potentiel solaire est renouvelable contrairement au gaz naturel.

Tableau (III-1) : Potentiel solaire en Algérie par région [35]

Regions	Côte	H. Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

III.1.1.2. Le potentiel éolien d'Algérie

En Algérie, la première expérience avec l'éolienne remonte à l'année 1957 avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) qui fut racheté de l'Angleterre par la société « Electricité et Gaz d'Algérie » puis démontée et installée en Algérie. [36]

Malgré les importants investissements dans le domaine de la recherche et développement des éoliens qu'a connu le monde après le premier choc pétrolier, l'Algérie fonce dans ce domaine en adoptant le programme national de développement des énergies renouvelables (EnR) approuvé en 2011 et révisé en 2015 avec un objectif d'atteindre en 2030 une puissance totale de 22000 MW dont l'éolien se réserve la part de 5010 MW après la part des photovoltaïques (PV) avec 13575 MW. [37]

Le premier projet en la matière date de juin 2014 avec la première ferme éolienne implantée à Adrar d'une puissance de 10 MW qui représentait 5% environ de l'énergie électrique fournie par le réseau local.

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes :

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

- ❖ Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.
- ❖ Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Les cartes de vents établis par plusieurs chercheurs montrent que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-est. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. Selon le premier atlas vent de l'Algérie, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats faits sur 10 ans de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER [38]. Les travaux effectués récemment, ont mis en évidence l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud. Les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation.

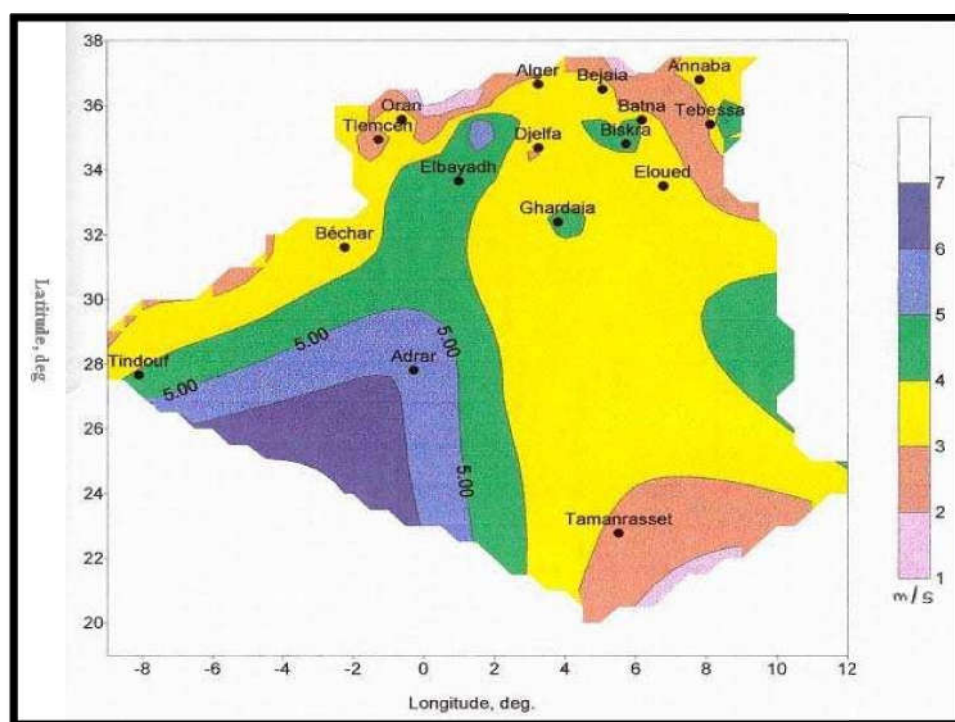


Figure (III-1) : Atlas éolien de l'Algérie

Sud: vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement de Sud-ouest (supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar).

Nord : vitesse moyenne peu élevée avec des microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud

III.1.1.3. Le potentiel de l'énergie géothermique à l'Algérie

En Algérie la climatisation est très énergivore en matière de consommation énergétique. Une solution se trouve dans l'exploitation des ressources naturelles non conventionnelles telles que la géothermie. Maîtriser les consommations énergétiques en améliorant l'isolation thermique est la première étape à privilégier. Mais le recours à la géothermie peut permettre d'aller plus loin en raison de son indépendance des éléments climatiques, sa présence locale et son respect de l'environnement. La géothermie consiste à prélever l'énergie présente dans les terrains ou dans les aquifères superficiels pour la transmettre à une habitation via une pompe à chaleur. Cette technique allie performance énergétique, économique et environnementale pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. [39]

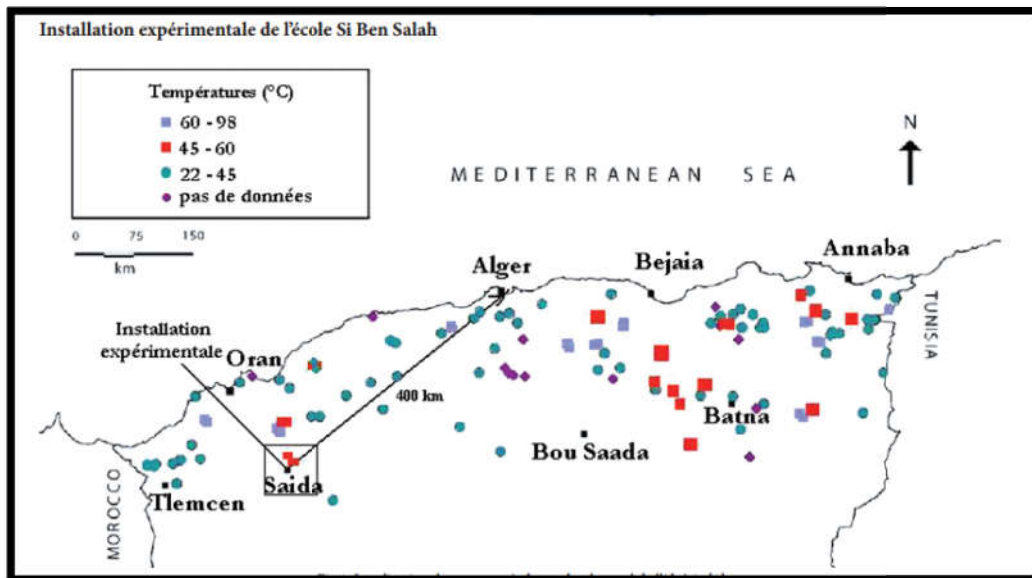


Figure (III-2): Localisation des sources géothermales du nord de l'Algérie [40]

III.1.1.4. Le potentiel de la biomasse:

En Algérie, les zones forestières couvrent environ 250 millions d'hectares, soit moins de 10% de la surface total du pays. Ce potentiel est estimé à 37 mtep dont environ 10% pourraient être récupérés. Cinq (5) millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel énergétique représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de Tep/ an. [41]

III.1.1.5. Le potentiel hydraulique:

Le secteur hydraulique possède 103 sites de barrage qui sont recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. Les quantités globales tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évolue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliard de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface, 103 sites de barrages sont actuellement en exploitation.

III.1.2. La stratégie énergétique algérienne dans le contexte du développement durable

Avec la croissance de la demande en énergie et dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂ dans l'atmosphère, L'Algérie a décidé de mettre en place une stratégie pour développer les différentes applications des énergies renouvelables. Parmi les applications les plus prometteuses on trouve les chauffe-eau solaires. En effet, des programmes nationaux, des campagnes de sensibilisation, des investissements et plusieurs projets de partenariat et coopération internationales ont été réalisés; les secteurs ciblés sont l'habitat, le transport, l'industrie :

III.1.2.1. Programme National pour le développement des CES

La volonté des pouvoirs publics est traduite par des programmes nationaux qui ciblent les deux secteurs tertiaires et résidentiels. Parmi ces programmes nous citons:

- Programme Horizon 2011 pour alimenter 5500 foyers en eau chaude solaire (financé par le PNUD)
- Programme ALSOL: 1000 chauffe-eau individuels dans les logements et 1000 dans l'industrie financés par le Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME)
- Programme d'installation de 16000 m² de chauffe-eau solaire pour des sites isolés (financé dans le cadre du PNME) [34]

III.1.2.2. Loi sur la gestion de l'énergie

La maîtrise de l'énergie couvre l'ensemble des mesures et actions mises en œuvre pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, le développement des énergies renouvelables et la réduction de l'impact du système énergétique sur l'environnement et le développement des énergies renouvelables vise l'introduction et la promotion des industries de transformation des énergies renouvelables exploitables, notamment énergie solaire, géothermie, biomasse, hydroélectricité et énergie éolienne.

Une Agence Nationale de la Maîtrise de l'Energie (APRUE), chargée d'animer et d'animer le processus de mise en œuvre des programmes et actions de maîtrise de l'énergie a été créée. La mission première de l'APRUE est l'élaboration du Programme National de Maîtrise de l'Energie (NPEM), pour en assurer le suivi et l'évaluation. [42]

Dans le cadre de cette loi relative à la maîtrise de l'énergie 99-09 du 28 juillet 1999, un Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (NFEM) a été créé. Elle finance des projets de maîtrise de l'énergie. Le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (NFEM) contribue au financement de projets d'énergies renouvelables. L'article 33 prévoit divers avantages fiscaux et douaniers accordés aux projets qui contribuent à la promotion des énergies renouvelables. [43]

III.1.2.3. Loi sur la distribution d'électricité et de gaz par canalisation

La loi (N° 02-01 du 5 février 2002) relative à l'électricité et à la distribution publique de gaz libéralisant ce secteur a prévu la promotion de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et son intégration dans le réseau.

Dans le cadre de la mise en œuvre de cette loi, un décret entré en vigueur le 25 mars 2004, relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité a été promulgué. Il crée un régime d'incitation à la production d'électricité à partir de sources renouvelables.

Les bonus sont accordés d'importants avantages aux producteurs d'électricité à partir de sources renouvelables. La prime peut atteindre 300 % du tarif applicable.

III.1.2.4. Loi relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable

La promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable est réalisée à travers un programme national de promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable, et un bilan annuel de l'utilisation des énergies renouvelables et ainsi que des instruments pour promouvoir les énergies renouvelables et ce programme national comprend toutes les campagnes d'information, de formation ou de vulgarisation ainsi que des incitations à la recherche, la production, le développement et l'utilisation des énergies renouvelables. [42]

Cette loi prévoit également des incitations au développement des énergies renouvelables et la création d'un Observatoire national des énergies renouvelables en charge de la promotion et du développement des énergies renouvelables.

III.1.2.5. Quelques projets

L'électrification des villages ruraux et les services publics d'électricité sont les deux axes poursuivis par le gouvernement. Ainsi, près de 1000 ménages dans 20 villages de quatre wilayas du sud bénéficient d'un accès à l'électricité depuis 2000, grâce à des kits photovoltaïques qui ajouteront 16 villages supplémentaires dans la même zone (900 ménages) et alimenteront plus de 100 sites de télécommunications. De même, une centrale hybride solaire/diesel de 13 KWC installée à Illizi permet à 300 ménages soit 2000 personnes, de bénéficier d'un accès à l'électricité. [42]

Des projets menés par le Haut Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS), établissement public dont la mission est l'aménagement des zones stepiques et pastorales, ont également permis l'électrification de plus de 3000 foyers d'une capacité de 550 KWC, la fourniture de 160 panneaux solaires chiots pour une puissance de 240 KWC et 80 éoliennes équivalant à une puissance de 120 KWC. [42]

Au Nord, citant une centrale photovoltaïque de 10 KWC raccordée au réseau national (ce projet s'inscrit dans le cadre de la coopération algéro-espagnole) CDER, une station service Naftal alimentée à l'énergie solaire (Staoueli d'une capacité de 7 KWC), pilote centrales au profit de la Gendarmerie Nationale et l'alimentation photovoltaïque des stations de contrôle du trafic. [42]

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

La société de développement des ENR, New Energy Algeria (NEAL), a lancé le premier projet hybride solaire-gaz dans le cadre d'un programme global d'énergie solaire et éolienne, qui sont les potentiels les plus importants en Algérie. Pour le projet Hassi R'mel, une demande de financement à la Banque mondiale avait été introduite. Il se trouve que cinq autres projets dans le Monde avaient déjà obtenu un accord de crédit concessionnel de 50 millions dollars. Par la suite, en 2006, un programme complémentaire de trois autres centrales solaires hybrides solaire-gaz a été lancé et ces centrales étaient deux fois plus grandes que le projet initial de Hassi R'mel. Il s'agissait de trois centrales de 300 MW à Meghaier (est), Hassi R'mel (centre) et Naama (ouest).

Ces projets développés par NEAL, devaient compléter le programme d'énergie solaire qui avait démarré avec l'installation de la première centrale hybride gaz naturel-solaire implantée à Hassi R'mel en juillet 2011. Sur la période 2016–2020, il était prévu de réaliser quatre centrales thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1200 MW, puis l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023 et 600 MW par an jusqu'en 2030.

III.1.2.6. L'économie de l'énergie en Algérie:

L'Algérie est un pays qui dispose d'une réserve énergétique très importante au niveau mondial, mais le problème énergétique en Algérie est un problème qui se pose en terme de stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins de développement du pays, de choix d'un véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de la consommation énergétique avant l'épuisement de ces sources fossiles.

A ce stade la, la loi Algérienne sur la maîtrise de l'énergie et les nouveaux textes réglementaire mise en place récemment venus fixer et définir le cadre général des différentes actions afin de promouvoir une rationalisation de l'emploi des énergies disponibles. [44]

A ce titre, le représentant de Clarke Energy Algeria MICHAUT Stéphane a montré qu'à besoins énergétiques égaux, la cogénération permettait de réaliser 40% d'économie d'énergie primaire et de réduire de 50% les émissions d'un client industriel. Notant que l'Algérie s'oriente vers des moyens de production alternatifs, le solaire en première place puis l'éolien, elle doit au même temps préserver les ressources actuelles en gaz naturel et rationaliser son utilisation. [45]

III.1.2.7. Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables

➤ Au nord :

Centrale photovoltaïque de 10 Kwc connectée au réseau National électrique (ce projet entre dans le cadre de la coopération Algero- Espagnole) CDER

Station de services de Naftal alimentée en énergie solaire (Staoueli d'une puissance de 7 Kwc)

Installations pilotes au profit de la Gendarmerie Nationale: alimentation en énergie photovoltaïques des postes de surveillances routières.

➤ Dans la STEPPE (HCDS) :

Electrification de plus de 4000 foyers d'une puissance = 600kwc

Pompes solaires d'une puissance de 240 Kwc

pompes éoliennes d'une puissance de 120 kW

➤ Au Sud :

Electrification au solaire de 18 villages:

Electrification de plus de 1000 foyers

Electrification de 15 mosquées

Electrification de 15 écoles

Electrification de 20 postes de sécurité (gendarmeries, gardes communales)

Une centrale hybride solaire (PV) / diesel de 13 Kwc à Illizi (300 foyers, 2000 habitants)

Balisage de 2300 Km de pistes.

Alimentation de plus de 100 sites de télécommunications (puissance de 650 Kwc)

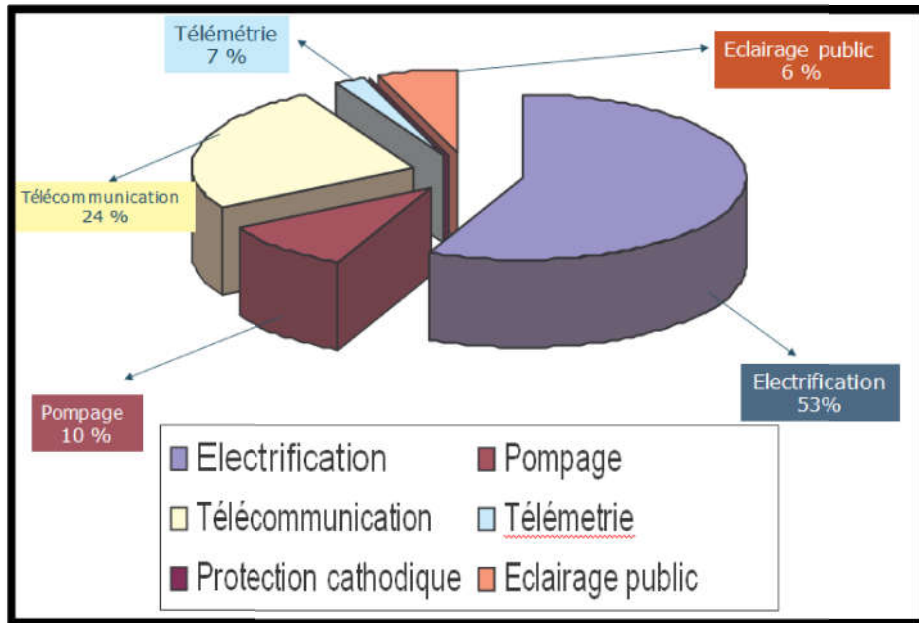


Figure (III-3) : Répartition des usages de la filière EnR en Algérie

III.1.2.8. Projets en cours et à venir

Actuellement, l'Algérie est engagée dans deux grands projets qui prévoient une place pour l'énergie solaire et éolienne, une centrale hybride gaz-solaire de 150 MW est située à Hassi R'mel dont le coût est de 350 millions d'euros, un parc technologique solaire qui produira de l'électricité du soleil d'une capacité de 6000 MW d'ici 2015 et d'un parc éolien de 10 MW à Tindouf, ces projets sont mis en œuvre par le groupe New Energy Algeria (NEAL).

La mise en service de la centrale hybride combinant solaire et gaz naturel à Hassi R'mel, la première à l'échelle mondiale est attendue en 2010. Cette centrale fait partie du programme de quatre unités hybrides en Algérie et s'étend sur une superficie de 152 ha. Il utilisera des miroirs paraboliques géants sur une superficie de 18 ha avec des panneaux solaires de 100 m pour produire de l'électricité. Il permettra à l'Algérie d'être pionnière en Méditerranée dans le domaine des énergies renouvelables. [42]

La société CEEG (filiale de la SONELGAZ), a lancé un appel d'offres international pour la réalisation d'un parc éolien d'une capacité d'environ 10 MW à Tindouf. Le coût d'investissement est estimé à environ 16 millions de dollars US.

Dans le cadre du Programme National de Maîtrise de l'Energie (NPME), 2006-2010, un grand projet de développement du marché des chauffe-eau solaires, financé par le PNUE, a

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

été lancé en 2008. Il s'agit de l'installation de 10 000 m² de capteurs solaires (4 000 CES en le secteur résidentiel).

Le groupe Sonelgaz a confié à sa société d'ingénierie CEEG la réalisation d'un projet de construction d'une fabrication de modules photovoltaïques sur le périmètre de la zone industrielle de Rouiba, au travers d'un mandat avec le maître d'ouvrage (Rouiba Lighting Company). L'enveloppe qui sera allouée à la création de cette première usine de fabrication de modules photovoltaïques est de 100 millions de dollars. Cette future entité, entrée en exploitation en 2012, aura une capacité annuelle de 50 MW. Il sera entièrement financé par Sonelgaz et installé au sein du site internet de la société Rouiba Lighting sur une superficie de 4 ha. [42]

Trois autres centrales hybrides solaire/gaz de 400 MW chacune sont prévues pour 2015. Le ministre de l'Energie et des Mines prévoit un investissement total estimé entre 15 et 18 Mds USD : 400/75 MW à Naama :

➤ début 2010 prévu ; 400/75 MW à Meghair : démarrage en 2012 ; 400/75 MW en HR M : prévu pour 2015.

➤ Un parc éolien d'une capacité de 10 MW, situé à Adrar, est en cours d'appel d'offres. Le projet de 16 millions USD est le premier projet du genre en Algérie et fonctionnera sur une technologie hybride éolien/diesel. Deux autres projets de parcs éoliens de 10 MW sont prévus à Timimoun (2012) et Bechar (2015).

L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation des Usages de l'Energie (APRUE), a engagé plusieurs actions, notamment, dans le cadre du Programme National de Maîtrise de l'Energie, le programme dénommé « ALSOL ». Ce programme vise à promouvoir le chauffe-eau solaire. Il apporte un soutien financier direct à 45 % du coût du chauffe-eau solaire installé individuellement et à 35 % pour une installation de chauffage solaire collectif à travers le Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (NFEM). Pour 2010, le programme « ALSOL » visait la promotion et la diffusion dans tout le pays, de quatre cents chauffe-eau solaires individuels pour la production d'eau chaude sanitaire. [46]

III.2. Les perspectives Mondiales et nationales dans ce contexte

Le soleil, comme première source d'énergie, cette course contre la montre devrait permettre de radicalement changer le visage du monde de l'énergie. En 2050, l'AIE estime que le recours au pétrole pourrait chuter de 75 % et le charbon de 90 % par rapport aux standards actuels. Tandis que l'éolien et le solaire pourraient fournir à eux seuls 70 % de l'électricité consommée dans le monde, contre à peine 10 % aujourd'hui.

L'énergie solaire, en particulier, pourrait devenir la première source de production d'énergie dans le monde d'ici-là. Enfin, la demande globale d'énergie pourrait baisser de près de 8 % dans le monde grâce aux efforts d'économie d'énergie, et ce malgré un accroissement de la population. Mais ce paysage semble encore très loin de celui que dessinent les géants du pétrole. Certes, les majors européennes tels que Total, Shell ou BP rivalisent de plans d'investissement très ambitieux dans les énergies renouvelables et promettent d'atteindre la neutralité carbone en 2050, mais elles entendent en parallèle continuer d'explorer et développer de nouveaux gisements. [47]

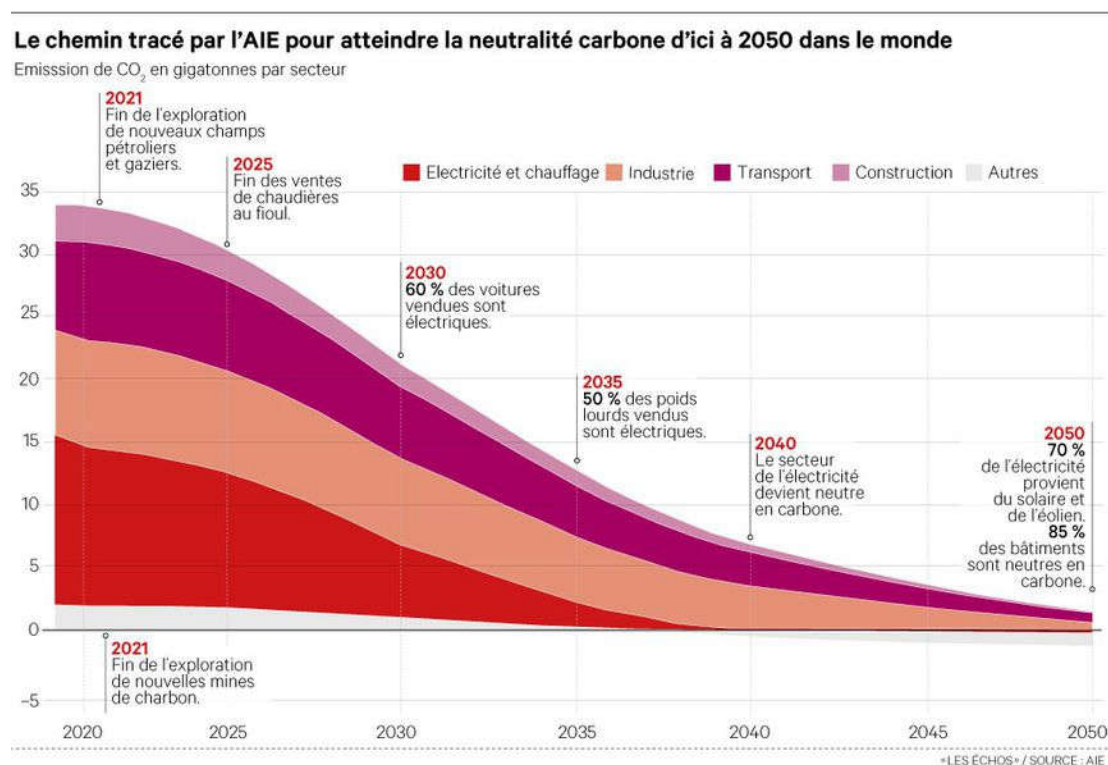


Figure (III-4): Plan directeur de l'AIE pour la neutralité carbone d'ici 2050

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

L'AIE le reconnaît dans son rapport, le chemin qu'elle préconise implique un bouleversement économique et géopolitique sans précédent. Si le monde suivait cette trajectoire, les prix du pétrole chuteraient à 25 dollars le baril à l'horizon 2050, contre environ 70 dollars aujourd'hui. La production de pétrole serait aussi concentrée de façon inédite dans les mains de l'Opep, mettant sous pression les finances de pays très dépendants des énergies fossiles comme la Russie ou le Nigéria. Tandis que les besoins de matériaux stratégiques comme le cuivre, le lithium ou le nickel pourraient exploser. [47]

III.2.1. Le Scénario énergétique transformateur ici décrit, associé à une perspective de décarbonisation approfondie, offre une assise durable, sobre en carbone et sans danger pour le climat, à un développement économique stable sur le long terme. Son effet sur l'emploi et la croissance économique, assurant un cadre de vie plus sain et une amélioration significative du bien-être, est prometteur. Ces perspectives ambitieuses réduiraient également de 70 % les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) liées à l'énergie à l'horizon 2050. Plus de 90 % de cette réduction serait obtenue grâce aux énergies renouvelables et aux mesures d'efficacité énergétique. [48]

III.2.2. La transition énergétique peut stimuler le développement socio-économique si elle est menée dans le cadre de politiques globales destinées à promouvoir une décarbonisation transformative des sociétés :

Une telle approche holistique alignerait la décarbonisation de l'énergie sur les objectifs économiques, environnementaux et sociaux. La proposition du Pacte vert pour l'Europe, et notamment l'appui international à l'énergie propre, en est un exemple. Les stimuli économiques après la crise sanitaire de 2020 pourraient orienter de nombreuses sociétés dans la même direction. [48]

III.2.3. L'objectif climatique mondial ultime serait d'atteindre zéro émission :

Les perspectives ici présentées étudient les moyens de réduire les émissions de CO₂ après 2050, en vue d'atteindre zéro émission nette, voire zéro émission. En ce sens, l'hydrogène et les carburants synthétiques, l'électrification directe, les biocarburants avancés et la gestion du carbone ont un rôle crucial à jouer, tout comme les modèles commerciaux innovants, les changements structurels et l'adaptation comportementale. [48]

III.2.4. La dernière tranche des émissions de CO₂ dans le monde sera la plus difficile et la plus coûteuse à éliminer:

Une transition énergétique ambitieuse conduirait à des émissions mondiales représentant encore de l'ordre d'un tiers de leurs niveaux actuels, les industries les plus énergivores, les transports et l'aviation étant toujours à l'origine d'émissions substantielles en 2050. La perspective d'une décarbonisation approfondie laisse entrevoir des solutions permettant de ramener ces secteurs à zéro. Bien qu'il reste encore beaucoup de chemin à parcourir, dans cette dernière étape, environ 60 % des réductions pourraient provenir des énergies renouvelables, de « l'hydrogène vert » et de l'électrification à base d'énergies renouvelables. [48]

III.2.5. Les options d'investissement sobres en carbone

- ◆ Les émissions de CO₂ liées à l'énergie ont augmenté de 1 % par an au cours de la dernière décennie.
- ◆ Le Scénario énergétique transformateur propose une feuille de route sans danger pour le climat, suffisante pour maintenir le réchauffement climatique de ce siècle « nettement en dessous de 2 °C », en ligne avec l'objectif de l'Accord de Paris .
- ◆ Ces perspectives de transformation du système énergétique annoncent également pour le milieu du siècle une hausse supplémentaire du PIB de 2,4 % par rapport à ce que permettraient les plans actuels.
- ◆ La transformation envisagée serait largement rentabilisée, dans la mesure où le rendement financier serait de trois à huit dollars pour chaque dollar investi .

III.2.6. La coordination pour une transition en douceur

- ◆ Le renforcement des ambitions régionales sera essentiel pour la réalisation des objectifs énergétiques et climatiques interdépendants .
- ◆ Même si ses bénéfices seront substantiels à l'échelle mondiale, les impacts de la transition au niveau structurel et sur le marché du travail varieront selon les régions, les types d'emplois et les secteurs.

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

- ♦ Les transitions énergétiques régionales seront différentes selon les situations socioéconomiques de départ .

- ♦ La mise en œuvre d'une transition énergétique mondiale à point nommé pour éviter des changements climatiques catastrophiques requiert un renforcement de la coopération internationale .

III.2.7. Scénarios et perspectives:

- ♦ Scénario énergétique programmé : il reflète les plans actuels, et autres politiques et objectifs programmés, notamment les contributions déterminées au niveau national (CDN) en vertu de l'Accord de Paris .

- ♦ Scénario énergétique transformateur : il décrit une voie ambitieuse, mais réaliste, basée sur l'accroissement à grande échelle des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique avec la promptitude requise pour pouvoir réaliser les objectifs climatiques .

- ♦ Perspective de décarbonisation approfondie : elle examine les solutions destinées à réduire davantage, voire nullifier, les émissions de CO₂ liées aux processus énergétiques et industriels.

- ♦ Analyse socio-économique : elle associe les systèmes énergétiques aux économies dans un cadre cohérent, mondial et quantitatif utilisant un modèle macro-économétrique

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

Il était prévu de réaliser quatre centrales thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1200 MW, puis l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023 et 600 MW par an jusqu'en 2030.

À l'horizon 2050, il y aura peut-être de nouvelles technologies, mais les inerties sont très fortes. L'utilisation d'énergies propres et renouvelables telles que l'énergie nucléaire et l'énergie solaire constitue une alternative sérieuse à l'utilisation de combustibles fossiles.

CHAPITRE III: Les énergies renouvelables en Algérie: potentiel et perspectives

l'introduction des énergies renouvelables en Algérie peut se faire selon les approches suivantes:

- Complément à l'électrification rurale pour l'alimentation en électricité de sites isolés.
- Hybridation des centrales diesel existantes ou nouvelles par des systèmes photovoltaïques ou par des éoliennes, selon le site et la puissance.
- Approche dictée par des considérations de politique énergétique, de veille technologique ou de conformité à des engagements environnementaux. Cette approche concerne notamment les filières solaire thermique, éolienne et cogénération.

La politique énergétique de l'Algérie préconise l'accroissement de la contribution des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national ainsi que l'encouragement des systèmes énergétiques à haut rendement. Le facteur décisif dans l'économie des énergies renouvelables n'est pas le rapport entre l'électricité générée et l'intensité de la source, mais entre la production d'électricité et l'investissement réalisé. Avec un taux de couverture énergétique actuellement faible associé à son prix de revient très élevé, l'énergie renouvelable telle que le solaire est une solution partielle. Cependant, le nucléaire peut être une solution de substitution aux énergies fossiles, afin que l'Algérie puisse couvrir la demande en électricité et préserver son pétrole pour l'industrie chimique et le transport.

CONCLUSION

Aujourd'hui l'économie algérienne est totalement dépendante du pétrole et du gaz, mais il est encore temps d'emprunter une nouvelle trajectoire et ce, en développant les énergies alternatives, malgré un potentiel considérable, la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique est encore faible notamment dans la production d'électricité, il reste évident que l'énergie renouvelable seule ne peut pas être une solution alternative aux énergies fossiles. L'intégration massive du renouvelable dans le mix énergétique constitue, en ce sens, un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les combustibles fossiles sont considérés comme la première source d'énergie dans le monde, malgré leurs effets négatifs sur l'environnement à travers les émissions de gaz à effet de serre, qui entraînent une élévation de la température. Cette augmentation est responsable de plusieurs problèmes environnementaux et sanitaires. De nombreuses institutions, dirigées par l'Organisation mondiale de l'énergie, ont rapidement mis en garde contre les combustibles fossiles et leurs dangers qui entraînent des conséquences désastreuses si des stratégies ne sont pas mises en œuvre pour faire face à ce problème.

Un groupe de solutions émerge pour se débarrasser des combustibles fossiles et passer à un bouquet énergétique qui dépend de ressources naturelles propres. Les plus importantes de ces solutions sont peut-être :

Tout d'abord, la technologie de décarbonisation, cette technologie reposant sur le captage et le stockage du carbone (CSC) est encore à l'étude, mais malgré cela, c'est une solution efficace pour préserver l'environnement. Le côté négatif de la technologie de décarbonation est ses prix élevés, et donc tous les pays du monde ne seront pas en mesure d'appliquer cette technologie.

Deuxièmement, l'élimination du carbone par l'utilisation d'énergies renouvelables au lieu de combustibles fossiles. Les énergies renouvelables sont une solution idéale de mon point de vue, car elle est multiple (soleil, vent, eau,,,) en plus d'une solution qui convient n'importe quel pays du monde. Actuellement, dans le monde, la décarbonisation se développe dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre et aussi afin d'atteindre zéro émission en 2050.

Il est vrai que notre pays, l'Algérie, repose actuellement sur les énergies fossiles comme source d'énergie majeure, notamment pour ses réserves de pétrole et de gaz, mais il y a une volonté de passer à un mix énergétique qui s'appuie sur des énergies renouvelables respectueuses de l'environnement, à travers des stratégies représenté dans plusieurs projets solaires, éoliens et hydrauliques.

A mon avis, l'avenir des énergies renouvelables est prometteur en Algérie, du fait de la diversité du relief de notre pays (hautes terres, montagnes, mers, déserts). Tout cela ne signifie pas que notre pays se passera des énergies fossiles. Les énergies renouvelables et la technologie de décarbonisation sont deux solutions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographies

[1] : Muradov, N.Z, 2014. Liberating Energy from Carbon: Introduction to Decarbonization, Springer, New York. USA: Springer; Softcover reprint of the original, 1st ed, 460 p, ISBN 978-1-4939-0544-7.

[2] : Ciesla William M et FAO, 1997. Le Changement Climatique, les Forêts et l'Aménagement Forestier: Aspects Généraux. FAO forestry paper. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 139 p, ISBN 9252036644.

[3] : Météo France. L'effet de serre [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/leffet-de-serre-et-autres-mecanismes> > (consulté le 02.06.2021).

[4] : TPE, Effet de serre [en ligne]. Disponible sur: <<https://sites.google.com/site/alr108cch/home>> (consulté le 02.06.2021) .

[5] : CRDP de La Réunion, 2019. L'effet de Serre [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.cndp.fr/crdp-reunion/>> (consulté le 05.06.2021).

[6] : Nations unies, 2020. Action Climat [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.un.org/en>> (consulté le 29.06.2021).

[7] : Actu Environnement, 2019. Dioxyde de carbone [en ligne]. Disponible sur: <<https://www.actu-environnement.com>> (consulté le 08.06.2021).

[8] : GIEC, 2005. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge University Press, Cambridge UK, 431 p.

[9] : Géli,H. Soussana, Jean F. 2015. Le changement climatique; ce qui va changer dans mon quotidien. Quae. Paris, 170p. ISBN 978-2-7592-2368-8.

[10] : Muradov, N.Z. et Veziroglu, T. 2011. Carbon-Neutral Fuels and Energy Carriers, 1st ed.848 p. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11025>.

[11] : IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening

the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

[12] : Galvez, R. Péloffy, K, 2020. Réduire les émissions ou éliminer les énergies fossiles ? comprendre le piège carbone au Canada.

[13] : Lopez, A. Roizard, D. Favre, E. Dufour, A. 2013. Les procédés de capture du CO₂ Cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets.

[14] : Gkionaki Melina, 2020. Comment ça marche : la décarbonation par l'innovation [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.eib.org/fr/index.htm>> (consulté le 03.07.2021).

[15] : Jameel Fady, 2020. Ce ne sont pas des paroles en l'air : Pourquoi la décarbonation de l'industrie est si vitale pour assurer un avenir durable. Dubai, EAU.

[16] : Nadai, A. Rebecka, N, 2012. Risque et démonstration, la politique de capture et de stockage du dioxyde de carbone (CCS) dans l'Union européenne, Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [en ligne]. Disponible sur: <<http://journals.openedition.org/vertigo/12172>> (consulté le 03.07.2021).

[17] : Marchetti, C, 1976. On Geoengineering and the problem, Research Memoranda, IIASA, 13p.

[18] : Guglielmo Pasa, 2013. Le rôle des gaz à effet de serre dans le changement climatique. France.

[19] : Nrcan, 2016. Oxycombustion à émissions presque nulles [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.nrcan.gc.ca>> (consulté le 07.07.2021).

[20] : Lecomte, F. Broutin, P. Lebas, E, 2010. Le captage du CO₂. sl : Editions TECHNIP - IFP Publications.

[21] : Hongkun, H. Wenwen, L. Mingjiang, Z. Dominik, K. Dingcai, W. Karin, Y. Tim, R. Glenn, S. Nathaniel, E et Krzysztof, M. 2013. Reversible CO₂ Capture with Porous Polymers using the Humidity Swing. Energy Environ Sci 6:488–493. USA.

[22] : Ademe, 2011. Feuille de route; le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂. 2 p.- 40 p.- Réf. 7318.

[23] : GCI, 2013, Global CCS Institute, Status of carbon capture and storage update. Carbon Capture J 32

- [24] : Lovins, Amory B, 1975. Stratégies énergétiques planétaires, édition christian bourgeois, Paris, p97.
- [25] : François Gervais, 2013. L'Innocence du carbone: L'effet de serre remis en question. Albin Michel, 320 p. ISBN: 978-2-226-28655-0.
- [26] : Léria, C. 2021. Energie solaire : définition et différents types d'exploitation [en ligne] . Disponible sur : <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (consulté le 01.09.2021).
- [27] : Labouret A, Cumunel P, Braun P, Franggi B, 2010. Cellules solaires, 5ème édition Dunod, Paris, p 25.
- [28] : Harmim A, 2010. Bulletin des Energies Renouvelables; La Cuisson Solaire, Semestriel N° 17. ISSN 1112-3850.
- [29] : Boudia M, 2013. Optimisation de l'évaluation du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'Atlas des vents en Algérie, thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, p38.
- [30] : Nicolas L, 2005. Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, P 29.
- [31] : Blaise M, 2009. L'énergie hydraulique [en ligne]. Disponible sur : <https://www.geo.fr/> (consulté le 02.09.2021).
- [32] : Ouali S, 2010. Bulletin des Energies Renouvelables; L'Islande, Pays de la Géothermie, Semestriel N° 17. ISSN 1112-3850.
- [33] : Quentin M, 2014. Géothermie en Islande, une centrale exploite la chaleur du magma [en ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/> (consulté le 03.09.2021).
- [34] : Bouhired F, 2010. Bulletin des Energies Renouvelables; Programme Présidentiel 2010-2014 : L'épanouissement de la Recherche Scientifique en toile de fond et le Développement Durable comme objectif, Semestriel N° 17. ISSN 1112-3850.
- [35] : Berrched I, 2011. Etude prospective de la demande énergétique finale pour l'Algérie à l'horizon 2030, mémoire de Magister en management des projets énergétiques, Université de M'Hamed BOUGUARA Boumerdes, année universitaire 2010-2011, p 17.
- [36] : HAU E, 2005. Wind turbines, fundamentals, technologies, application. Economics, 2ème édition, Printemps.

- [37] : Boucib S, 2015. Objectifs du nouveau programme des énergies renouvelables en Algérie [en ligne]. Disponible sur : < portail.cder.dz> (consulté le 16.08.2021).
- [38] : Hammouche R, 1990. Atlas Vent de l'Algérie, Publication Interne de l'ONM, Office National de Météorologie, Alger.
- [39] : Bendaikha W., 2010. Bulletin des Energies Renouvelables; La climatisation géothermique: une solution adaptée à l'Algérie, Semestriel N° 17. ISSN 1112-3850.
- [40] : Fekraoui A et al., 2000. Atlas des ressources géothermiques du nord de l'Algérie. Internal report, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Algiers, Algeria, 14 pp.
- [41] : Rabehi M, 2009. Contribution des énergies renouvelables dans le développement durable, mémoire pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'affaire, Paris Graduate School of Management, Juillet, p 55.
- [42] : Bouzeriba M, 2006, La maîtrise de l'énergie en Algérie, Energie-Francophonie, Numéros 71-deuxième trimestre.
- [43] : Ghezlouna A, Ouchera N, Chergui S., 2012. Energy policy in the context of sustainable development: Case of Algeria and Tunisia, CDER, B.P 62, Route de l'Observatoire , Bouzaréah, Alger, Algeria.
- [44] : Kharchi R, 2013. L'efficacité énergétique dans le bâtiment; bulletin des énergies renouvelables, N° 28, p8
- [45] : Stéphane M, 2013. La cogénération: efficacité énergétique et utilisation rationnelle des ressources en gaz naturel de l'Algérie, bulletin des énergies renouvelables, N° 26, édition, p21
- [46] : Louafi N., 2011. Promotion du chauffe-eau solaire en Algérie, Programme ALSOL, Bulletin des Energies Renouvelables, N°20 – 2011.
- [47] : Sharon W, 2021. Climat l'Agence internationale de l'énergie appelle à renoncer immédiatement à tout nouveau projet fossile.
- [48] : IRENA, 2020. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050; Perspectives mondiales pour les énergies renouvelables : transformation énergétique pour 2050, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi. ISBN 978-92-9260-238-3