



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued
Faculté de Technologie



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :

Master Académique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

Présenté par les étudiantes :

Maroufi Ikram

Ahmidatou Hasna

Slimani Rayhana

Thème intitulé :

**Simulation et Optimisation de la Capture du Carbone
Post-Combustion**

Soutenu le : 03/06/2024

Devant le jury composé des professeurs :

Dr. El sghir Bachir

Président

Université d'El Oued

Dr. Mohammed Tayeb

Examineur

Université d'El Oued

Oucif Khaled

Pr. Omar Ben Mya

Encadreur

Université d'El Oued

2023/2024

Remerciement

Premièrement, nous tenons à remercier Allah pour l'aide, le courage et la patience qu'Il nous accorde pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre sincère gratitude à Pr. Omar Ben Mya pour son dévouement et sa compétence, ainsi que pour ses précieuses remarques qui ont été utiles dans la réalisation de ce projet de fin d'études.

Un grand merci également à notre collègue Mohammed Lamine Azzabi pour son assistance dans ce travail, et nous lui souhaitons plein succès dans sa carrière professionnelle.

Nous adressons également nos remerciements à tous nos enseignants du département de génie des procédés et de la pétrochimie.

Enfin, notre plus profonde reconnaissance va aux membres du jury qui auront l'honneur d'évaluer notre travail.

الإهداء

بسم خالقي ومسير اموري لك كل الحمد والامتنان

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان مخفوفاً بالتسهيلات لكنني

فعلتها فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا النهايات اهدي هذا العمل

الى من كلله الله بالهبة والوقار الى الذي زين اسمي باجمل الالقاب وعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل

الى من كلل العرق جبينه وعلمني ان النجاح لا يأتي الى بالصبر والاصرار الى الذي استمدت منه قوتي واعتزازي

بذاتي والدي العزيز (الطاهر)

الى ملاكي في الحياة الى معنى الحب والحنان... الى بسملة الحياة و سر الوجود

الى من كان وعادها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي والشمعة التي كانت في الليالي المظلمات

الى الانسانة العظيمة التي لطالما تمننت ان تفر عينها لروثتي في مكان كهذا امي (وناسة بولول)

الى ظلمي الثابت وامان ايامي... اراضي الصلبة و جداري المتين

الى خير ايامي وصفوتها الى قرّة عيني اخي (محمد الصابر)

الى شريك حياتي وملجائي الوحيد الى سندي في الحياة والمعين لي في كل عمل

الى مصدر قوتي الذي مديده لي في كل اوقات الضعف خطيبي (اسامة بن زهرة)

الى كل عائلتي التي لم تمل من الدعاء لي وعميني بكل لطف وكلام رفع من معنوياتي وزاد من جهدي

الى حبيبات قلبي الى اخواني اللتي لم تلهن امي (حسناء حميدانو. ملاك معنان. مليكة بولول و نيا منصر)

معرفي اكرم

الامضاء

لى من كل العرق جبينه ومن علمني أن نجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار الى النور الذي أثار دمي وسراج الذي لا ينطفئ نوره
بقلبي أبدا من بدل الغالي والنفيس واستمدت منه قوتي واعتزازي بذاتي والدي العزيز (مراه)

لى من جعل الجنة تحت أقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها الى إنسانة العظيمة التي لظالمات تمننت أن تقرأ عينها لرؤيتي في
يوم كهذا امي العزيزة (هنية با عيسى)

لى ضلعي الثابت وإماني أيامي الى من شدت عضدي بنجم فكانوا لي ينبوع ارتوي منحا لي خيرة أيامي وصفوتها لي قرة عيني الى
إخواني وأخواتي الغائبين (فاطمة، محسن، جهاد، نصر الدين، رحمة، أمال)

لكل من كان عون وسندا في هذا الطريق للأصدقاء والأوفياء ورفقاء السنين لأصحاب الشدائد والأزمات الى من أفاضني بمشاعره
ونصائحه المخلصة (عبير غديوي، إكرام معرفي، كنزة حميدوتو، دنيا منصر، شيماء با عيسى، دواء عثمان، وليد بخ)

إليك عائلتي أهديكم هذا الإجازة وثمرتها نجاحي التي لظالمات تمننتها، ها أنا اليوم أكملت وأتممت أول ثمراته بفضل سجدته وتعالى
فأحمد الله على ما وهبني وأن يجعلني مباركا وأن يعينني أينما كنت ، فمن قال أنا لها نالها وإن أبت رغما عنها أيت بها
وأهداء خاص لجلي وجليتي (أحمدوتو فاطمة و با عيسى السعيد)

فأحمد الله شكرا وحبا وامتنانا على البدر والشمس.

أحمداتكم حسناء

Dédicace

À mes chers parents

À tous ceux qui m'ont enseigné une lettre tout au long de mon parcours scolaire

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail

Je dédie ce mémoire à votre bienveillance et à votre appui qui ont été essentiels à mon succès.

Slimani Rayhana

Abréviations

AC :	Anhydrase carbonique
AP :	Aminopropyle
AVT :	Adsorption par variation de température
AVP :	Adsorption par variation de pression
CSC :	Capture et de Stockage du carbone
CaO :	Oxyde de calcium
CaCO₃ :	Carbonate calcium
CA :	Charbon actif
CAS :	Chemical Abstracts Service
CNT_s :	Carbone nanotubes
DEPG :	Dimethyl ether of polyethylene glycol
DEA :	Diethylamine
DABCO :	1,4-diazabicyclo2.2.2octane
Fe₂O₃ :	Oxyde de fer III
FGD :	Flue Gas Desulphurization
FLUE GAS :	gaz d'échappement riche en CO ₂
GBM :	Graphène-based Materials
GO :	Graphene Oxyde
H₂CO₃ :	Acide Carbonique
H₂S :	Sulfure d'hydrogène
HRGO :	Hydrothermal RGO
K₂CO₃ :	Carbonate potassium
LEAN FLUE GAS :	gaz traité pauvre en CO ₂
MOFs :	Metal organic frameworks
MEA :	Monoethanoleamine
MDEA :	Methyle-diethanolamine
Morphysorb :	mélange de N-formylmorpholine et N-acétyl-morpholine
NO_x :	Oxyde d'azote

Abréviations

NO : Oxyde nitrique (monoxyde d'azote)

NiO : Oxyde de nickel

NPG : Nanoplaquettes de Graphene

NOAA : National Oceanic And Atmospheric Administration

PIB : Produit Intérieur Brut

PEI : Polyéthylèneimine

Pz : Pipérazine

RICHE MDEA : Amine riche

rGO : Le graphene réduit oxydé

SO₂ : Sulfur dioxyde

T-100 : colonne d'absorption (absorbeur)

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE.....	II
ABREVIATIONS.....	III
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : Généralité sur l'émission de CO₂

I.1. INTRODUCTOIN.....	2
I.2. Définition du dioxyde de carbone.....	2
I.2.1. La formule du gaz dioxyde de carbone.....	2
I.3. Les différentes sources d'émissions du CO ₂	3
I.3.1. Les activités humaines.....	3
I.3.1.1. La combustion des combustibles fossiles	3
I.3.1.2. La déforestation	4
I.3.1.3. L'agriculture.....	5
I.3.1.4. Les opérations industrielles.....	5
I.3.1.5. La gestion des déchets	6
I.3.2. Les ressources naturelles.....	6
I.3.2.1. Respiration	7
I.3.2. 2. Décomposition	7
I.3.2.3. Respiration du sol	8
I.3.2.4. Émissions de gaz dans l'océan	8
I.3.2.5. Activité volcanique	8
I.3.2.6. Les incendies de forêt	9
I.4. Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone CO ₂	9
I.5. Propriétés et caractéristiques du gaz dioxyde de carbone.....	10
I.6. Les dangers et les inconvénients du dioxyde de carbone	11
I.7. Impacts du CO ₂	11

SOMMAIRE

I.7.1. sur la santé	11
I.7.2. sur l'environnement	12
I.8. Le taux d'émissions de dioxyde de carbone dans le monde.....	12
I.9. É missions de CO ₂ en L'ALGÉRIE.....	13
Les Références bibliographiques.....	16

Chapitre II : Méthodes de captage du carbone

II.1. Introduction.....	18
II.2. La capture post-combustion	18
II.2.1. Absorption.....	19
II.2.1.1. Absorption physique.....	20
II.2.1.2. Absorption chimique	22
II.2.1.2.1. Technologies basées sur les amines	23
II.2.1.2.2. Autres solvants d'absorption chimique	26
II.2.2 Adsorption.....	28
II.2.2.1. Mécanisme du processus d'adsorption.....	28
II.2.2.2. Adsorption chimique.....	28
II.2.2.3. Adsorption physique	29
II.2.2.4. Les nanomatériaux pour la capture du CO ₂	31
II.2.2.4.1. Les nanomatériaux à base de carbone.....	31
II.2.2.4.2 Les zéolithes	33
II.2.2.4.3. Metal organic frameworks (MOFS).....	34
II.2.3. Combustion en boucle chimique.....	35
II.2.4. Boucle de calcium.....	36
II.2.5. Absorption membranaire	37
II.2.6. Captage du carbone cryogénique	37
II.3. Le captage en oxy-combustion.....	38
II.4. Le captage pré combustion.....	38
Les Références bibliographiques.....	39

Chapitre III : Partie simulation

III.1. Introduction.....	41
--------------------------	----

SOMMAIRE

III.2. Logiciel Aspen HYSYS	41
III.2.1. Présentation du logiciel de simulation HYSYS	41
III.2.2. L'utilisation de logiciel HYSYS	41
III.2.3. Présentation des Procédures de simulation par HYSYS	41
III.3. Partie données et simulation	42
III.3.1. Les étapes de simulation	42
III.3.2. Le choix du modèle thermodynamique	43
III.3.3. Le choix de la composition du gaz d'échappement	43
III.3.4. Les conditions d'opérateurs	44
III.3.5. La Configuration du processus de capture du carbone	45
Les Références bibliographiques	47

Chapitre IV : DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. Introduction	48
IV.2. Les variations de température VS variations de pression	48
IV.2.1. Les variations de température	48
IV.2.2. Les variations de pression	49
IV.3. Isotherme d'adsorption	50
IV.3.1. Les types d'isothermes d'adsorption	50
IV.3.1.1. L'isotherme de Langmuir	50
IV.3.1.2. L'isotherme de Freundlich	51
Les Références bibliographiques	55
CONCLUSION GENERALE	56

Résumé

Liste des tableaux

Tableaux	PAGE
Tableau I.1: Les propriétés physique et thermochimique de CO ₂	10
Tableau I.2: Algérie-émissions de CO ₂	14
Tableau III.1: Constituants du Gaz d'échappement	43
Tableau III.2: Les conditions opératoires.	44

Liste des figures

FIGURES	PAGE
Figure I.1: La molécule de dioxyde de carbone	2
Figure I.2: les sources anthropiques du CO ₂	3
Figure I.3: combustibles fossils	4
Figure I.4: Abattage d'arbres	4
Figure I.5: l'industrie du ciment	5
Figure I.6: La combustion des déchets	6
Figure I.7: les sources naturelles du CO ₂	7
Figure I.8: La décomposition des restes alimentaires	7
Figure I.9: La décomposition des restes d'animaux	8
Figure I.10: Les laves volcaniques	9
Figure I.11: dès La combustion forêts	9
Figure I.12: Les émissions de dioxyde de carbone dans le monde en 2023	12
Figure I.13: Courbe D'émissions De CO ₂	13
Figure II.1: Diverses technologies de captage du carbone post-combustion	19
Figure II.2: capture de carbone par absorption physique avec SELEXOLE	20
Figure II.3: concept d'un processus de solvant biphasique	26
Figure II.4: unité d'adsorption de type (AVT) pour le captage du carbone	30
Figure II.5: Différents types de graphène et de nanotubes de carbone	32
Figure II.6: Les tailles relatives des n-cycle se trouvent fréquemment dans les zéolithes	33
Figure II.7: Diagramme schématique de base de la structure MOF, le mécanisme impliqué dans la capture du CO ₂	34
Figure II.8: diagramme de flux de processus illustrant la capture du dioxyde de carbone CO ₂ par processus en boucle chimique	36
Figure II.9: Technique de captage par oxy-combustion	38
Figure II.10: Technique de captage par pré-combustion	38
Figure III.1: Schéma des étapes de simulation.	42
Figure III.2: Le choix de model thermodynamique	43
Figure III.3: Constituants du Gaz d'échappement	44
Figure III.4: Les paramètres de l'absorbeur	45

Liste des figures

Figure III.5: La Configuration du processus de capture du carbone	46
Figure IV.1: La teneur en dioxyde de carbone dans l'amine MDEA en fonction des variations de température	48
Figure IV.2: La teneur en dioxyde de carbone dans l'amine MDEA en fonction des variations de pression	49
Figure IV.3: Isotherme de Langmuir	51
Figure IV.4: Isotherme de Freundlich	52
Figure IV.5: LANGMUIR ISOTHERME à 80°C	53
Figure IV.6: LANGMUIR ISOTHERME à 100°C	53
Figure IV.7: LANGMUIRE ISITHERME à 150°C	54

INTRODUCTION GENERALE

La production d'une grande partie de l'énergie dans le monde se fait par la combustion des ressources fossiles, ce qui entraîne l'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ces émissions contribuent à augmenter sa concentration et à causer le réchauffement climatique. Pour limiter cet effet, il est nécessaire de réduire les émissions de CO₂ provenant de la production d'énergie. Le captage et le stockage du carbone post-combustion émergent comme l'une des méthodes prometteuses pour réduire ces émissions. Les principales sources d'émissions de CO₂ sont les centrales thermiques, les industries de l'acier, du ciment et les raffineries de pétrole.

Le processus de capture du CO₂ consiste à le séparer de la vapeur produite lors de la combustion des ressources fossiles, ce qui permet de récupérer un flux de CO₂ concentré (contenant plus de 90 % de dioxyde de carbone, de préférence plus de 96%), qui peut être isolé et utilisé dans l'industrie chimique, l'industrie alimentaire, etc.

L'objectif principal de cette étude est la simulation d'un procédé de capture de la carbone post-combustion à l'aide de logiciel de simulation ASPEN HYSYS. Le travail présenté dans ce mémoire sera organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons des rappelles théorique sur les sources d'émission de dioxyde de carbone et leur impact sur l'environnement. Le deuxième chapitre traitera des différentes méthodes et techniques utilisées dans le processus de capture du dioxyde de carbone.

Dans le troisième chapitre, on essaye de présenter les étapes de simulation en choisissant les valeurs des paramètres entrant et sortant pour ces procédés ainsi que les conditions opératoires.

La présentation des différents résultats de simulation fut l'objectif de dernier chapitre. Fin de ce mémoire on met une conclusion générale qui récapitule les résultats obtenus de cette étude ainsi les recommandations.

Chapitre I

Généralité sur l'émission de CO₂

I.1. INTRODUCTOIN

Le dioxyde de carbone est considéré comme l'un des composés essentiels à la vie biologique, et à des niveaux naturels, il n'a pas d'effets néfastes. Cependant, lorsque sa concentration dans l'air dépasse les limites naturelles, il peut entraîner des dommages sur la santé humaine ou sur l'environnement. De plus, il est considéré comme l'un des principaux gaz responsables de l'effet de serre et du changement climatique, car il contribue à piéger la chaleur dans l'atmosphère terrestre [1].

I.2. Définition du dioxyde de carbone

Le composé chimique en question est une composante de l'atmosphère et des gaz à effet de serre, représentant sous forme de dioxyde de carbone ou de monoxyde de carbone, ou de gaz de charbon. Ce gaz reste chimiquement inerte et non inflammable, et est environ une fois et demie plus lourd que l'air. Il peut être facilement converti en liquide et stocké dans des cylindres sous pression spécifiée. Ce gaz est également connu sous le nom de "gaz de houille", et est parfois appelé "gaz sec" ou « gaz liquéfié » [2].

Parmi les gaz les plus connus pour leur contribution à l'effet de serre, on trouve le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, en raison de leurs émissions et de leurs résidus résultant de leur utilisation en grande quantité [3].

I.2.1. La formule du gaz dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un gaz présent dans l'air à une proportion estimée entre **0,03 %** et **0,040%** du volume de l'atmosphère. Ce gaz est composé d'un atome de carbone lié à deux atomes d'oxygène, il est classé parmi les composés organiques et est symbolisé par CO₂ sous forme gazeuse dans des conditions normales. Lors de son utilisation ou de sa libération à partir de cylindres comprimés, il ne s'enflamme pas et ne contribue pas à l'inflammation. Il est incolore et inodore, se dissout facilement dans l'eau et possède des propriétés acides [4].

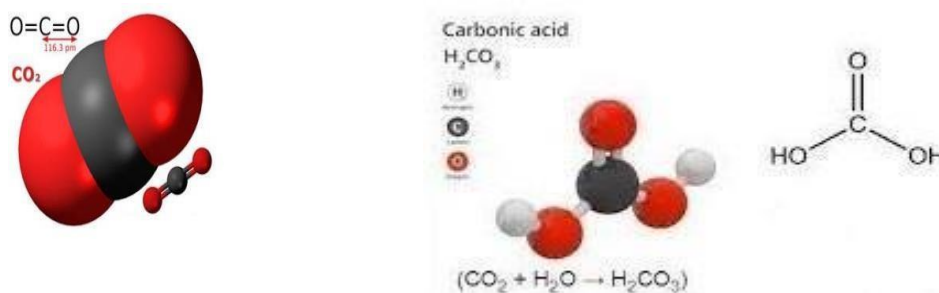


Figure I.1: La molécule de dioxyde de carbone

- Le dioxyde de carbone est utilisé dans une variété d'applications industrielles :
 - Il est utilisé comme gaz dans les opérations de soudage et les dispositifs d'extinction d'incendie.

- Il est utilisé comme propulseur dans les armes à air comprimé et pour la récupération d'huile.
- Il est considéré comme une matière première chimique et est utilisé sous forme liquide comme solvant dans les processus d'extraction de la caféine et de séchage à haute température.
- Il est utilisé comme additif dans la préparation des boissons et des boissons gazeuses.

Sa forme solide est appelée "glace sèche" et est utilisée pour le refroidissement ainsi que comme agent abrasif dans les opérations de sablage sous pression [5].

I.3. Les différentes sources d'émissions du CO₂ :

Les émissions de dioxyde de carbone représentent le rejet de ce composé dans l'atmosphère, quel que soit leur origine, qu'elles soient naturelles ou anthropiques (c'est-à-dire résultant des activités humaines). Ces sources humaines connaissent une croissance rapide depuis plusieurs décennies. En 2012, la concentration moyenne de dioxyde de carbone dans l'air a atteint 393 parties par million, et en avril 2014, elle est montée à 400 parties par million dans l'ensemble de l'hémisphère nord [6].

I.3.1. Les activités humaines :

Depuis la révolution industrielle, les sources d'émissions humaines de dioxyde de carbone ont augmenté. Près de 87% des émissions de dioxyde de carbone sont attribuables à l'activité humaine et proviennent de la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Le reste provient de la déforestation et d'autres changements dans l'utilisation des terres (9%), ainsi que de certains processus industriels tels que la fabrication de ciment (4%). Le charbon représente 43% des émissions de dioxyde de carbone provenant de sa combustion comme carburant, tandis que 36% sont produites par le pétrole et 20% proviennent du gaz naturel [7].

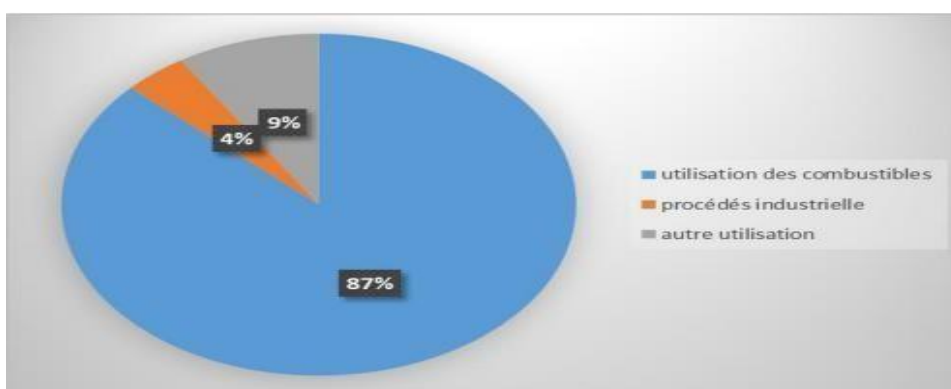


Figure I.2: les sources anthropiques du CO₂

I.3.1.1. La combustion des combustibles fossiles :

Lorsque les combustibles fossiles sont brûlés à diverses fins telles que la production d'électricité, le fonctionnement des véhicules et la fourniture de chaleur pour les processus industriels et les usages résidentiels, du dioxyde de carbone est émis. Les combustibles fossiles sont constitués de carbone stocké accumulé par les plantes et les organismes anciens pendant des millions d'années.

Au cours du processus de combustion, le carbone stocké à l'intérieur des combustibles fossiles réagit avec l'oxygène de l'air, ce qui produit du dioxyde de carbone en tant que produit secondaire de cette réaction chimique [8].



Figure I.3 : la combustion des combustibles fossiles

I.3.1.2. La déforestation :

La déforestation comprend des opérations de coupe et d'élimination des arbres et d'autres plantes naturelles à des fins telles que l'agriculture ou le développement urbain. Lorsque les arbres sont coupés ou brûlés, le carbone stocké dans ces plantes est libéré dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone.

Les forêts sont considérées comme des sources principales de stockage de carbone, absorbant et stockant le dioxyde de carbone de l'air par le processus de photosynthèse. Lorsque les arbres sont supprimés, leur capacité à absorber le carbone diminue, ce qui entraîne une augmentation des émissions de dioxyde de carbone dans l'air.

L'impact de la déforestation sur les émissions de dioxyde de carbone est significatif, et les estimations indiquent qu'elle contribue à environ **10 % à 15 %** des émissions mondiales totales de dioxyde de carbone chaque année [9].



Figure I.4: Abattage d'arbres

I.3.1.3. l'agriculture:

Les activités agricoles contribuent aux émissions de carbone de diverses manières, notamment en libérant du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre lors de différentes pratiques agricoles.

La gestion des sols peut entraîner l'émission de dioxyde de carbone, notamment par des pratiques telles que le labour ou la combustion. Ces pratiques exposent les matières organiques à l'oxygène, accélérant ainsi leur décomposition et augmentant les émissions de dioxyde de carbone.

Dans certaines pratiques agricoles, la biomasse est brûlée pour désherber les champs ou gérer les déchets, ce qui libère du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Il est également intéressant de noter que l'agriculture joue un rôle crucial dans la séquestration du carbone. Certaines pratiques agricoles telles que l'agroforesterie, la culture de couverture et le labourage respectueux de l'environnement peuvent renforcer la séquestration du carbone dans la sole la couverture végétale [10].

I.3.1.4. Les opérations industrielles:

De nombreuses industries dépendent largement des combustibles fossiles pour répondre à leurs besoins énergétiques. Ces combustibles sont brûlés dans les usines et autres installations industrielles pour produire de l'électricité, du chauffage et de la vapeur. Le processus de combustion libère du dioxyde de carbone en tant que produit secondaire.

Le ciment est un élément crucial dans la construction, et sa production implique un processus chimique appelé la calcination. Pendant la calcination, le calcaire (carbonate de calcium) est chauffé pour produire de la chaux (oxyde de calcium), ce qui entraîne le dégagement de dioxyde de carbone en conséquence.

Certaines opérations industrielles, telles que la production d'acier, la fabrication chimique et le raffinage, peuvent libérer du dioxyde de carbone dans le cadre de leurs processus. Ces émissions peuvent provenir de différentes réactions chimiques et d'opérations énergivores [11].



Figure I.5: l'industrie du ciment

I.3.1.5. La gestion des déchets :

Même les déchets peuvent contribuer à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et ce, de plusieurs façons. Les différentes méthodes de gestion des déchets, telles que l'incinération et la décomposition organique, peuvent entraîner l'émission de dioxyde de carbone dans l'air.

L'incinération : est utilisée comme moyen de se débarrasser des déchets, mais elle entraîne l'émission de dioxyde de carbone et contribue à la pollution de l'air.

Décomposition des déchets organiques : Si les déchets organiques ne sont pas correctement gérés, ils peuvent se décomposer dans des environnements naturels, ce qui entraîne l'émission de dioxyde de carbone [2].



Figure I.6 : La combustion des déchets

I.3.2. Les ressources naturelles :

Depuis des milliers d'années, la quantité de dioxyde de carbone produite par les sources naturelles existe. Avant l'influence humaine, le taux de dioxyde de carbone était équilibré en raison de l'équilibre calco-carbonique d'une part et de l'autoépuration de l'environnement [12].

En plus de la production résultant des activités humaines, le dioxyde de carbone est également libéré dans l'atmosphère par des processus naturels. Les océans, les sols, les plantes, les animaux et les volcans sont toutes des sources naturelles d'émissions de dioxyde de carbone. Parmi toutes les émissions naturelles de dioxyde de carbone, 42,84% proviennent de l'échange entre l'atmosphère et l'océan. D'autres sources naturelles importantes incluent la respiration (28,56%), ainsi que la respiration du sol et la décomposition (28,56%). Une petite proportion est également dérivée des éruptions volcaniques (0,03%) [7].

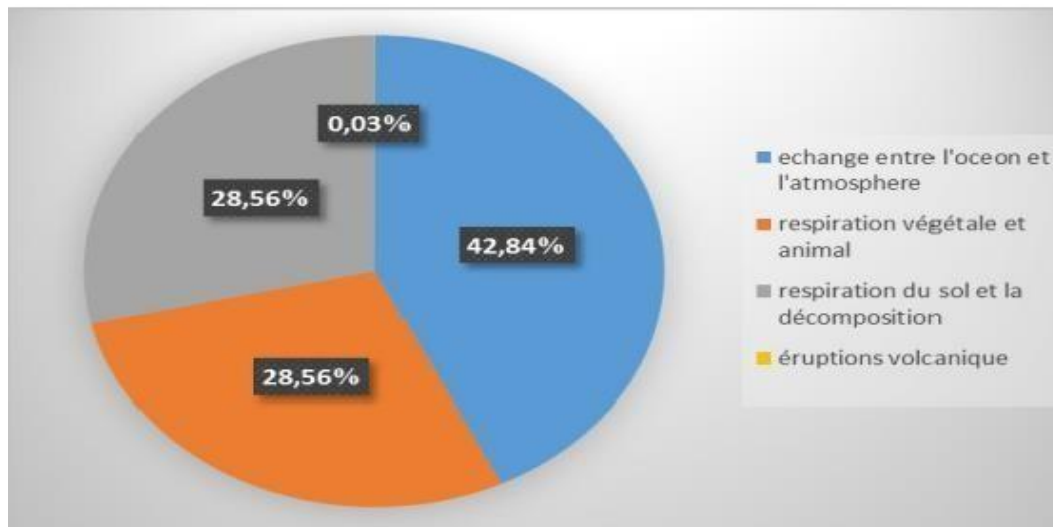


Figure I.7 : les sources naturelles du CO₂

I.3.2.1. Respiration :

Les animaux et les plantes libèrent du dioxyde de carbone en tant que produit secondaire de la respiration. Tout comme nous expirons du dioxyde de carbone lorsque nous respirons, les animaux et les plantes respirent également, ce qui entraîne l'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère [13].

I.3.2. 2. Décomposition :

Pendant le processus de décomposition, différents micro-organismes tels que les bactéries et les champignons décomposent les plantes, les animaux morts et d'autres matières organiques. Lorsque ces matières organiques sont décomposées, le carbone qu'elles contiennent est libéré sous forme de dioxyde de carbone. Cela se produit car les micro-organismes respirent, tout comme les humains et les animaux, et le dioxyde de carbone est produit en tant que produit secondaire de leurs processus vitaux [14].

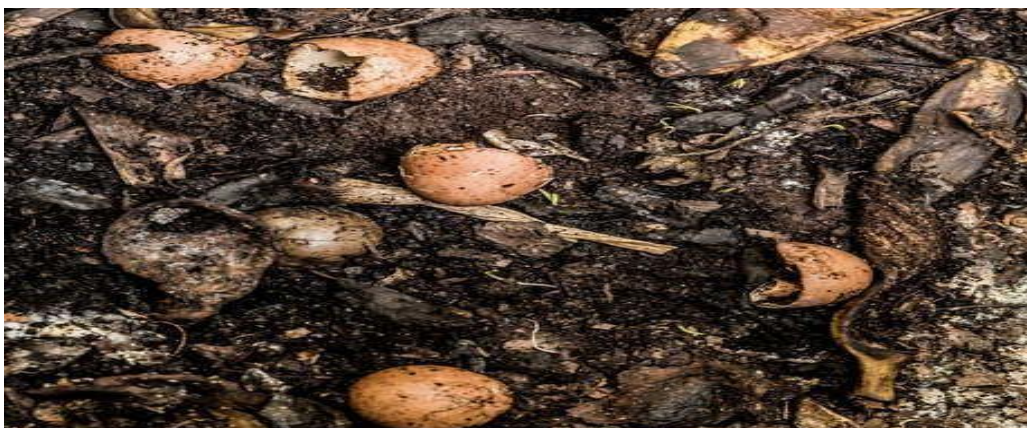


Figure I.8: La décomposition des restes alimentaires



Figure I.9: La décomposition des restes d'animaux

I.3.2.3. Respiration du sol :

Le processus de respiration du sol est le résultat de l'activité biologique qui s'y déroule. Les micro- organismes tels que les bactéries et les champignons décomposent la matière organique telle que les plantes et les animaux morts à travers un processus de décomposition. Cette activité de décomposition libère du dioxyde de carbone comme produit secondaire de la respiration. De plus, les racines des plantes respirent également dans le sol et libèrent également du dioxyde de carbone, qui peut ensuite être libéré dans l'atmosphère [15].

I.3.2.4. Émissions de gaz dans l'océan :

Les océans agissent comme de vastes réservoirs de carbone, absorbant de grandes quantités de dioxyde de carbone de l'atmosphère. Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau de mer pour former de l'acide carbonique, qui se transforme ensuite en bicarbonates et en ions carbonates. Ce processus, connu sous le nom d'absorption du carbone océanique ou de piégeage du carbone dans l'océan, aide à réguler la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Cependant, les océans ne sont pas simplement des réservoirs de carbone ; dans certains cas, ils libèrent également du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cela se produit lorsque la température de l'eau augmente ou lorsque les modèles de circulation océanique changent, réduisant ainsi la capacité de l'eau à contenir les gaz dissous, ce qui entraîne le rejet de dioxyde de carbone dans l'air. De plus, les zones avec des courants ascendantes peuvent remonter les eaux profondes riches en carbone vers la surface, contribuant ainsi à l'émission de gaz dans l'air [16].

I.3.2.5. Activité volcanique :

Lorsque les volcans entrent en éruption, les roches fondues, appelées magma, sont poussées vers la surface. Ce magma contient des gaz dissous, notamment de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone, du dioxyde de soufre et d'autres encore. Lorsque le magma atteint la surface, la pression diminue, ce qui entraîne le relâchement des gaz sous forme d'émissions volcaniques.

La quantité de dioxyde de carbone émise par l'activité volcanique est relativement faible par rapport aux émissions causées par les activités humaines. On estime que les

émissions annuelles totales de dioxyde de carbone des éruptions volcaniques sont d'environ 200 à 300 millions de tonnes métriques, ce qui est bien inférieur aux milliards de tonnes métriques émises par les activités humaines chaque année [17].



Figure I.10: Les laves volcaniques

I.3.2.6. Les incendies de forêt :

Le processus de combustion pendant les incendies de forêt est similaire à celui de la combustion de combustibles fossiles ou d'autres matières organiques. Une fois que les arbres, les plantes et les autres matières végétales brûlent, le carbone qu'ils contiennent réagit avec l'oxygène de l'air pour se transformer en dioxyde de carbone. Ce processus libère à nouveau le carbone stocké dans l'atmosphère [15].



Figure I.11 : La combustion des forêts

I.4. Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone CO₂ [7] :

- Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃).

Lorsque la concentration de dioxyde de carbone dans l'air dépasse un certain niveau, il peut être dangereux, voire mortel.

- Le dioxyde de carbone est le deuxième gaz à effet de serre le plus important dans l'atmosphère après la vapeur d'eau. Le **tableau I.1** réunit quelques propriétés de ce gaz :

Tableau.I.1 : Les propriétés physique et thermochimique de CO₂

	Propéitiés	Valeurs
Générales	- Formule brute - Nom IUPAC - Numéro CAS - Apparence	- CO₂ - Dioxyde de carbone 124-38-9 - Gaz incolore
Physiques	- Masse moléculaire - Température de fusion - Température de vaporisation - Solubilité - Densité - Viscosité dynamique - Température critique - Pression critique - Point triple - Chaleur latente de vaporisation (0°C) - Chaleur latente de vaporisation (-16.7°C) - Chaleur latente de vaporisation (-28.9°C) - Chaleur latente de fusion (à -56,6°C)	44,01 g/mol -78,5 °C (195 °K) -57 °C (216 °K) 1,45 kg/m³ 1,87 m³ (298°K, 0,013 bar) plus dense que l'air 0.07 Cp à -78 °C 31,1°C 7,4 MPa -56,6°C à 519 kPa 234,5 kJ/kg 276,8 kJ/kg 301.7 kJ/kg 199 kJ/kg
Thermochimique	$\Delta_f H^\circ$ gaz	-393,5 kJ/mol

I.5. Propriétés et caractéristiques du gaz dioxyde de carbone [18] :

- Le dioxyde de carbone réduit le niveau d'oxygène dans l'atmosphère des matériaux en combustion.
- Il est approprié pour lutter contre les incendies d'équipements électroniques, de dispositifs délicats et de moteurs d'avions.
- Il se distingue par une capacité de refroidissement efficace et ne laisse aucun résidu après l'extinction.
- En raison de son poids plus lourd que l'air, il peut pénétrer dans les zones basses et les cavités en cas de grandes quantités. Il ne nécessite pas de système de propulsion car c'est un gaz comprimé et ne se détériore pas pendant le stockage. De plus, il est un mauvais conducteur d'électricité. Il est considéré comme un moyen d'extinction efficace en termes de coût, facile à utiliser et peu toxique.

I.6. Les dangers et les inconvénients du dioxyde de carbone [19]

Le dioxyde de carbone peut être toxique et causer une asphyxie en cas d'inhalation de quantités très importantes. De plus, il peut avoir des effets physiques nocifs lorsque sa concentration dépasse 4% dans l'air d'un espace clos. À des concentrations entre 7% et 10%, il peut entraîner des pertes de conscience et des cas d'asphyxie.

Limité en efficacité et utilisation lors de la lutte contre les incendies en plein air. Se dissipe rapidement, ce qui rend possible la réinflammation de certains incendies.

Il ne se caractérise pas par une grande efficacité ni une portée étendue lorsqu'il est libéré des cylindres sous forme de nuage de neige carbonique mélangée avec du dioxyde de carbone, ce qui signifie qu'il se disperse rapidement.

Il peut avoir des effets nocifs similaires au gel sur la peau en cas d'exposition directe. De plus, les métaux et les pièces peuvent adhérer ensemble s'ils entrent en contact avec le gaz à des températures très froides, ce qui peut entraîner des lésions cutanées lors de leur manipulation.

Les vapeurs de dioxyde de carbone très froides peuvent causer le gel des tissus humains et fragiliser de nombreux matériaux tels que le plastique et le caoutchouc, les rendant sujets à la rupture.

Étant donné qu'il se présente sous forme de neige carbonique lorsqu'il est libéré des extincteurs, il est nécessaire que les buses des extincteurs de dioxyde de carbone soient fabriquées en polyéthylène afin de protéger les mains de l'utilisateur contre le froid intense.

I.7. Impact du CO₂ :

I.7.1. sur la santé :

En plein air, le CO₂ n'a aucun impact sur la santé humaine.

Cependant, des niveaux élevés de CO₂ à l'intérieur des bâtiments peuvent avoir des conséquences néfastes sur la santé, l'efficacité au travail et le sommeil. C'est donc un sujet d'une importance capitale pour les bureaux, les écoles et les environnements domestiques.

Il est recommandé que l'exposition moyenne d'une personne sur une période continue de 8 heures ne dépasse pas 5 000 ppm.

Il convient de noter qu'une exposition à seulement 1 000 ppm est suffisante pour ressentir des effets nocifs tels que des maux de tête, des vertiges et de la fatigue, et cela peut entraîner des conséquences plus graves sur la santé telles que des difficultés respiratoires, une augmentation du rythme cardiaque et même une asphyxie si les concentrations recommandées en CO₂ ne sont pas respectées.

I.7.2. sur l'environnement :

- Premièrement : l'effet de serre

Le dioxyde de carbone contribue à la pollution de l'air et joue un rôle dans le phénomène de l'effet de serre. Le carbone agit en capturant le rayonnement thermique à la surface de la terre, ce qui conduit à la formation d'une couche d'ozone à la surface de la terre. Cette couche atmosphérique empêche la terre de se refroidir la nuit. Avec l'augmentation de la température de l'eau des océans, la capacité des océans à absorber le dioxyde de carbone diminue avec le temps.

- Deuxièmement : Changement climatique

Le changement climatique est l'impact environnemental le plus évident du dioxyde de carbone. La température de surface de la terre a augmenté au cours des cent dernières années, selon les études menées par l'Administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA). Les scientifiques croient que le dioxyde de carbone en est la cause principale, et les effets sont extrêmement complexes. Les preuves montrent que les niveaux des océans ont augmenté, ce qui a entraîné la perte de littoral et de zones humides côtières.

- Troisièmement : Pluies acides

Le dioxyde de carbone contribue à l'impact environnemental connu sous le nom de pluies acides. Cela se produit lorsque les émissions des centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles se combinent avec l'humidité de l'air, entraînant des précipitations avec un taux élevé d'acidité. Des preuves documentées montrent les dommages matériels causés aux arbres et à d'autres plantes en raison de ce phénomène.

I.8. Le taux d'émissions de dioxyde de carbone dans le monde [20]

Les émissions de dioxyde de carbone dans le monde sont considérées comme ayant une tendance croissante au fil du temps.

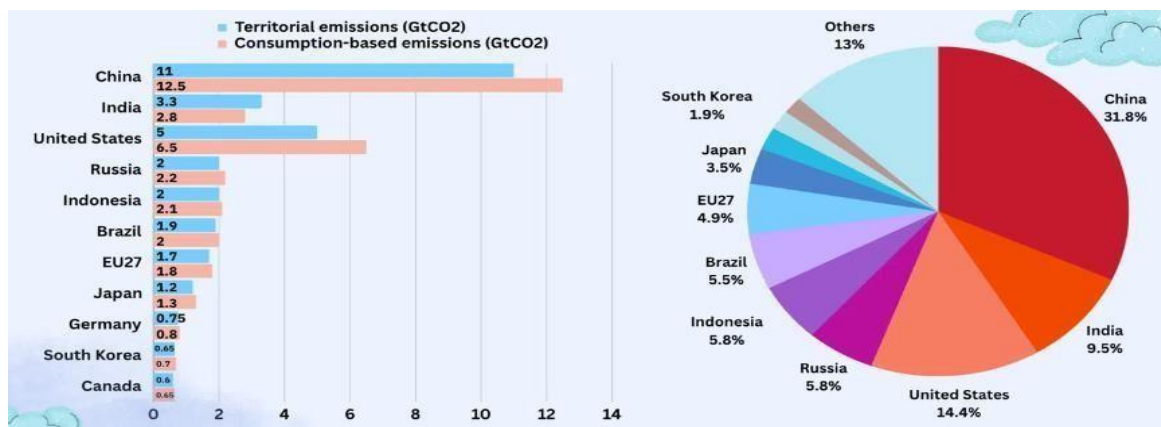


Figure I.12: Les émissions de dioxyde de carbone dans le monde en 2023

I.9. É missions de CO₂ en L'ALGÉRIE [21]

En Algérie, les émissions de dioxyde de carbone ont augmenté en 2021, augmentant de 4,051 mégatonnes, soit une augmentation de 2,4 % par rapport à l'année précédente, pour atteindre environ 173,001 mégatonnes. Ainsi, l'Algérie se classe 152e dans la liste des pays selon les émissions de dioxyde de carbone, parmi 184 pays, les pays étant classés du moins polluant au plus polluant.

Il est à noter que l'augmentation des émissions n'est pas seulement limitée au total, mais est également accompagnée d'une augmentation des émissions par habitant, atteignant 3,93 tonnes par habitant en 2021. Si l'on examine l'évolution des émissions par rapport au produit intérieur brut, le taux d'émissions a diminué pour atteindre 0,35 kilogramme par tranche de 1000 dollars de PIB par rapport à l'année précédente.

Bien que le **tableau I.2** montre une augmentation des émissions de dioxyde de carbone au cours des dix dernières années, les émissions par habitant ainsi que les émissions de carbone par tranche de 1000 dollars de PIB montrent une tendance variable.

Malgré une diminution des émissions par habitant, les émissions totales de dioxyde de carbone ont augmenté au cours des cinq dernières années, ce qui souligne les défis environnementaux auxquels l'Algérie est confrontée en matière de gestion des émissions et de préservation de l'environnement.

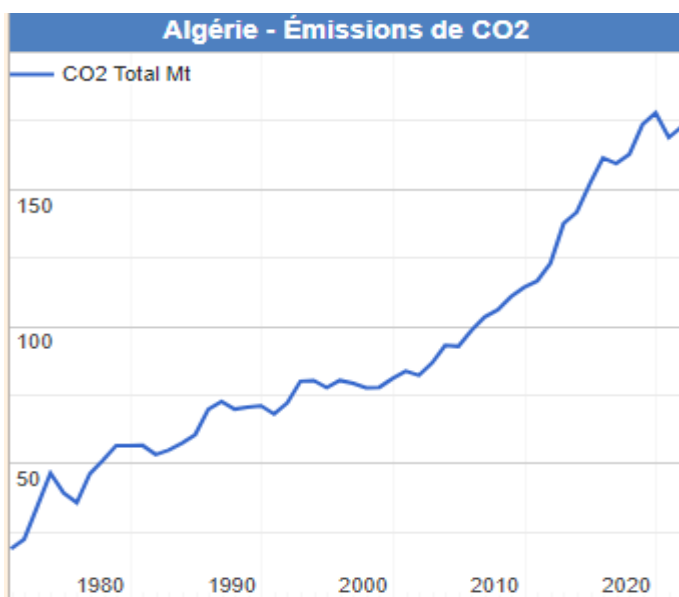


Figure I.13: La courbe d'émissions de CO₂

Tableau I.2: l'émission de CO₂ en Algérie

Date	CO ₂ Total MT	CO ₂ kg/1000 \$	CO ₂ tonnes parhabitant
2021	173.001	0.35	3.93
2020	168.950	0.36	3.90
2019	177.923	0.36	4.17
2018	173.705	0.35	4.14
2017	162.802	0.34	3.94
2016	159.475	0.33	3.93
2015	161.483	0.35	4.05
2014	152.133	0.34	3.89
2013	141.719	0.33	3.70
2012	137.531	0.33	3.66
2011	122.971	0.30	3.34
2010	116.644	0.30	3.23
2009	114.276	0.30	3.22
2008	110.872	0.30	3.18
2007	106.030	0.29	3.09
2006	103.429	0.29	3.06
2005	98.609	0.28	2.96
2004	92.742	0.28	2.82
2003	93.085	0.30	2.87
2002	86.644	0.29	2.71
2001	82.135	0.29	2.60
2000	83.735	0.31	2.69
1999	81.046	0.31	2.63
1998	77.815	0.31	2.57
1997	77.663	0.32	2.60
1996	79.214	0.33	2.69
1995	80.322	0.35	2.78
1994	77.736	0.35	2.74
1993	80.272	0.36	2.89
1992	80.016	0.35	2.94
1991	72.117	0.32	2.72
1990	68.004	0.30	2.62
1989	71.036	0.30	2.81
1988	70.584		2.87
1987	69.842		2.92
1986	72.668		3.13
1985	69.820		3.09
1984	60.519		2.76
1983	57.478		2.71
1982	54.913		2.67
1981	53.265		2.67
1980	56.615		2.93
1979	56.540		3.01
1978	56.574		3.11
1977	51.292		2.90
1976	46.327		2.69
1975	35.720		2.14

1974	39.306		2.42
1973	46.479		2.94
1972	34.379		2.24
1971	22.320		1.49
1970	18.935		1.30

Les Références bibliographiques

- [1] : M.-C. Pibiri, "Assainissement microbiologique de l'air et des systèmes de ventilation au moyen d'huiles essentielles," EPFL, 2006.
- [2] : C. Tanios, "Caractérisation, évaluation de la toxicité du biogaz issu de déchets ménagers et valorisation par reformage catalytique," 2017 : Littoral.
- [3] : C. Bliefert and R. Perraud, Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. De Boeck Supérieur, 2007.
- [4] : I. Composition chimique de l'atmosphère, "L'atmosphère dans tous ses états."
- [5] : C. Adoue, Mettre en œuvre l'écologie industrielle. PUR presses polytechniques, 2007.
- [6] : S. Dong, "Effet de projection de pelletes bioxygénées sur la qualité de revêtements élaborés par la projection thermique," Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [7] : M. Guemmour and B. Ghouati, "Décarbonation du gaz naturel par zéolithes synthétiques," 2021.
- [8] : M. Fritz Dufour, Les coûts et implications de notre demande d'énergie: une analyse comparée et complète des ressources énergétiques disponibles: La crise d'énergie imputable aux combustibles fossiles/Exploration de nos options/L'avenir de l'énergie. Fritz Dufour, MBA, DESS, 2018.
- [9] : M. Bonneau, "La forêt française métropolitaine à l'aube du XXIème siècle," La forêt française métropolitaine à l'aube du XXIème siècle, pp. 1-340, 2006.
- [10] : E. K. Nabil, "Evaluation de la séquestration du CO₂ et de l'empreinte carbone dans quatre systèmes de culture de l'olivier dans la région Marrakech-Safi : Analyse du cycle de vie de l'huile d'olive," 2021.
- [11] : J.-P. Favennec, Géopolitique de l'énergie : besoins, ressources, échanges mondiaux. Éditions Technip, 2009.
- [12] : S. Bouroubi and N. Bouzegane, "Etude de la qualité physicochimique, bactériologique et évaluation de la flore planctonique des eaux du barrage de Taksebt," Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [13] : H. Juvin, "L'écologie comme arme du mondialisme."
- [14] : L. Michaud, Le compost: pourquoi? comment? Éditions MultiMondes, 2016.
- [15] : C. Faurie, Écologie Approche scientifique et pratique (6e ed.). Lavoisier, 2011.

Les Références bibliographiques

- [16] : J. Guy and S. Bernard, Les puits de carbone. Lavoisier, 2008.
- [17] : A. J. Adon, "Evaluation de l'impact sur la santé de l'aérosol de combustion pour différentes sources urbaines en Afrique de l'Ouest en saison sèche et humide : caractérisation physico-chimique et toxicologique," Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2019.
- [18] : F. Ocampo, "Développement de catalyseurs pour la réaction de méthanation du dioxyde de carbone," Université de Strasbourg, 2011.
- [19] : F. Le Pennec, "Développement de microcapteurs pour la mesure de Dioxyde de Carbone (CO₂) -application au suivi de la qualité de l'air," Université d'Aix-Marseille, 2022.
- [20] : A. H. Sabry, J. Benhra, and A. Bacha, "Une approche asif distribuée pour le calcul des emissions co₂ dans les chaines logistiques marocaines," in Colloque international sur le monitoring des systemes industriels, 2014.
- [21] : K. YOUNICI and Z. BELHADI, "Analyse de la relation entre les émissions de CO₂ et la croissance du PIB en Algérie : Test de l'hypothèse de Kuznets," Economic Researcher Review, vol. 9, no. 2, 2021.
- .

Chapitre II

Méthodes de captage du carbone

II.1. Introduction :

Actuellement, les combustibles fossiles représentent une part significative des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO_2), contribuant ainsi de manière substantielle au phénomène du changement climatique. Dans le cadre des efforts visant à atténuer ce problème et à réduire les émissions de gaz à effet de serre, les technologies de capture et de stockage du carbone (CSC) sont largement reconnues comme des solutions essentielles [1]. Ces technologies se fondent sur la capacité à séparer et à capturer le CO_2 généré par les processus de combustion des combustibles fossiles, puis à le stocker de manière permanente et sûre afin de prévenir son rejet dans l'atmosphère. Les approches de CSC comprennent plusieurs méthodes, notamment l'adsorption, l'absorption, les membranes sélectives et les processus de refroidissement. Ces techniques sont appliquées à différentes échelles, allant des applications industrielles aux installations de captage direct dans l'air. De plus, une gamme variée de matériaux est utilisée pour la capture du CO_2 , tels que le charbon actif, la silice poreuse, les zéolithes, métal Framework organique (MOFs) et les liquides ioniques, chacun offrant des propriétés spécifiques d'adsorption et de sélectivité [2].

II.2. La capture post-combustion :

Le captage post-combustion est largement considéré comme la méthode la plus pratique pour réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des centrales électriques fonctionnant avec des combustibles fossiles, ainsi que dans les secteurs de la production chimique et pétrochimique. Cette technique implique l'élimination sélective du dioxyde de carbone des gaz résiduels produits après la combustion, facilitant ainsi sa séparation et son confinement subséquents [3].

Les différentes options techniques qui pourraient être utilisées avec le captage post-combustion sont illustrées dans la **figure II.1**

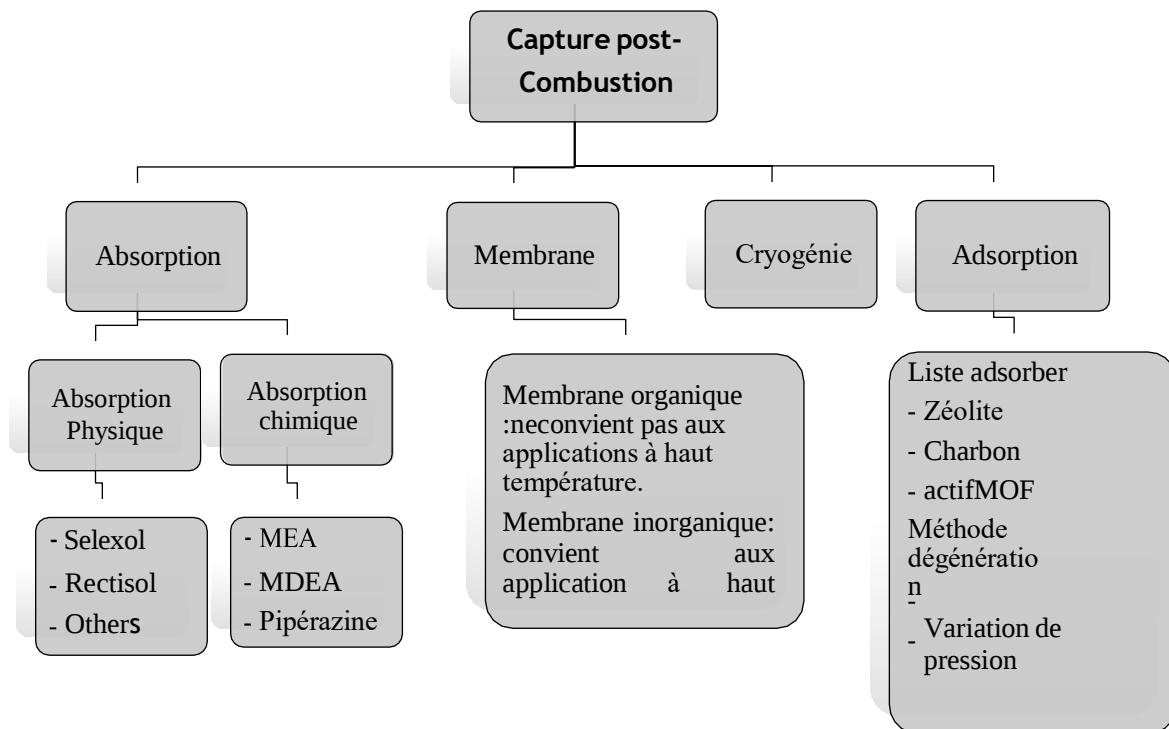


Figure II.1 : Diverses technologies de captage du carbone post-combustion.

II.2.1 . Absorption :

Les technologies d'absorption peuvent être catégorisées en deux types : la méthode chimiques (ou réactives) et les méthodes physiques (basées sur la solubilité). Les technologies d'absorption chimique exploitent des solvants qui réagissent avec le CO_2 , tels que l'ammoniac ou la monoéthanolamine (MEA), une amine primaire, ou fournissent un milieu alcalin qui favorise l'hydrolyse du CO_2 en ions carbonate et bicarbonate. Par exemple, le méthyl- diéthanolamine (MDEA) une amine tertiaire, est un solvant communément utilisé dans cette approche.

Par contre, les solvants physiques ne réagissent pas chimiquement avec le CO_2 . Des exemples de solvants physiques comprennent l'éther di méthylique de polyéthylène glycol (DEPG) et le méthanol froid (système Rectisol). Cependant, il est souvent difficile pour les solvants physiques d'éliminer plus de 90% du CO_2 présent dans les gaz de combustion à pression atmosphérique, ce qui est généralement l'objectif visé, car l'absorption physique est fortement dépendante de la pression partielle du CO_2 [4].

II.2.1.1 . Absorption physique :

L'absorption physique implique la capture du CO_2 en se basant sur la loi de Henry. Dans cette technologie, l'absorption se produit à des niveaux élevés de CO_2 , à des pressions partielles et à basse température, ce qui n'est pas économique pour les gaz de combustion dont la concentration en CO_2 est inférieure à 15% en volume. L'absorption physique ne génère de chaleur que lors de la dissolution du CO_2 dans le solvant, car il n'y a pas de réaction chimique entre le CO_2 et le solvant. Plus la température est basse et plus la pression partielle de CO_2 dans le gaz à traiter est élevée, plus le volume de CO_2 pouvant être capturé est important.

Cette méthode est couramment utilisée dans les processus industriels tels que la production de gaz naturel et d'hydrogène. Des procédés commerciaux basés sur cette technologie sont disponibles, notamment le procédé Selexol qui utilise de l'éther diméthylque ou du propylène glycol comme solvant, ainsi que le procédé Rectisol qui utilise du méthanol comme solvant. Certains de ces procédés sont également capables d'éliminer le H_2S du flux de gaz de combustion [5].

❖ DEPG (Selexol)

L'éther diméthylque de polyéthylène glycol (DEPG), commercialisé sous le nom SELEXOT, possède une formule générale $\text{H} : \text{CO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}) \text{CH}_3$. Il s'agit d'un solvant efficace pour l'élimination du H_2S et du CO_2 , et en raison de sa nature polaire, il convient également pour le COS, le CS_2 et les mercaptans. La chaleur d'absorption du CO_2 dans le DEPG est faible par rapport aux amines, ce qui signifie que l'énergie nécessaire pour la régénération est également faible [6].

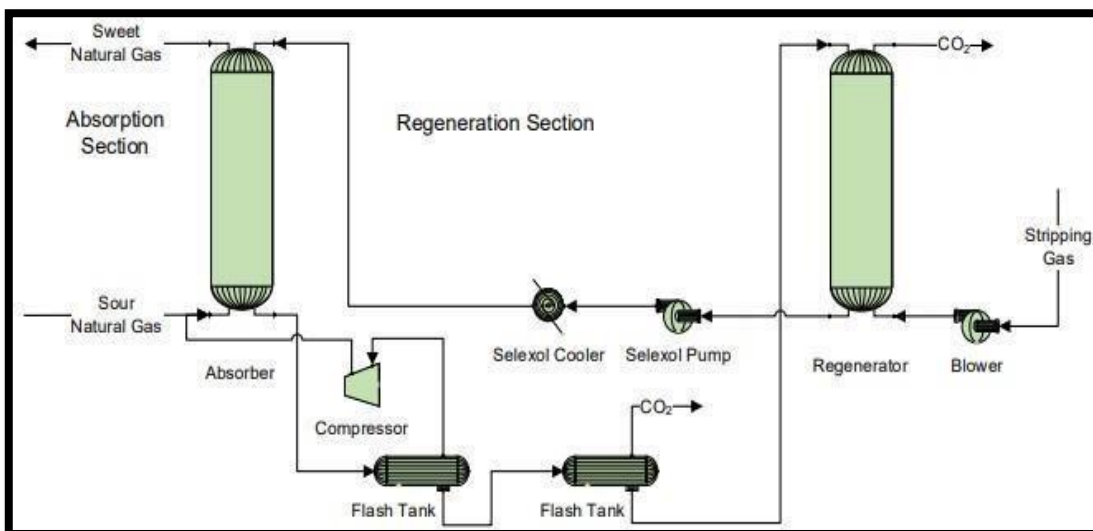


Figure II.2 : Capture de carbone par absorption physique avec SELEXOL

❖ Méthanol (Rectisol)

Les avantages de l'utilisation du méthanol comprennent sa disponibilité, son faible coût et sa stabilité chimique et thermique. De plus, dans certaines conditions opératoires, le méthanol peut déshydrater le gaz à traiter, prévenant ainsi la formation d'hydrates [7].

Le Rectisol est le premier procédé physique à base de solvant organique. Il fonctionne à des pressions comprises entre 2750 kPa et 880 kPa, ainsi qu'à des températures allant de -60 à 70°C. À de telles températures basses, le méthanol conserve une faible viscosité et une capacité de transport de CO₂ nettement supérieure à celle des autres solvants physiques à leurs températures de fonctionnement typiques [8].

Ce procédé est utilisé à la raffinerie Sturgeon en Alberta pour capturer 3500 tonnes par jour de CO₂ provenant de l'unité de gazéification du bitume. Il peut réduire les niveaux de CO₂ jusqu'à des niveaux de ppm et capturer jusqu'à 99 % du CO₂. Cependant, il s'agit d'un processus complexe nécessitant une réfrigération au méthanol, et les coûts associés à la construction d'une usine de capture du carbone peuvent être élevés [4].

❖ Propylène carbonate

Le propylène carbonate est employé dans le procédé de solvant fluor, qui permet d'éliminer le CO₂ à des concentrations inférieures à 1 mol%. Ce procédé a été développé à la fin des années 1950 par la société Fluor. Il convient aux gaz d'alimentation présentant une pression partielle de CO₂ supérieure à 480 kPa et une concentration en H₂S inférieure à 50 ppm, avec des concentrations en composants inférieures à 0,5 mol%. Le CO₂ est désorbé du solvant sans apport de chaleur. La charge de solvant augmente avec la diminution de la température, donc pour réduire le taux de circulation, l'absorbeur est exploité à des températures inférieures à -18°C [9].

❖ Morpholine (morphysorb)

Morphysorb est un mélange de N-formylmorpholine et de N-acétyl-morpholine utilisé pour l'élimination du H₂S, du CO₂, du COS et du RSH du gaz naturel ou du gaz de synthèse. Ce solvant permet une élimination efficace des gaz acides jusqu'à 2% de CO₂, avec une simple régénération thermique. Une régénération thermique supplémentaire est nécessaire pour réduire la concentration en CO₂ jusqu'à 50 ppm. Les pressions typiques du gaz d'alimentation pour le procédé Morphysorb varient entre 27 bar et 90 bar, avec une composition des composants acides allant de 5% à 70%. Le solvant Morphysorb présente une capacité élevée en gaz acide, est non corrosif et non toxique. En raison de sa faible pression de vapeur, les pertes de solvant vers les produits et le gaz acide sont faibles [10].

❖ Liquides ioniques

Les liquides ioniques, des sels à l'état liquide à température ambiante, se déclinent en une variété importante, composée de divers cations et anions. Leurs propriétés comprennent une faible volatilité (pression de vapeur négligeable), une stabilité thermique élevée (décomposition au-dessus de 300°C) une faible dégradation, une corrosivité réduite, une inflammabilité relativement basse et une faible énergie de régénération [11]. Ils se distinguent par leur capacité à absorber physiquement le CO₂, sans subir de réactions chimiques. Certains présentent même une sélectivité envers le CO₂ en présence d'azote et de méthane.

Les ions tels que l'hexafluorophosphate et le tétrafluoroborate ont été étudiés pour leur solubilité exceptionnelle du dioxyde de carbone. La solubilité du CO₂ dans tous les liquides ioniques augmente avec la pression du CO₂ et diminue avec l'augmentation de la température. Cependant, leur viscosité augmente lors de la capture du CO₂, ce qui peut être atténué en ajoutant un solvant aminé. Malgré leur intérêt, l'application industrielle des liquides ioniques pose des défis en termes de disponibilité, de coût, d'impact environnemental, de toxicité et des stabilité à long terme [12].

II.2.1.2 . Absorption chimique :

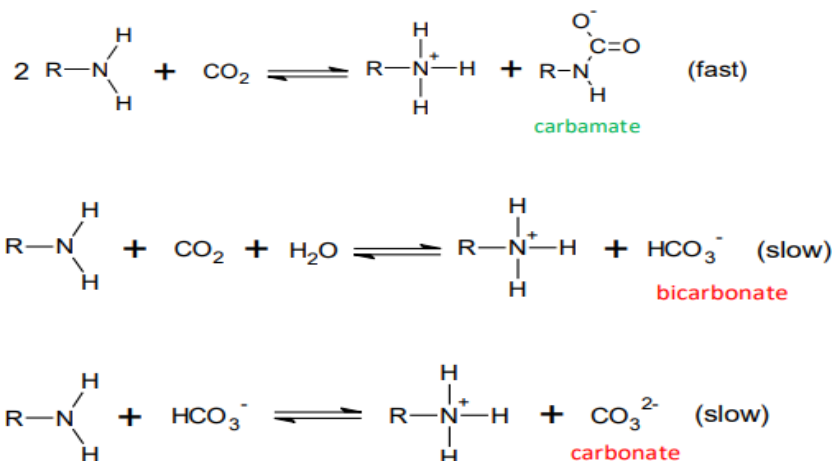
L'élimination du dioxyde de carbone des gaz de combustion implique l'utilisation de solvants à base d'amines après la combustion de combustibles fossiles dans les centrales électriques et les industries. Le solvant chargé en CO₂ est régénéré à des températures élevées pour rompre la liaison amine-CO₂, produisant ainsi un flux de vapeur riche en CO₂ et régénérant le solvant d'origine. Le monoéthanolamine (MEA) est le solvant le plus largement utilisé, avec une concentration typique de 30% en poids, considéré comme la norme de référence pour ce processus. D'autres solvants utilisés dans l'absorption chimique du CO₂ comprennent la pipérazine (PZ), la diéthylamine (DEA) et la méthyldiéthylamine (MDEA) [13].

Avant d'entrer dans le système de captage du CO₂, les fumées doivent subir un traitement pour éliminer les contaminants tels que le dioxyde de soufre (SO₂) les oxydes d'azote (NO_x), l'oxygène (O₂) et les particules, et pour refroidir la température dans une plage qui favorise le processus d'absorption. Les gaz acides tels que le SO₂ et le NO_x compromettent les performances d'absorption en réagissant avec le solvant pour former des sels non régénérés thermostables. Ces sels thermostables ont tendance à réduire la capacité d'absorption des solvants, à augmenter la viscosité et à favoriser la formation de mousse. Par conséquent, les concentrations de gaz acides dans les gaz de combustion doivent être maintenues dans des valeurs recommandées, avec des concentrations de SO₂ inférieures à 10 ppm. L'élimination est généralement réalisée en lavant les fumées avec du calcaire (CaCO₃) dans une unité de désulfuration des fumées (FGD) [14].

II.2.1.2.1. Technologies basées sur les amines :

Les amines, en tant que bases organiques de faible force, réagissent avec le CO_2 et le H_2S (gaz acides) pour former des sels instables à température modérée, tels que des carbamates, des carbonates et des bicarbonates,

La réaction des amines avec le CO_2 peut être décrite par les équations suivant :



Comme illustré dans les équations ci-dessus, deux moles d'amine sont requises pour absorber une mole de CO_2 lors de la formation du carbamate. Une mole d'amine est nécessaire pour absorber une mole de CO_2 lors de la formation du bicarbonate

❖ MEA

Le processus de capture du dioxyde de carbone (CO_2) de post-combustion, utilisant la monoéthanolamine (MEA) ($\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) est considéré comme le plus avancé et le plus largement adopté. Le MEA est employé depuis plus de 60 ans pour le traitement des gaz acides. La majorité des installations de capture de CO_2 des fumées de combustion utilisent une solution aqueuse de MEA en raison de sa grande réactivité et de son efficacité d'absorption élevée. Habituellement, le MEA est utilisé à des concentrations de 15 à 30% en poids.

Cependant, un inconvénient de l'utilisation du MEA pour la capture postcombustion réside dans sa réactivité élevée, conduisant à des réactions irréversibles avec les impuretés acides présentes dans les gaz de combustion, comme le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x). Notamment, le dioxyde d'azote (NO) dans les fumées ne pose pas de problème majeur, car il constitue la forme prédominante d'azote, n'interagissant pas avec les amines.

Les gaz de combustion non traités provenant des centrales électriques au charbon contiennent généralement entre 700 et 2500 ppm de SO_2 , nécessitant donc une désulfuration jusqu'à un niveau souhaité de 10 ppm de SO_2 .

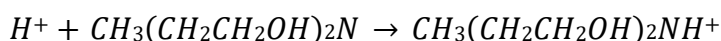
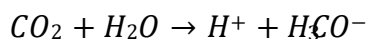
De plus, le MEA réagit également avec l'oxygène présent dans les gaz de combustion, formant des sels thermostables. Le fonctionnement économique des absorbeurs de MEA est obtenu lorsque leur charge en amine est élevée et proche du pincement, généralement autour de 0,5 mol/mol. Cela entraîne une température plus élevée dans l'absorbeur près du sommet de la colonne, augmentant ainsi les pertes en eau et en amine. Le lavage à l'eau en haut de la colonne peut être utilisé pour réduire ces pertes. Par ailleurs, la charge en amine pauvre au sommet de la colonne est normalement supérieure à 0,1 mol/mol. L'absorption du CO₂ se produit généralement à des températures comprises entre 30 et 50°C et à des pressions légèrement supérieures à la pression atmosphérique, typiquement de quelques kPa.

Cependant, le MEA est facilement dégradé par l'oxygène présent dans les gaz de combustion. Jusqu'à 30% de la production d'une centrale électrique peut être nécessaire uniquement pour la régénération des amines. Environ 80% des coûts d'exploitation d'une unité de MEA sont généralement attribués à la régénération des amines [4].

❖ MDEA

La méthyl diéthanolamine est classée comme une amine tertiaire et, en raison de sa structure, elle ne réagit pas directement avec le dioxyde de carbone (CO₂) et est donc incapable de former un carbamate. En réalité, le MDEA est principalement utilisé pour l'élimination efficace du sulfure d'hydrogène (H₂S) avec un dégagement (glissement) de CO₂.

Cependant, il peut être amélioré en étant combiné avec une amine primaire comme la MEA ou une amine secondaire comme la pipérazine pour augmenter sa capacité à absorber le dioxyde de carbone. Le MDEA promu présente une capacité d'absorption thermique plus faible, ce qui nécessite donc moins d'énergie pour la régénération par rapport à certains autres solvants, tels que le MEA. Un avantage de l'utilisation du MDEA est qu'il agit comme un grand puits pour les protons produits par l'hydrolyse lente du CO₂ [15].



La solubilité physique du CO₂ dans l'eau, qui constitue la majorité de la solution de MDEA, est faible, mais il est beaucoup plus soluble dans le MDEA. La solubilité chimique du CO₂ dans les solutions de MDEA est très élevée car la protonation du MDEA permet la production d'ions bicarbonate et carbonate [4].

❖ Pipérazine

La pipérazine aqueuse pourrait potentiellement devenir une nouvelle norme dans le domaine de la technologie de capture du carbone. Jusqu'à présent, le solvant standard est une solution de 30% en poids de MEA. Une nouvelle méthode standard a été proposée, utilisant une solution de 40% en poids de pipérazine avec une régénération à 150°C par flash en deux étapes. La pipérazine en tant que solvant résiste à la dégradation par l'oxygène et est moins volatile que le MEA. Bien que le point d'ébullition du MEA soit de 170°C et celui de la pipérazine soit de 146°C, la pipérazine n'est pas corrosive pour l'acier inoxydable. De plus, elle n'est pas soumise à une dégradation thermique importante à des températures allant jusqu'à 150°C.

Les besoins énergétiques attendus pour un processus d'épuration aqueuse à la pipérazine sont d'environ 220 kWh/tonne de CO₂, avec un besoin en chaleur de 2,6 MJ/tonne de CO₂ [16].

❖ Ammoniac réfrigéré

Ce procédé est breveté par Alstrom Power. Le solvant consiste en un mélange aqueux froid d'ammoniac et de carbonate d'ammonium. Le dioxyde de carbone réagit avec les composants du solvant pour former des carbamates, de l'ammonium et du bicarbonate d'ammonium, qui précipitent hors de la solution. L'élimination du bicarbonate permet d'augmenter la capacité d'absorption de la solution envers le CO₂. Les défis associés à ce processus comprennent la gestion des bicarbonates en suspension, le maintien de la solution à basse température et les pertes d'ammoniac volatil [17].

❖ Solvants biphasiques

Les solvants biphasiques, également connus sous le nom de solvants à changement de phase, se composent d'amines comprenant une amine primaire ou secondaire comme accélérateur d'absorption du CO₂, ainsi que d'une amine tertiaire agissant comme puits de CO₂. Une fois que le CO₂ est absorbé, le solvant enrichi en CO₂ subit une transition de phase liquide-liquide, où plus de 90% du CO₂ absorbé est concentré dans une seule phase. Le mélange liquide-liquide quitte ensuite l'absorbeur et les deux phases liquides sont séparées dans un séparateur de phases liquide-liquide. Seule la phase enrichie en CO₂ est dirigée vers le désorbeur (stripper CO₂). Le concept de cette technologie, encore en cours de développement, est illustré dans la figure (II.3). Selon la composition du mélange, la transition de phase peut-être induite par un changement de température. Dans ce cas, le séparateur de phases liquide-liquide est situé entre l'échangeur de chaleur et le désorbeur.

Les solvants biphasiques nécessitent environ 50% moins d'énergie pour la régénération et ont une capacité de chargement cyclique jusqu'à quatre fois supérieure par rapport au MEA. La capacité de chargement cyclique, exprimée en moles de CO₂ par litre de solution d'amine, est la différence entre le chargement riche et le chargement pauvre, multipliée par la concentration d'amine. Cette capacité détermine la quantité maximale de CO₂ pouvant être capturée par cycle [18].

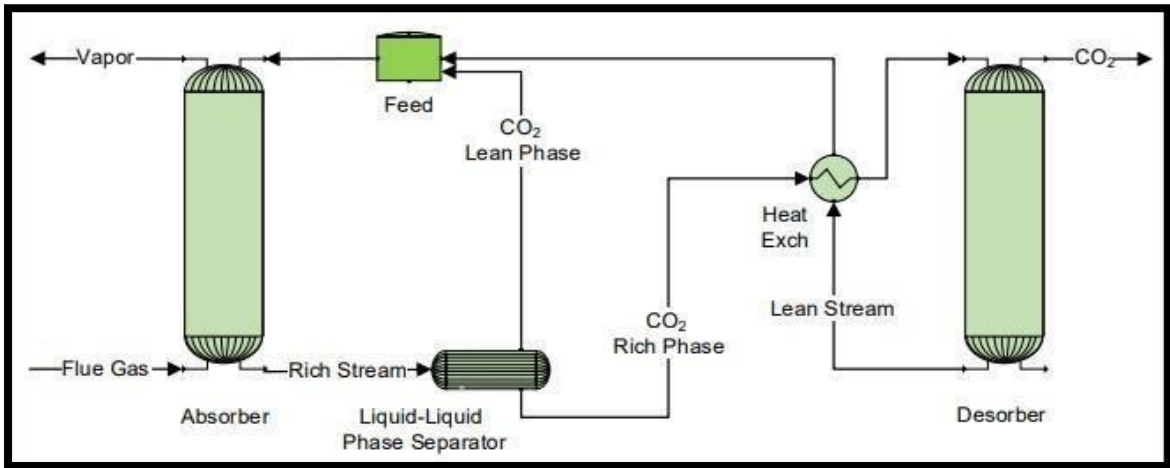


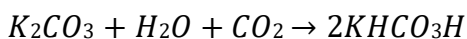
Figure II.3 : Concept d'un Processus de solvant biphasique

II.2.1.2.1. Autres solvants d'absorption chimique :

❖ Carbonate de potassium

Les procédés conventionnels basés sur les amines pour la capture du carbone impliquent généralement la régénération du solvant par la formation de vapeur à haute température. Dans le but de réduire les coûts associés à la capture du CO₂, d'autres solvants aqueux ont été proposés, parmi lesquels des solutions de carbonate de potassium (K₂CO₃). Le procédé utilisant du carbonate de potassium a été développé par le Bureau des Mines américain pour l'élimination du CO₂ des gaz de fabrication. La température de fonctionnement dans le contacteur K₂CO₃ est généralement maintenue entre 90 et 110°C, d'où le nom de "hot pot" attribué à ce processus. L'énergie requise pour la régénération de la solution est inférieure à celle nécessaire pour le MEA.

Le procédé au carbonate de potassium est basé sur réaction réversible représentée par l'équation suivant



Les solutions de K₂CO₂ sont considérées comme d'excellents solvants pour la capture du CO₂ en raison de leur faible énergie de régénération, de leur faible taux de dégradation et de leur faible corrosivité. Cependant, l'un des inconvénients du K₂CO₃ est sa cinétique

de réaction relativement lente avec le CO_2 . Pour surmonter cette limitation, des promoteurs peuvent être ajoutés aux solutions de K_2CO_3 , tels que des amines réactives comme la pipérazine. L'ajout de pipérazine en tant que promoteur pour le K_2CO_3 peut augmenter ses taux et ses capacités par rapport au MEA, offrant ainsi un avantage significatif. De plus, la chaleur de désorption du CO_2 pour le K_2CO_3 est généralement de 50% à 75% de celle du MEA. L'introduction de catalyseurs enzymatiques tels que l'anhydrase carbonique, la glycine ou la DEA aux solutions de K_2CO_3 peut également accélérer la cinétique de réaction avec le dioxyde de carbone [4].

❖ Acides aminés (glycinate de sodium)

Les acides aminés sont également considérés comme des solvants pour la capture du carbone post-combustion. L'acide aminé le plus simple est la glycine, de formule $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$. Ces composés chimiques agissent à la fois comme des acides et des bases, et lorsque le groupe carboxyle est neutralisé avec une base telle que NaOH ou KOH , le groupe amine est activé. Le glycinate de sodium ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COONa}$) est plus réactif envers le CO_2 que le MEA. De plus, il nécessite moins d'énergie pour être régénéré que le MEA. De plus, il est totalement non volatil, ce qui signifie que les pertes par évaporation seraient pratiquement nulles. Le glycinate de sodium est partiellement oxydé, ce qui le rend résistant à une oxydation ultérieure par l' O_2 présent dans les gaz de combustion. Le diméthylglycinate de potassium ($(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{CH}_2\text{COOK}$) est une amine tertiaire et peut être utilisé comme solvant de capture du carbone lorsqu'il est promu avec de la pipérazine ou un catalyseur enzymatique [19].

Technologie enzymatique - Anhydrase carbonique humaine

L'anhydrase carbonique (CA) est une enzyme naturelle présente dans tous les organismes vivants, régulant le dioxyde de carbone (CO_2). Son rôle consiste à catalyser la conversion du CO_2 en bicarbonate. CSI a développé une technologie qui, en utilisant l'anhydrase carbonique, réduit le coût de la capture du carbone sans émissions de produits toxiques.

L'utilisation de l'anhydrase carbonique comme catalyseur dans les solutions de carbonate de potassium améliore la cinétique d'absorption du CO_2 , similaire à celle des solutions d'amines. Des sources de chaleur de faible qualité peuvent être exploitées pour éliminer le CO_2 du solvant, avec une température inférieure à 80°C généralement suffisante dans le rebouilleur pour libérer le CO_2 du solvant.

L'objectif principal des enzymes est de fournir un site de réaction catalytique où des vitesses de réaction accrues sont observées. Bien que les enzymes offrent une amélioration de la réaction, une base alcaline est nécessaire pour maintenir le CO_2 en

Solution. Les enzymes ont des poids moléculaires élevés, par exemple l'anhydrase carbonique a un poids moléculaire d'environ 29000 g/mol. En raison de cela, ils sont utilisés à des concentrations très faibles, variant de 2 à 6 kg d'enzyme par m³ de solution. Ils sont thermiquement dégradés autour de 70°C, ce qui nécessite l'utilisation de régénérateur fonctionnant sous vide pour maintenir une température suffisamment basse et éviter la dégradation [20].

II.2.2 Adsorption

II.2.2.1 . Mécanisme du processus d'adsorption

Théoriquement, l'adsorption peut être décrite comme une réaction de diffusion-équilibre d'une molécule de liquide ou de gaz vers une surface solide, traversant simultanément les canaux gazeux et liquides. En pratique, la capacité d'adsorption dépend fortement du transfert de masse entre les surfaces de l'adsorbant et de l'adsorbé ainsi que de la vitesse de réaction d'adsorption. L'adsorption peut également être initiée par l'énergie de surface lorsque les molécules de surface subissent un déficit de liaison, les rendant ainsi énergétiquement favorables à l'adsorption des molécules. Par contre, l'incapacité des particules à quitter la surface peut être qualifiée de désorption.

En général, le principe de l'adsorption comprend quatre étapes : (1) les sites isolés sur la surface de l'échantillon commencent à adsorber les molécules de gaz à basse pression,

(2) une fois que la pression du gaz augmente, la zone des molécules adsorbées s'étend pour former une monocouche, (3) une augmentation supplémentaire de la pression du gaz peut entraîner le début d'une couverture multicouche et les pores plus petits de l'échantillon se rempliront d'abord, (4) une nouvelle augmentation de la pression du gaz entraînerait le recouvrement complet de l'échantillon et le remplissage de tous les pores.

Le mécanisme d'adsorption peut être classé en deux catégories : adsorption physique et adsorption chimique. La différence entre ces deux mécanismes réside dans leur spécificité, leur liaison, leur caractérisation, leur surface de couche moléculaire et les conséquences des divers facteurs dans l'ensemble du processus [21].

II.2.2.2 . Adsorption chimique

La chimisorption désigne un processus d'adsorption chimique où une molécule se fixe sur une surface solide par la formation spontanée d'une liaison chimique similaire à une liaison hydrogène, une liaison covalente ou ionique. Ce procédé se déroule généralement à de très faibles concentrations et les particules chimisorbées sont souvent irréversibles.

Dans l'adsorption chimique, il y a transfert d'électrons entre l'adsorbant et l'adsorbé. Ce processus survient lorsque les molécules de gaz sont adsorbées par des liaisons de valence sur la surface adsorbante, formant une monocouche.

De plus, cela peut nécessiter une énergie de régénération élevée. L'énergie de chimisorption entre les molécules de gaz et les adsorbants peut varier considérablement en fonction de la force de liaison de l'adsorbant et de l'espèce adsorbée. En termes de cinétique d'adsorption, le processus de chimisorption est une réaction exothermique et les valeurs d'enthalpie sont généralement élevées en raison de la formation de liaisons chimiques.

Une étude a porté sur le processus chimique des composites à base de carbone/oxyhydroxyde de fer, synthétisés par pyrolyse en une étape, pour la capture du CO₂. Le principal avantage de ce matériau est son potentiel à être un adsorbant peu coûteux et efficace. De plus, ces composites peuvent également adsorber le CO₂ physiquement et chimiquement. Dans cette étude, l'adsorption physique précède l'adsorption chimique, et à mesure que la teneur en fer augmente, le mécanisme évolue de l'adsorption physique à l'adsorption chimique en raison d'interactions favorables entre l'oxyhydroxyde de fer et les molécules de CO₂. Par conséquent, la capacité d'adsorption de CO₂ augmente et la cinétique d'adsorption diminue.

En outre, trois méthodes ont été étudiées pour préparer des adsorbants poreux fonctionnalisés par des amines. La première consiste à greffer des organosilanes avec de l'aminopropyle (AP) et de la diéthylènetriamine (DT), la deuxième à imprégner avec dupolyéthylène imines (PEI), et enfin, la double fonctionnalisation par imprégnation d'échantillons greffés précédemment. Parmi ces méthodes, la deuxième méthode a présenté la plus haute capacité de capture de CO₂. Théoriquement, les molécules de CO₂ sont adsorbées sur la surface de l'adsorbant non polaire, dominée par des groupes fonctionnels oxygénés. La réaction est soutenue par l'interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat à une température modérée, ce qui entraîne une réaction exothermique. Ainsi, la surface de l'adsorbant est régénérée en inversant l'état d'adsorption pour sa réutilisation lors du prochain processus d'adsorption [21].

II.2.2.3. Adsorption physique :

L'adsorption physique, ou physisorption, se caractérise par la fixation de l'adsorbat sur l'adsorbant par le biais de liaisons hydrogène, de forces de Van der Waals, de forces électrostatiques et d'interactions hydrophobes. Ces interactions sont généralement réversibles en fonction de la pression et de la température. La physisorption est considérée comme une réaction exothermique avec de faibles valeurs d'enthalpie en raison des forces d'attraction de Van der Waals, et elle est également associée à une faible énergie d'adsorption. Dans ce contexte, l'adsorption des particules est un processus spontané sans barrières, tandis que la désorption des molécules adsorbées nécessite de surmonter l'énergie de liaison à partir de la surface, ce qui conduit généralement à une énergie d'adsorption positive.

Des recherches sur les mécanismes de liaison du CO_2 ont été menées en utilisant divers matériaux, notamment des supports de silice pure et de la silice mésoporeuse greffée avec une amine modifiée. Les résultats ont montré que l'enthalpie du support de silice pur non modifié était inférieure à celle des espèces réagies à la surface, ce qui confirme que le principal mécanisme de liaison est la physisorption. La faible énergie d'activation pour la physisorption, observée lors de fluctuations de pression, permet une réversibilité maximale. De plus, la distribution de taille des pores correspond au fait que les sites sont concentrés sur les basses enthalpies, ce qui favorise la physisorption des émissions de CO_2 .

La réaction exothermique se produit plus facilement à des températures plus basses, telles que 0°C et 25°C et à basse pression. Dans le cas de l'adsorption physique de gaz sur des solides, le taux d'adsorption augmente avec une augmentation de la pression car la densité du gaz diminue tout au long du processus d'adsorption [21].

L'adsorbant est régénéré par le biais de différentes méthodes, notamment l'adsorption par variation de température (AVT), l'adsorption par variation de pression (AVP) et l'adsorption par variation électrique. Parmi les adsorbants populaires, on trouve le charbon actif, l'alumine, les oxydes métalliques, les zéolithes et métal organique Framework (MOF) [22].

Un schéma d'un système utilisant l'adsorption par variation de température (AVT) est présentée dans la **figure II.4**. Les adsorbeurs peuvent être de type lit fixe, lit fluidisé ou lit mobile.

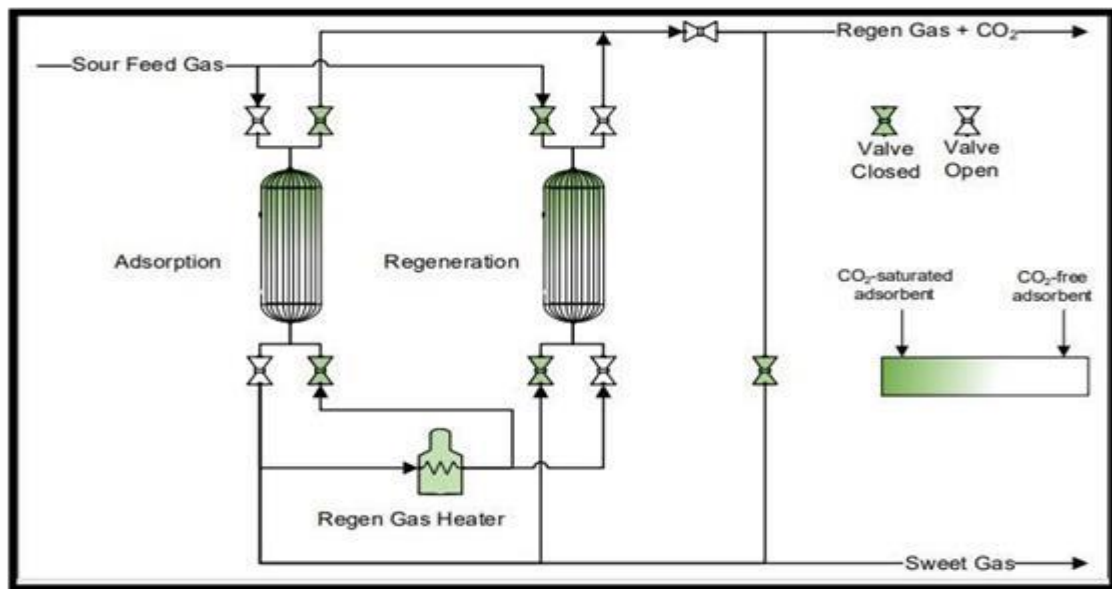


Figure II.4 : Unité d'adsorption de type (AVT) pour le captage du carbone

II.2.2.4. Les nanomatériaux pour la capture du CO₂

II.2.2.4.1. Les nanomatériaux à base de carbone

Historiquement, le charbon actif (CA) a été parmi les premiers adsorbants à base de carbone utilisés pour la capture du CO₂ en raison de son abondance en matières premières, de ses matériaux peu coûteux, de sa grande surface disponible et de ses caractéristiques d'adsorption élevées. Plus récemment, les adsorbants à base de carbone nanostructures, notamment le graphène et les nanotubes de carbone (CNTs), ont été identifiés comme des adsorbants significatifs du CO₂ en raison de leur grande disponibilité, de leur coût abordable, de leur grande surface spécifique, de leur structure poreuse ajustable, de leur potentiel de fonctionnalisation de surface et de leur facilité de régénération. La Figure (II.5) illustre la structure du graphène et des nanotubes de carbone.

En général, le graphène est une couche monoatomique présentant une structure hexagonale composée d'atomes de carbone liés de façon sp^2 . Divers types de graphène existent, notamment le graphène monocouche, le graphène à quelques couches, le graphène multicouche, l'oxyde de graphène (GO), les nano plaquettes de graphène (NPG) et l'oxyde de graphène réduit (rOG), qui sont parmi les principaux dérivés du graphène. Ces dérivés peuvent s'auto-assembler pour former des matériaux poreux en trois dimensions. La morphologie et les propriétés de ces matériaux à base de graphène (GBM), telles que le type, les propriétés chimiques de la surface, la résistance structurelle, voire les propriétés physiques, dépendent du processus de synthèse. De façon significative, par le biais de diverses techniques de superposition, il est possible de contrôler les canaux de flux de gaz et les pores, entraînant ainsi une stabilité remarquable de CO₂/N₂ ainsi qu'une cinétique d'adsorption rapide, et assurant un processus de cyclage stable d'adsorption/désorption de CO₂.

De plus, l'ajout de composés fonctionnels, tels que des groupes oxygénés, s'est également avéré bénéfique pour la conception de matériaux poreux efficaces dans l'absorption de CO₂.

Certains chercheurs ont synthétisé du HRGO (graphène réduit hydro thermiquement en trois dimensions 3D) avec une capacité poreuse élevée et une grande surface spécifique. Leur adsorbant à base de graphène a présenté une efficacité accrue dans la capture de CO₂ grâce à diverses interactions moléculaires telles que les interactions acide-base, les interactions polaires et la formation de liaisons hydrogène entre le CO₂ et le HRGO.

De même, l'introduction de groupes fonctionnels de dopage hétéro atomiques, tels que l'azote, le soufre, l'oxygène et le phosphore, s'est également révélé prometteuse pour les nanotubes de carbone (CNTs) et les adsorbants à base de graphène afin d'améliorer leur capacité d'absorption de CO₂ [21].

Les nanotubes de carbone (CNTs) sont généralement formés de graphite, adoptant une structure tubulaire caractérisée par une surface très poreuse et étendue, ce qui favorise les applications d'adsorption et de stockage de gaz. Ces nanotubes sont constitués d'une seule couche ou de multiples couches, avec un diamètre extérieur variant généralement entre 3 et 100 nm. De plus, ils présentent une conductivité thermique et électrique élevée. La modification de la surface des CNTs par fonctionnalisation covalente ou non covalente revêt une importance capitale dans le développement d'adsorbants à haute performance. Ces caractéristiques les rendent très prometteurs pour des processus d'adsorption et de désorption sélectifs et efficaces du CO₂.

Actuellement, la surface des adsorbants greffés avec des matériaux polymérisant, contenant soit des groupes amines polymères à chaîne courte soit à chaîne longue dans chaque monomère, a été étudiée pour maximiser l'efficacité de l'adsorption du CO₂. De plus, un polymère à chaîne longue greffé avec une diamine a fourni un site d'ancrage important pour le CO₂, favorisant ainsi la formation de carbamate, recouvrant ainsi les nanotubes de carbone à parois multiples pour améliorer la surface et le volume poreux.

Récemment, les CNTs ont été utilisés pour former des sorbants micro tubulaires par immobilisation de polyéthylène imine PEI. De plus, les CNTs de petite taille ont été fonctionnalisés à l'aide d'une méthode d'imprégnation humide pour garantir un transfert rapide de chaleur et de masse, ce qui est essentiel pour des processus d'adsorption alternée efficaces [21].

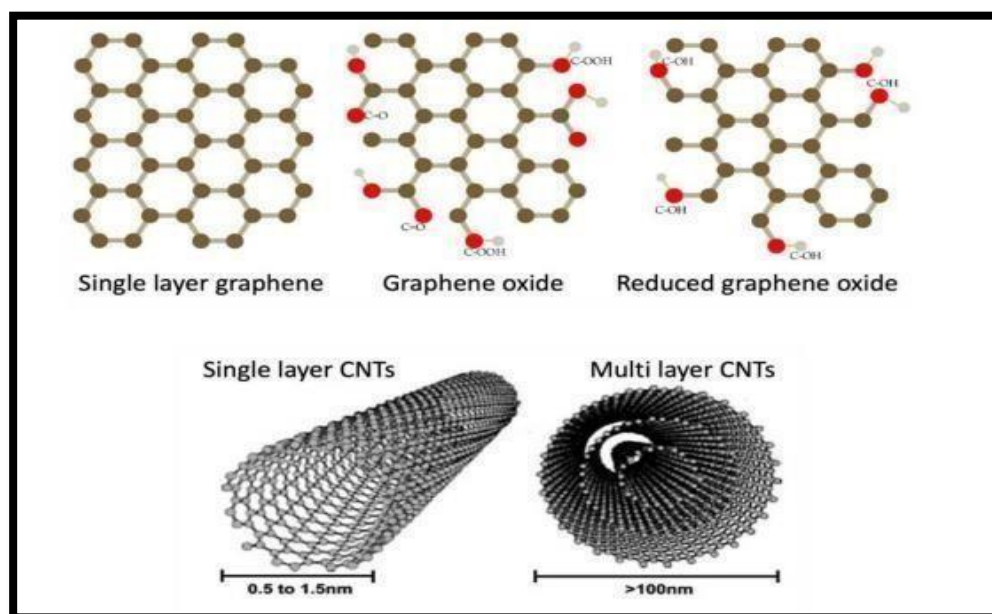


Figure II.5 : Différents types de graphène et de nanotubes de carbone

II.2.2.4.2 Les zéolithes :

Les zéolithes, dont la zéolithe Y, la 4A, la 5A et la 13X, sont des adsorbants fréquemment étudiés pour la capture du CO₂. Ces matériaux présentent des caractéristiques bénéfiques telles que leur porosité, leur taille de pore, leur acidité, leur basicité et leur surface spécifique, et peuvent être facilement modifiés selon les besoins spécifiques des applications. De plus, en raison de leur effet de tamisage moléculaire et de bonnes interactions électrostatiques entre les molécules de CO₂ et les cations alcalins présents dans leur structure, les zéolithes sont largement recherchées pour la capture du CO₂. Les cations tels que Li, Na et Al dans les zéolithes peuvent influencer la chaleur d'adsorption du CO₂ en augmentant les charges négatives, ce qui entraîne une augmentation de la chaleur d'adsorption [23].

De plus, les zéolithes se caractérisent par une taille de pore uniforme de 0,5 nm à 1,2 nm, ce qui facilite l'échange ionique, l'adsorption de gaz, la séparation et la purification.

L'adsorption des zéolithes dépend principalement de la structure et de la composition de la matrice, comme illustré dans la Figure (II.6) qui peut être divisée en trois familles : (1) des structures de petits pores composées de six, huit ou neuf tétraèdres, (2) des structures de pores moyens avec 10 tétraèdres, et (3) des zéolithes à grands pores avec des anneaux monocycliques et une structure ultra-large [24].

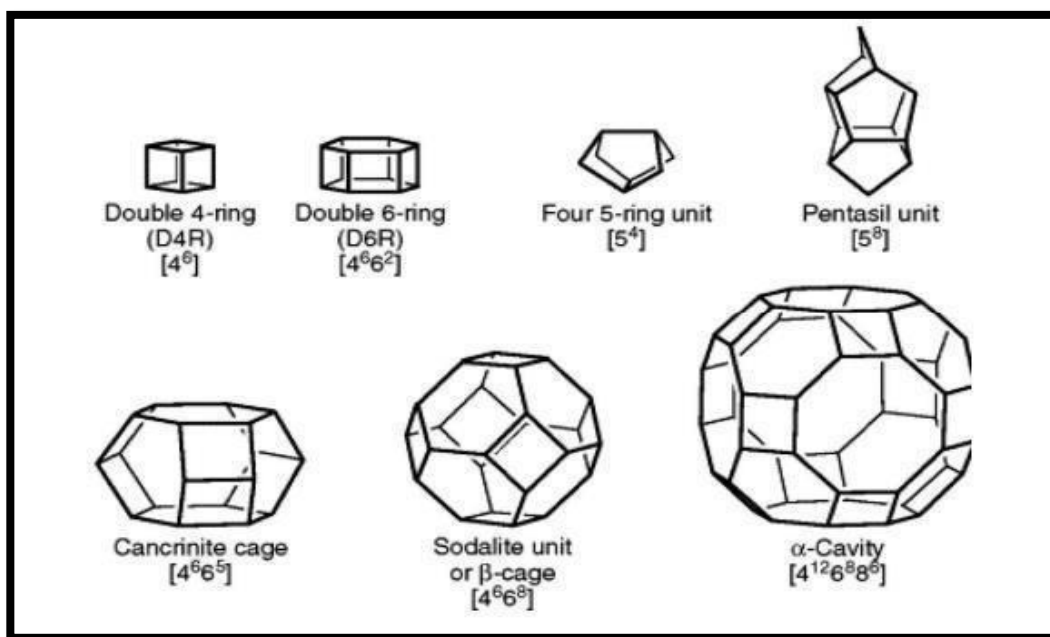


Figure II.6 : Les tailles relatives des n-cycle se trouvent fréquemment dans les zéolithes

II.2.2.4.3. Metal organic frameworks (MOFs) :

Les MOFs représentent actuellement la catégorie dominante des sorbants solides, composés de cations métalliques et de ligands organiques (comme illustré dans la figure II.7). À ce jour, plus de 20 000 MOFs différents. Basé sur une gamme variée d'ions métalliques et de liants organiques (par exemple, métaux de transition, actinides, métaux alcalino-terreux, métaux mixtes, carboxylates, sulfates, etc.), l'assemblage multi-composants des MOF permet d'ajuster leur morphologie et leurs microstructures, offrant ainsi un avantage significatif dans de nombreux domaines, notamment la capture du CO₂.

Selon certains chercheurs trois principaux mécanismes sont impliqués dans la capture du CO₂ par les MOFs, à savoir (1) les MOFs avec des sites métalliques ouverts, (2) les MOFs avec des structures ultra-microporeuses, et (3) les MOFs fonctionnalisés par amine. Les sites métalliques ouverts au sein des MOFs, également appelés sites insaturés coordonnés, sont décrits comme des centres métalliques insaturés générés pendant le processus d'activation.

Parmi les MOFs, les structures les plus explorées avec des sites métalliques ouverts incluent le M-MIL-100 où M représente le métal. Trois membres de la série MIL-100(M) ont été synthétisés par certains chercheurs pour étudier l'interaction entre les sites métalliques non saturés dans la structure MIL-100 et le dioxyde de carbone. Leur étude a montré que l'incorporation de centres métalliques chargés dans la structure augmentait l'interaction avec le dioxyde de carbone. D'autres chercheurs ont synthétisé et caractérisé une série de MOFs tridimensionnels avec une structure M-DABCO (M = Co, Ni, Cu, Zn) et ont étudié l'effet de l'identité du métal sur la surface spécifique, le volume des pores et l'adsorption du dioxyde de carbone. Ils ont conclu que l'atome métallique affecte la stabilité et les propriétés d'adsorption [21].

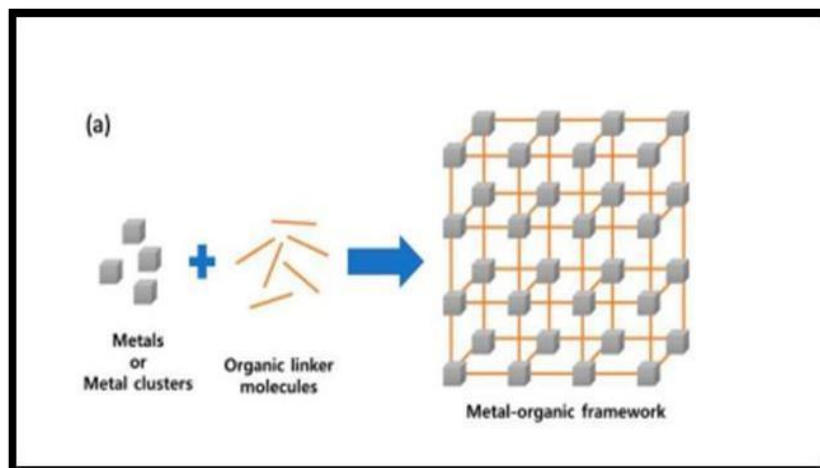


Figure II.7 : Diagramme schématique de base de la structure MOFs, le mécanisme impliqué dans la capture du CO₂.

Tous les nanomatériaux mentionnés ci-dessus sont des adsorbants prometteurs pour la capture du CO₂ car ils peuvent minimiser les besoins énergétiques du processus de régénération. De nombreuses modifications post-synthèse telles que la fonctionnalisation chimique ou l'activation de leurs propriétés texturales ont été proposées pour améliorer leurs performances absorbantes. Les méthodes couramment utilisées peuvent être classées dans deux familles principales : les modifications physiques et chimiques.

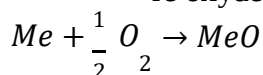
II.2.3 . Combustion en boucle chimique :

La combustion en boucle chimique est un procédé de captage du carbone pour la production d'électricité. Dans ce processus, l'oxygène est stocké dans un transporteur d'oxygène sous forme d'oxyde métallique tel que Fe₂O₃, NiO, Mn₂O₃, et est ensuite utilisé pour brûler le carburant. Cette combustion peut se produire soit en libérant l'oxygène dans la phase gazeuse, soit par contact direct avec le carburant. Le processus de combustion est divisé en réactions d'oxydation et de réduction, qui se déroulent séparément dans un réacteur à air et un réacteur à combustible, respectivement.

Dans le réacteur à combustible, l'oxyde métallique est réduit par le combustible :

$CH_x + MeO \rightarrow CO_2 + H_2O + Me$ (réaction exothermique ou endothermique selon le métal)

Le carburant lui-même est oxydé en CO₂ et H₂O. Dans le réacteur à air, le porteur réduit est ré oxydé en oxyde métallique



Une représentation schématique du processus de combustion en boucle chimique est présentée sous forme d'organigramme à la **figure II.8**

Les avantages des combustions en boucle chimique :

- Les gaz émis par le réacteur à air consistent principalement en azote.
- Les émissions du réacteur à combustible se composent de dioxyde de carbone et d'eau.
- La formation de NO_x est maintenue à un niveau minimal.
- La séparation du dioxyde de carbone de l'eau dans un condenseur requiert considérablement moins d'énergie que les processus d'absorption conventionnels.

Les inconvénients de la combustion en boucle chimique comprennent la nécessité d'éliminer le soufre du combustible pour prévenir la sulfuration du transporteur d'oxygène.

La cinétique redox lente, qui limite la capacité des réacteurs de combustion en boucle chimique, représente également un défi.

La plupart des procédés de combustion en boucle chimique ont jusqu'à présent été testés à l'échelle de laboratoire [4].

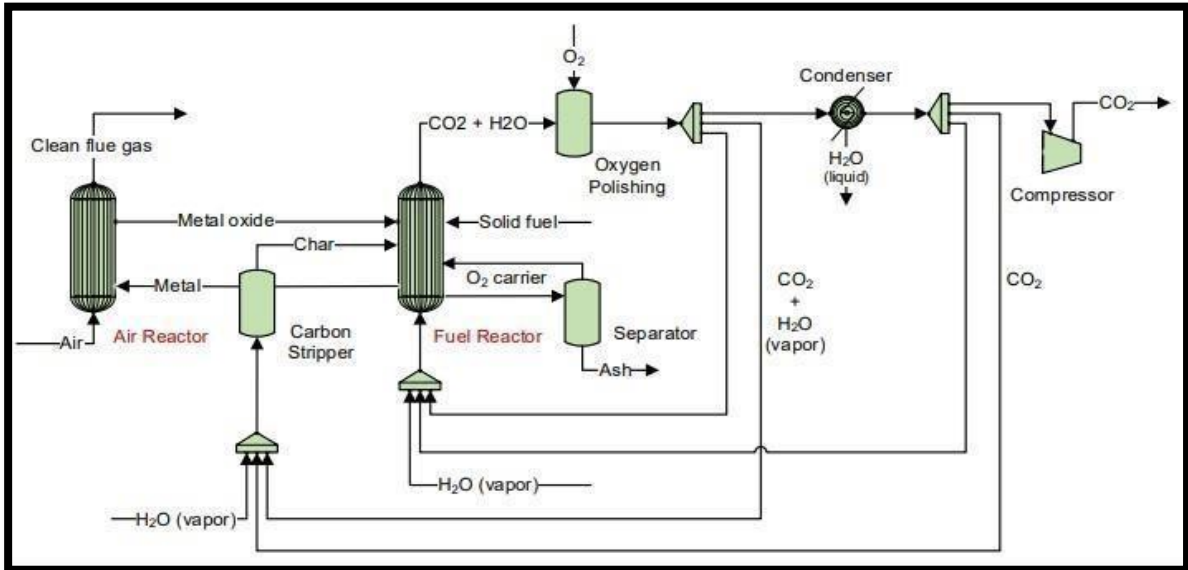


Figure II.8 : Diagramme de flux de processus illustrant la capture du dioxyde de carbone CO₂ par processus en boucle chimique.

II.2.4 . Boucle de calcium

La technologie de la boucle de calcium implique la capture du carbone post-combustion en utilisant la carbonatation réversible de la chaux (CaO). Un sorbant solide circule entre deux lits fluidisés, dirigés vers le carbonateur où l'oxyde de calcium réagit avec le CO₂ des gaz de combustion pour former du carbonate de calcium. Ce carbonate est ensuite transféré vers le calcinateur où il est décomposé en CaO et CO₂. La réaction de calcination est endothermique, donc de la chaleur est fournie en brûlant du carburant dans de l'oxygène pur pour générer un flux concentré de CO₂.

La boucle de calcium offre des avantages significatifs :

- Le coût évité du CO₂ se situe entre 30 et 50 dollars par tonne de CO₂.
- Le calcaire, source de CaO, est abordable, abondamment disponible et écologiquement sûr.

Un inconvénient associé à la technologie de la boucle de calcium est la réduction de la réactivité du sorbant après 20 à 30 cycles, due au frittage du sorbant pendant la calcination [4].

II.2.5 . Absorption membranaire :

La méthode d'absorption membranaire peut être employée pour la capture post-combustion, permettant ainsi la capture du CO₂ et de l'oxygène résiduel. Les membranes peuvent être classées en deux catégories : les membranes organiques, qui ne sont pas adaptées aux applications à haute température, et les membranes inorganiques, qui conviennent aux environnements à températures élevées.

Pendant le processus d'absorption gazeuse, les membranes agissent en tant qu'interfaces entre le flux gazeux et le solvant liquide. Comparées à d'autres dispositifs d'interaction comme les colonnes de garnissage, les membranes sont plus compactes et moins sujettes à des problèmes opérationnels (tels que le "flooding" à débits élevés, l'entraînement, la canalisation et la formation de mousse), pouvant entraver le transfert de masse de CO₂ entre les phases gazeuse et liquide. Pour que le transport de CO₂ à travers la membrane se produise, la pression des deux côtés, liquide et gaz, doit être équilibré.

L'efficacité de la séparation dépend de la pression partielle du CO₂, ce qui rend cette méthode particulièrement adaptée aux applications concernant les gaz de combustion issus des processus d'oxycombustion, où la concentration de CO₂ peut dépasser 20 % en volume. En raison des défis rencontrés lors de la séparation membranaire du CO₂, un compromis doit être atteint entre la récupération du CO₂ et la pureté du produit final [14].

II.2.6 . Captage du carbone cryogénique :

La séparation du dioxyde de carbone du gaz peut se faire en refroidissant le gaz pour le transformer en liquide ou en solide. La méthode de capture cryogénique du CO₂ permet cette séparation en le condensant hors du flux gazeux. Cette technologie est très prometteuse et révolutionnaire, spécialement adaptée au traitement des fumées avec une forte concentration en CO₂ (>16% en moles). L'efficacité de ce processus de capture dépend de la température la plus basse atteinte par les gaz de combustion à 1 bar et - 117°C, ce qui permet de capturer jusqu'à 90% du CO₂ émis.

Bien que cette méthode produise un flux de CO₂ liquide qui nécessite moins de ressources pour la compression, les coûts élevés de réfrigération pourraient augmenter le coût global du processus de capture. Parmi les avantages de la capture cryogénique, on compte la possibilité de récupérer l'eau des gaz de combustion, de traiter les impuretés présentes dans le flux gazeux et de permettre le stockage de l'énergie [14].

II.3. Le captage en oxy-combustion :

L'oxy-combustion brûle le combustible avec de l'oxygène qui a été préalablement séparé de l'azote de l'air. Cela peut augmenter la concentration de CO_2 dans les gaz d'échappement de 90 à 95 %.

Cela permet d'augmenter la concentration de CO_2 dans les gaz d'échappement de 90 à 95%, et donc d'accroître l'efficacité du captage. L'inconvénient est que la séparation de l'oxygène de l'azote est coûteuse et difficile à réaliser, principalement par ce qu'il s'agit d'un procédé cryogénique [25].

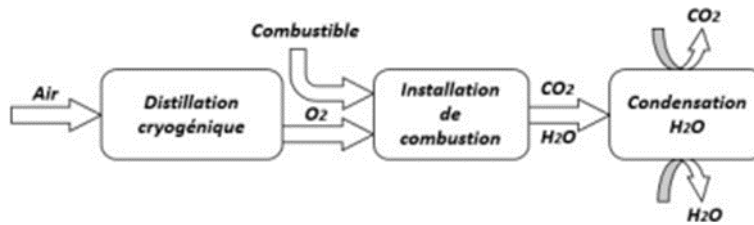


Figure II.9 : Technique de captage par oxy-combustion

II.4. Le captage pré-combustion

La pré-combustion consiste à convertir le combustible en gaz de synthèse, un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H_2), à l'entrée de l'usine. Le CO_2 du mélange réagit avec l'eau au cours de la phase de conversion pour former du CO et de l'hydrogène, le CO_2 est séparé de l'hydrogène par absorption dans un solvant chimique, selon le même processus que celui utilisé pour la combustion, et l'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'énergie (électricité et/ou chaleur) sans émissions supplémentaires de CO_2 . Le CO_2 peut être utilisé pour produire de l'énergie (électricité et/ou chaleur) sans émissions de CO_2 supplémentaires.

Cette technologie est actuellement en phase de recherche et ne sera donc utilisée que dans de nouvelles installations [25].

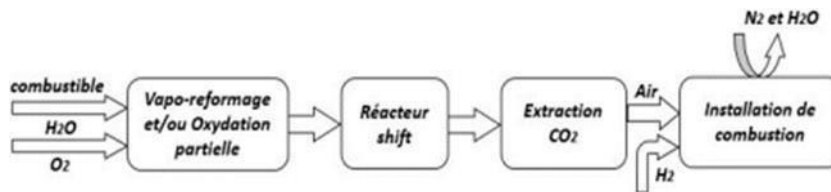


Figure II.10 : Technique de captage par pré-combustion

Les Références bibliographiques

- [1] : J. Lecomte et al., "Agir sur les causes des changements globaux," Enjeux de la transition écologique, pp. 303-352, 2021.
- [2] : N. Dissem, "Conception de nouveaux polymères de coordination microporeux à base de mix de ligands et études de leurs propriétés et applications," Université du Québec à Trois- Rivières, 2022.
- [3] : E. E. DECARBONES, "SYSTEMES ENERGETIQUES EFFICACES ET DECARBONES."
- [4] : T. Evans and E. Grynja, "Carbon Capture–Purpose and Technologies," Gas Liquid Engineering, 2020.
- [5] : A. Yokozeki, M. B. Shiflett, C. P. Junk, L. M. Grieco, and T. Foo, "Physical and chemical absorptions of carbon dioxide in room-temperature ionic liquids," The Journal ofPhysical Chemistry B, vol. 112, no. 51, pp. 16654-16663, 2008.
- [6] : W. K. Wang, "Experimental results and computer simulations for post-combustion carbon dioxide removal using limestone," The Ohio State University, 2009.
- [7] : M. A. Sayed, R. K. Saini, E. AlAli, R. Kalgaonkar, and A. Arnous, "Safer dual- functional gas hydrate dissolver and inhibitor to replace methanol," Energy & Fuels, vol. 35,no. 17, pp. 13731-13742, 2021.
- [8] : M. Gatti, E. Martelli, F. Marechal, and S. Consonni, "Review, modeling, Heat Integration, and improved schemes of Rectisol®-based processes for CO₂ capture," AppliedThermal Engineering, vol. 70, no. 2, pp. 1123-1140, 2014.
- [9] : B. Burr and L. Lyddon, "A comparison of physical solvents for acid gas removal," in Gas Processors' Association Convention, Grapevine, TX, 2008.
- [10] : J. Abdulsalam, J. Mulopo, M. K. Amosa, S. Bada, R. Falcon, and B. O. Oboirien, "Towards a cleaner natural gas production: recent developments on purification technologies," Separation Science and Technology, vol. 54, no. 15, pp. 2461-2497, 2019.
- [11] : D. Bengio, "Comportement électrochimique des lanthanides dans des liquides ioniquesà température ambiante," Université Montpellier, 2018.
- [12] : S. Babamohammadi, A. Shamiri, and M. K. Aroua, "A review of CO₂ capture by absorption in ionic liquid-based solvents," Reviews in Chemical Engineering, vol. 31, no. 4,pp. 383-412, 2015.
- [13] : A. Wolsky, E. Daniels, and B. Jody, "CO₂ capture from the flue gas of conventionalfossil-fuel-fired power plants," Environmental Progress, vol. 13, no. 3, pp. 214-219, 1994.
- [14] : O. Otitoju, "Modelling, Simulation and Performance Evaluation of Post-Combustion Carbon Capture based on Chemical Absorption," University of Sheffield, 2022.
- [15] : N. Ramachandran, A. Aboudheir, R. Idem, and P. Tontiwachwuthikul, "Kinetics of the absorption of CO₂ into mixed aqueous loaded solutions of monoethanolamine and methyldiethanolamine," Industrial & engineering chemistry research, vol. 45, no. 8, pp. 2608- 2616, 2006.
- [16] : S. A. Freeman, R. Dugas, D. H. Van Wagener, T. Nguyen, and G. T. Rochelle, "Carbon dioxide capture with concentrated, aqueous piperazine,"

- International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 4, no. 2, pp. 119-124, 2010.
- [17] : V. Darde, B. Maribo-Mogensen, W. J. van Well, E. H. Stenby, and K. Thomsen, "Process simulation of CO₂ capture with aqueous ammonia using the Extended UNIQUAC model," International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 10, pp. 74- 87, 2012.
- [18] : X. Zhou, F. Liu, B. Lv, Z. Zhou, and G. Jing, "Evaluation of the novel biphasic solvents for CO₂ capture: Performance and mechanism," International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 60, pp. 120-128, 2017.
- [19] : Z. H. Liang et al., "Recent progress and new developments in post-combustion carbon- capture technology with amine based solvents," International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 40, pp. 26-54, 2015.
- [20] : B. H. Jo, D. G. Kang, C. S. Kim, Y. S. Choi, and H. J. Cha, "Biomineralization- based conversion of carbon dioxide to calcium carbonate using recombinant carbonic anhydrase," Chemosphere, vol. 87, no. 10, pp. 1091-1096, 2012.
- [21] : R. M. Firdaus, A. Desforges, A. R. Mohamed, and B. Vigolo, "Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study," Journal of Cleaner Production, vol. 328, p. 129553, 2021.
- [22] : A. Wiheeb, Z. Helwani, J. Kim, and M. Othman, "Pressure swing adsorption technologies for carbon dioxide capture," Separation & Purification Reviews, vol. 45, no. 2, pp. 108-121, 2016.
- [23] : M. Ghodhbene, "Matériaux hydrophiles pour l'adsorption préférentielle de l'eau à hautes températures," Université Laval, 2018.
- [24] : F. Abbas, F. Bouhamou, and L. Ouazine, "Modélisation de la capacité d'adsorption des colorants par la méthode du plan d'expériences," universite Ahmed Draia-ADRAR, 2021.
- [25] : Mémoire de Master en génie chimique intitulé « ESTIMATION DES EMISSIONS DU CO₂ AU NIVEAU DU COMPLEXE GL2/Z ET LES DIFFERENTS PROCEDES DE CAPTAGE »

Chapitre III

Partie simulation

III.1. Introduction

Aspen HYSYS est un outil précieux pour la modélisation des processus dans les industries du pétrole, du gaz, du raffinage et bien d'autres. Il se distingue par une interface utilisateur intuitive et une flexibilité dans la conception et l'exploitation des processus, y compris la modélisation des processus de distillation. Il offre une intégration fluide et une livraison rapide des modèles et des analyses [1].

III.2. Logiciel Aspen HYSYS :

III.2.1. Présentation du logiciel de simulation HYSYS :

Aspen HYSYS est un programme informatique qui simule les processus chimiques. Utiliser un ordinateur pour une simulation de processus prend une fraction du temps nécessaire pour le faire manuellement. La vitesse d'une simulation informatique permet à l'utilisateur d'observer rapidement l'effet des changements dans une simulation. Par exemple, en utilisant HYSYS, vous pouvez facilement comparer la quantité de produit produite en utilisant différents ratios de matières premières. Faire cette comparaison avec des calculs manuels serait une tâche longue, fastidieuse et sujette aux erreurs de calcul humaine [1].

III.2.2. L'utilisation de logiciel HYSYS :

- * Engineering.
- * Établissement des bilans matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- * Dimensionnement des équipements.
- * Réajustement des paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de composition -de l'alimentation.
- * Détermination des performances des équipements.
- * Optimisation des unités de traitements [2].

III.2.3. Présentation des Procédures de simulation par HYSYS :

La simulation est définie comme une imitation du fonctionnement d'un processus ou d'un système dans le monde réel au fil du temps. Une définition plus détaillée de la simulation du processus est donnée comme étant un processus de conception d'un modèle opérationnel pour un système donné et la réalisation d'expériences sur ce modèle dans le but de comprendre le comportement du système ou d'évaluer les stratégies alternatives pour le développement ou le fonctionnement du système. Elle doit être capable de

Reproduire certains aspects sélectionnés du comportement du système à un niveau acceptable de précision [3].

Les simulateurs de procédés utilisés dans l'industrie peuvent être considérés comme des modèles de connaissances. Ils reposent sur la résolution des bilans de masse et d'énergie, ainsi que sur les équations de l'équilibre thermique, et peuvent fournir les informations de base pour la conception. Ils sont principalement utilisés pour concevoir de nouveaux procédés (conception d'appareils, analyse des performances pour différentes conditions, optimisation) et pour améliorer les procédés existants et évaluer les changements apportés aux conditions de fonctionnement. Avant de parler des modèles de processus de transformation des matières, il faut des modèles pour prédire les propriétés physiques de la matière. C'est pourquoi ces simulateurs disposent tous d'une base de données thermodynamiques contenant les propriétés des substances pures (masse molaire, température d'ébullition sous pression normale, paramètres des lois de la pression de vapeur). Cette base de données est enrichie par la construction de modèles thermodynamiques permettant d'estimer les propriétés des mélanges [4].

III.3. Partie données et simulation :

III.3.1. Les étapes de simulation :

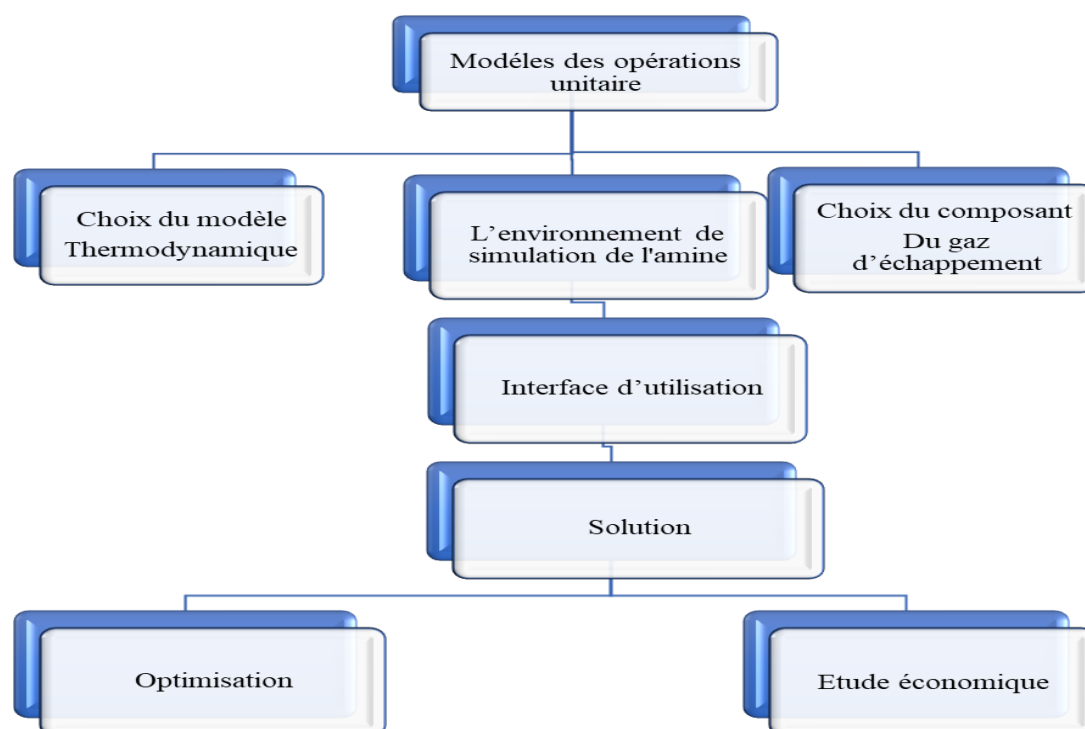


Figure III.1 : Schéma des étapes de simulation.

III.3.2. Le choix du modèle thermodynamique :

Les logiciels de simulation offrent un accès à une gamme de modèles thermodynamiques pour prédire l'équilibre liquide-vapeur, l'enthalpie, l'entropie et les propriétés de transport. Le succès de la simulation dépend largement du choix du modèle thermodynamique, car il est développé pour une catégorie spécifique de liquides et un intervalle de pression et de température recommandé [5].

En ce qui concerne les opérations de traitement de gaz, l'équation d'état d'ACID GAS CHIMICAL SOLVANT est généralement le modèle recommandé.

Le modèle recommandé. Cette équation contient les données nécessaires pour modéliser les processus d'absorption et de désorption des gaz acides.

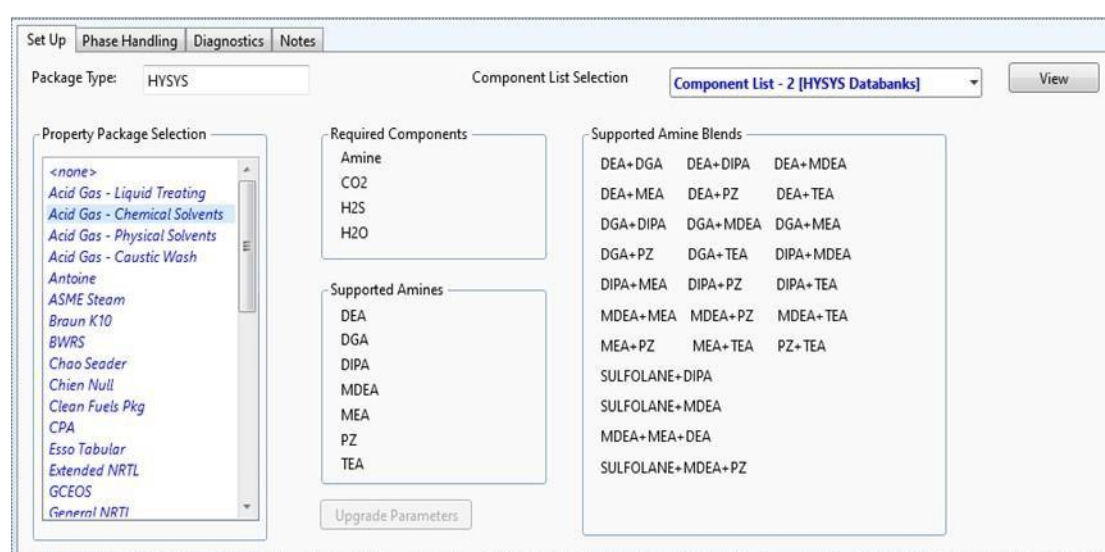


Figure III.2 : Le choix de model thermodynamique

III.3.3. Le choix du la composition du gaz d'échappement :

Le simulateur Aspen HYSYS fonctionne avec des données réelles, nous permettant ainsi d'enregistrer toutes les informations (pression, température, etc.) et autres paramètres.

Tableau III.1 : Constituants du Gaz d'échappement

Constituants	Fraction molaire
H ₂ O	0.15
CO ₂	0.1
N ₂	0.7
O ₂	0.05
TOTAL	1

Component	Mole Fractions	Vapour Phase
H2O	0.1500	0.1500
CO2	0.1000	0.1000
Nitrogen	0.7000	0.7000
Oxygen	0.0500	0.0500
MDEAmine	0.0000	0.0000
H2S	0.0000	0.0000

Total: 1.00000

Figure III.3 : Constituants du Gaz d'échappement.

III.3.4. Les conditions d'opérateurs :

Les conditions opératoires des gaz d'échappement sont utilisées dans la simulation par le logiciel HYSYS.

Tableau III.2 : Les conditions opératoires.

CONDITIONS	Gaz d'échappement	MDEA
Température (°C)	49	35
Pression (bar)	1.15	1
Débit (kg/h)	310	2500
fraction molaire de CO ₂	0.0001	0.9999

Absorbeur :

C'est l'appareil sur lequel nous comptons dans la simulation du processus de capture du carbone, où les gaz acides sont dirigés vers le bas de la colonne d'absorption où ils sont capturés par une solution de MDEA qui entre par le haut de la colonne, à travers 50 plateaux à clapets.

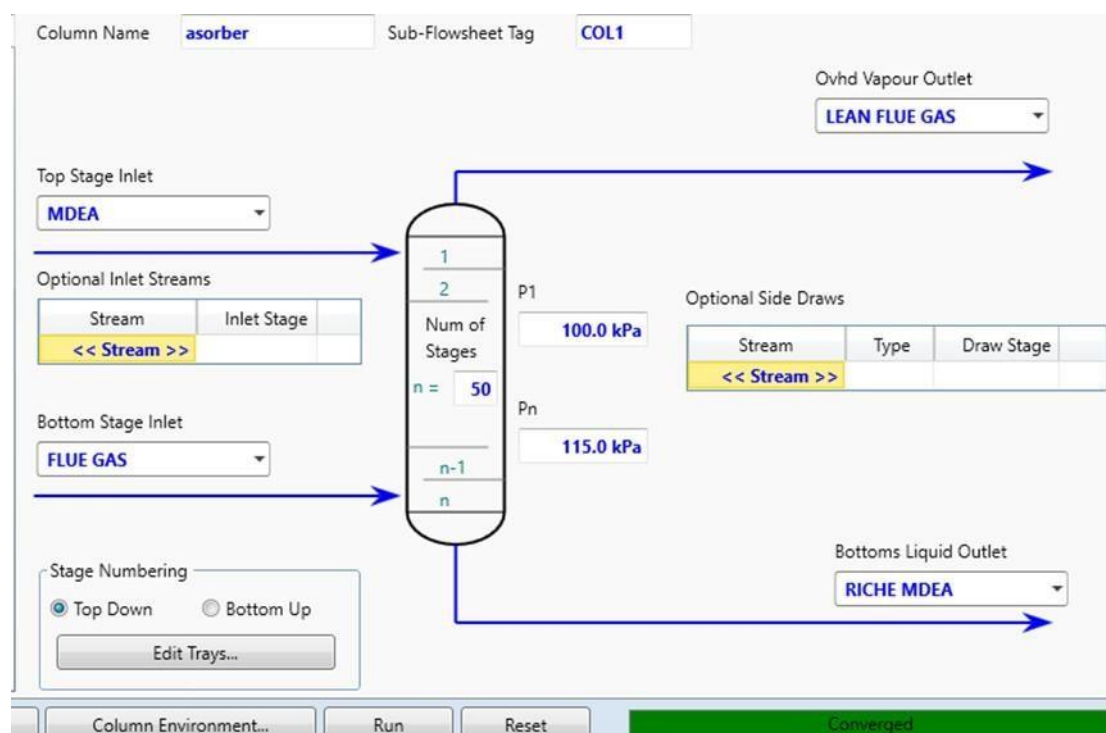


Figure III.4 : Les paramètres de l'absorbeur

III.3.5. La Configuration du processus de capture du carbone :

La simulation du processus commence par la représentation de la capture Les gaz d'échappement, en prenant en compte la température du gaz, la pression et le débit, où HYSYS calcule les paramètres restants. Dans cette partie, nous avons mis en lumière comment simuler les processus de capture du carbone, les fondamentaux du fonctionnement des logiciels de simulation de processus et leur contribution dans le secteur de l'ingénierie, en fournissant également un aperçu succinct de la manière dont HYSYS opère dans l'exécution de ces processus.

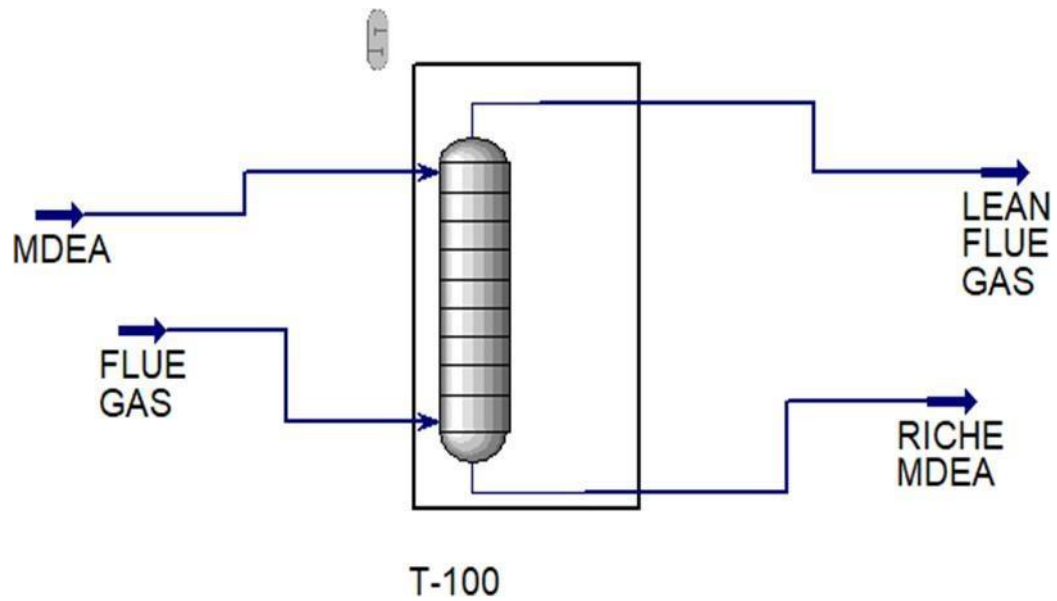


Figure III.5 : La Configuration du processus de capture du carbone

T-100 : colonne d'absorption (absorbeur)

MDEA : Amine pauvre

FLUE GAS : gaz d'échappement riche en CO₂

LEAN FLUE GAS : gaz traité pauvre en CO₂

RICHE MDEA : Amine riche

Les Références bibliographiques

- [1] : F. Berdouzi, "Simulation dynamique de dérives de procédés chimiques : application à l'analyse quantitative des risques," Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2017.
- [2] : H. Fauduet, "Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique," Aspects théoriques et pratiques", Paris, 1997.
- [3] : J.-C. Lebahar, Le dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude. Editions Parenthèses, 1983.
- [4] : A. DJEBBARI, "SIMULATION D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION DE MÉTHANOL A L'AIDE DE L'ASPEN PLUS-HYSYS," 1983.
- [5] : T. E.-A. KAHLAOUI and L. HOUAMEL, "Simulation et Dimensionnement D'une Nouvelle Colonne dépropaniseur de l'unité GPL au niveau du Complexe industriel Z-CINA Hassi Messaoud," UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA.

Chapitre IV
DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. Introduction :

Cette partie du travail implique la présentation des résultats obtenus grâce à la modélisation du traitement des gaz d'échappement par le solvant chimique MDEA à différentes pressions et températures.

IV.2. Les variations de température VS variations de pression :

IV.2.1. Les variations de température :

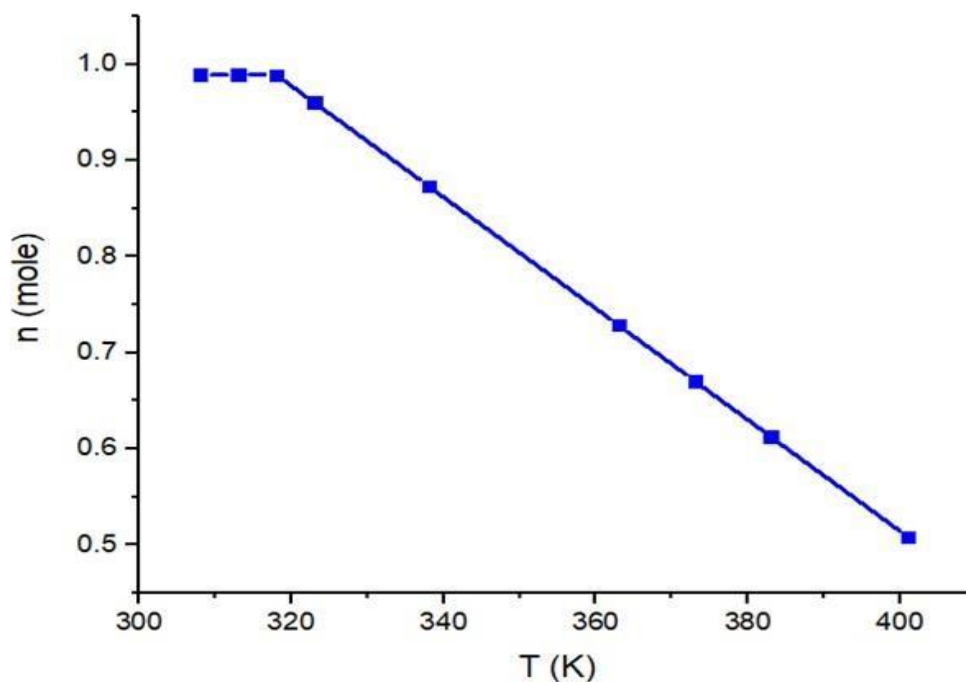


Figure IV.1 : La teneur en dioxyde de carbone dans l'amine MDEA en fonction des variations de température

La **Figure IV.1** représente la variation de la fraction molaire de dioxyde de carbone dans l'amine MDEA après traitement, basée sur différentes températures. Nous observons que la fraction molaire reste stable à la valeur optimale à basse température (de 35 à 45 °C), puis commence à diminuer progressivement avec l'augmentation de la température. Cela indique que les données expérimentales montrent comment l'efficacité de l'absorption du dioxyde de carbone est affectée par les changements de température durant le processus de traitement avec MDEA. Il est généralement observé qu'avec l'augmentation de la température, l'efficacité de l'absorption du dioxyde de carbone peut diminuer en raison des effets thermiques sur les réactions chimiques et physiques entre le gaz et le solvant.

IV.2.2. Les variations de pression :

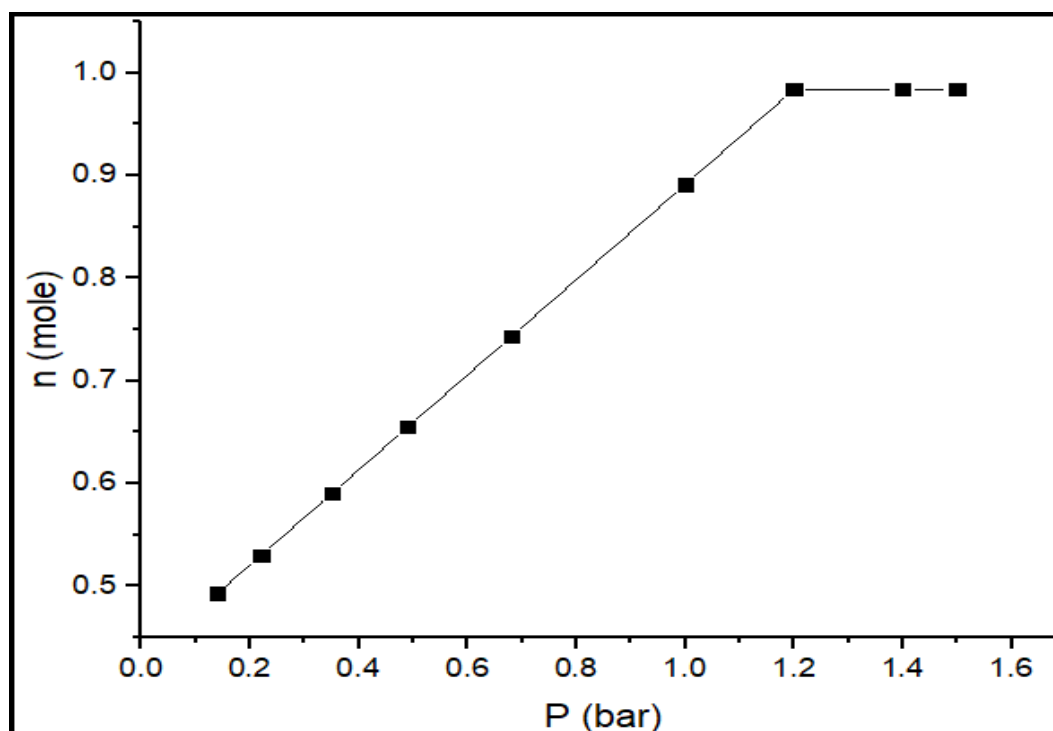


Figure IV.2 : La teneur en dioxyde de carbone dans l'amine MDEA en fonction des Variations de pression

La **Figure IV.2** représente La variation de la fraction molaire de dioxyde de carbone dans l'amine MDEA après traitement est observée en fonction de différentes valeurs de pression. Nous constatons que la fraction molaire augmente progressivement avec l'augmentation de la pression jusqu'à atteindre et se stabiliser à la valeur optimale aux pressions (1.2, 1.4 et 1.5.) Avec l'augmentation de la pression, la solubilité des gaz tels que le CO_2 dans les solvants liquides augmente généralement en raison de l'intensification des interactions entre les molécules de gaz et le solvant, un principe guidé par la loi de Henry, qui stipule que la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression. Ainsi, il est attendu que la fraction molaire de CO_2 dissous dans le MDEA augmente avec l'augmentation de la pression.

La conclusion : À partir des résultats obtenus et des courbes précédentes, nous avons trouvé que les meilleures conditions permettant d'atteindre la valeur idéale de la proportion de dioxyde de carbone sont les suivantes :

- * la température de (35 à 45 °C)
- * la pression de (1.2 à 1.5 bars)

IV.3. Isotherme d'adsorption :

Ce concept est connu sous le nom d'adsorption, c'est une représentation mathématique qui décrit comment les molécules sont absorbées sur la surface d'un matériau adsorbant à température constante. Ce concept est important en chimie physique et en génie des procédés car il aide à comprendre comment les matériaux interagissent entre eux dans différentes situations [1] .

IV.3.1. Les types d'isothermes d'adsorption :

Sont classifiés selon différents modèles qui décrivent la manière dont les molécules sont adsorbées sur les surfaces. Voici les principaux types d'isothermes d'adsorption :

IV.3.1.1. L'isotherme de Langmuir :

L'isotherme de Langmuir illustre comment une substance est adsorbée sur une surface solide. Ce modèle définit la relation entre la concentration de l'adsorbat dans la solution et son recouvrement sur la surface de l'adsorbant. Le modèle propose l'existence d'un nombre limité de sites sur la surface avec des caractéristiques identiques, où les molécules peuvent se lier ou être libérées.

Ce modèle d'adsorption a été développé par Irving Langmuir, un chimiste, physicien, ingénieur américain et lauréat du prix Nobel de chimie.

L'équation de l'isotherme de Langmuir définit des paramètres importants tels que la capacité maximale de couverture (capacité de monocouche) et la force de liaison (constante d'adsorption). Ces paramètres sont cruciaux pour comprendre comment différentes substances interagissent avec les surfaces solides [2].

$$q_e = \frac{K \times C_e}{1 + K \times C_e}$$

q_e : est la couverture fractionnaire d'équilibre des sites d'adsorption,

K : est la constante d'adsorption,

C_e : est la concentration de l'adsorbat dans la solution à l'équilibre.

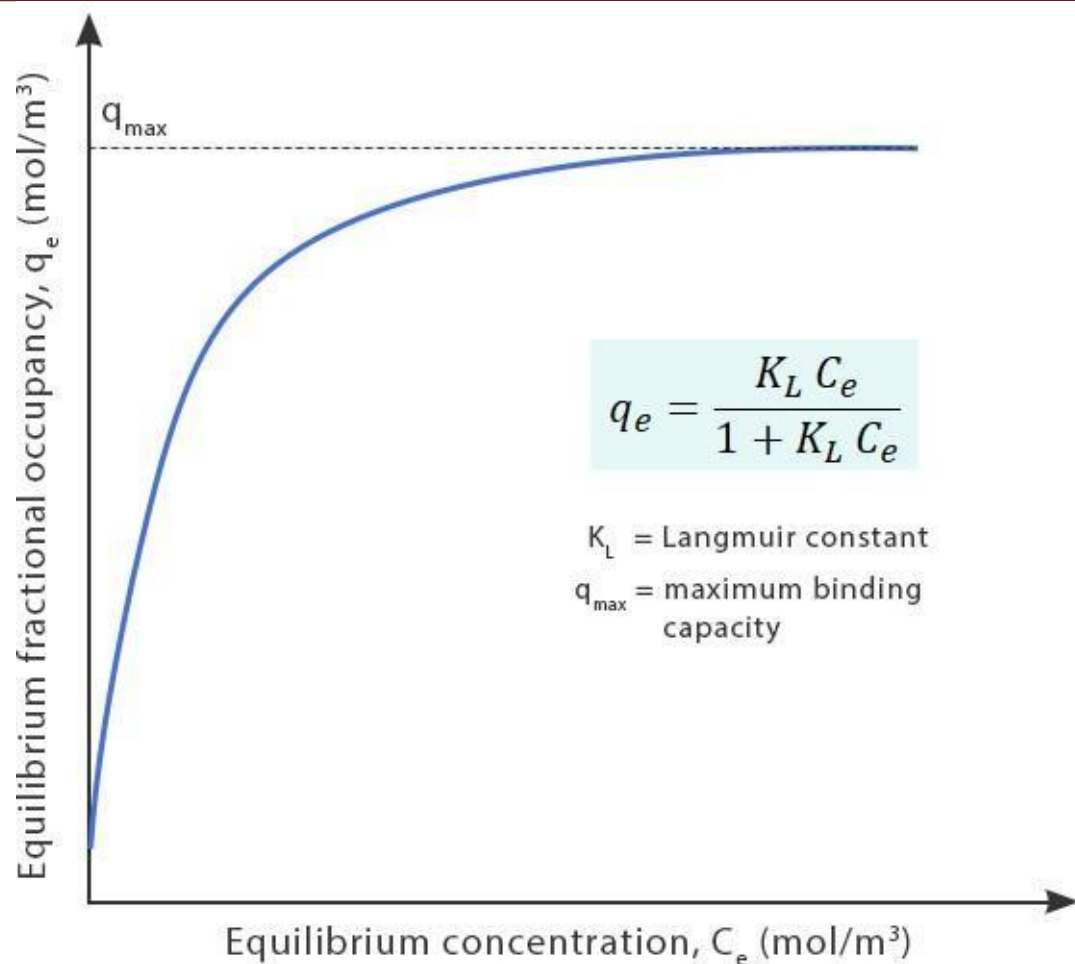


Figure IV.4 : L'isotherme de Langmuir

IV.3.1.2. L'isotherme de Freundlich :

L'isotherme de Freundlich est un modèle qui illustre la relation entre la concentration d'une substance dissoute dans une solution et son accumulation sur une surface solide. Il est largement utilisé dans les domaines de la chimie et des sciences de l'environnement pour comprendre les mécanismes d'adsorption. Ce modèle repose sur une équation empirique qui révèle la nature de l'interaction des solutés avec les surfaces solides.

Le modèle porte le nom du chimiste allemand Herbert Freundlich, qui l'a formulé en 1909 [3].

L'équation de l'isotherme de Freundlich est exprimée comme suit :

$$q_e = K \cdot C_e^{1/n}$$

q_e : Représente la quantité adsorbée par unité de masse de l'adsorbant (capacité d'adsorption).

C_e : Représente la concentration d'équilibre de l'adsorbat dans la solution.

K_f : Est une constante liée à la capacité d'adsorption, connue sous le nom de coefficient de Freundlich.

n : Est une autre constante associée à l'intensité de l'adsorption, connue sous le nom de constante de Freundlich.

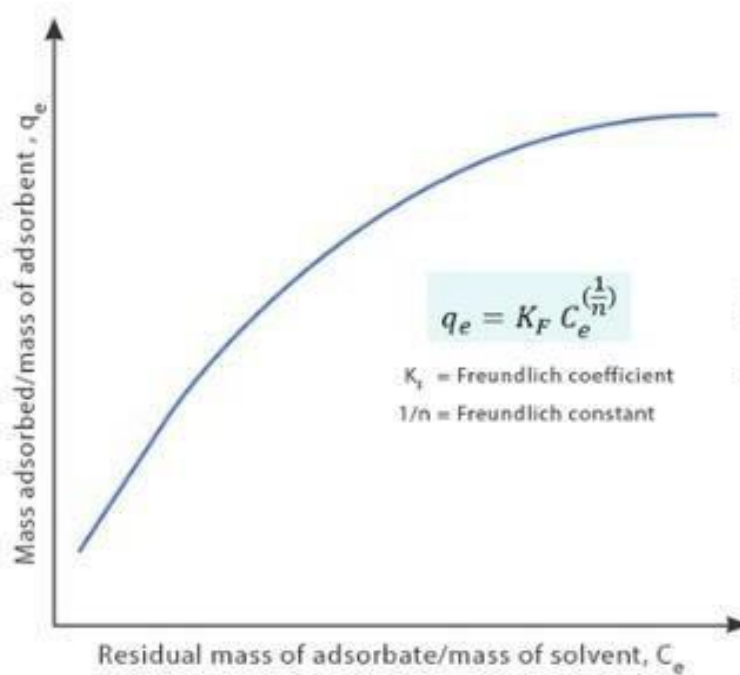


Figure IV.4 : L'isotherme de Freundlich

- Basé sur le concept d'isotherme d'adsorption et les informations précédentes, nous avons conclu que les courbes suivantes appartiennent au type d'isotherme de Langmuir, qui est utilisé pour décrire les interactions qui se produisent pendant le processus d'adsorption ou l'adsorption partielle. Il explique également simplement la formation d'une seule couche de l'adsorbat sur une surface donnée.

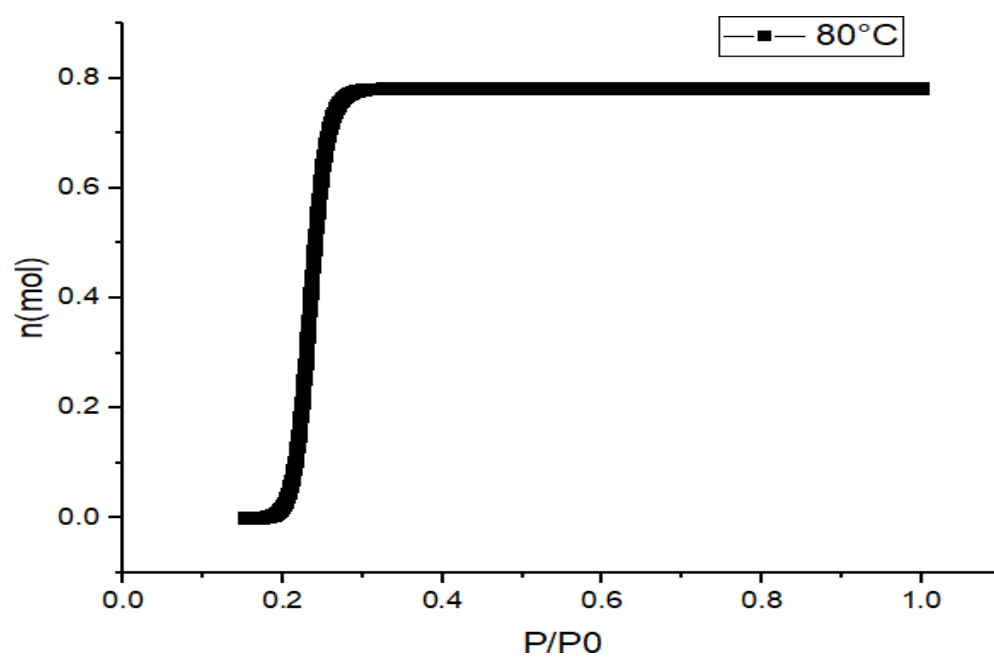


Figure IV.5 : L'isotherme de Langmuir à 80°C

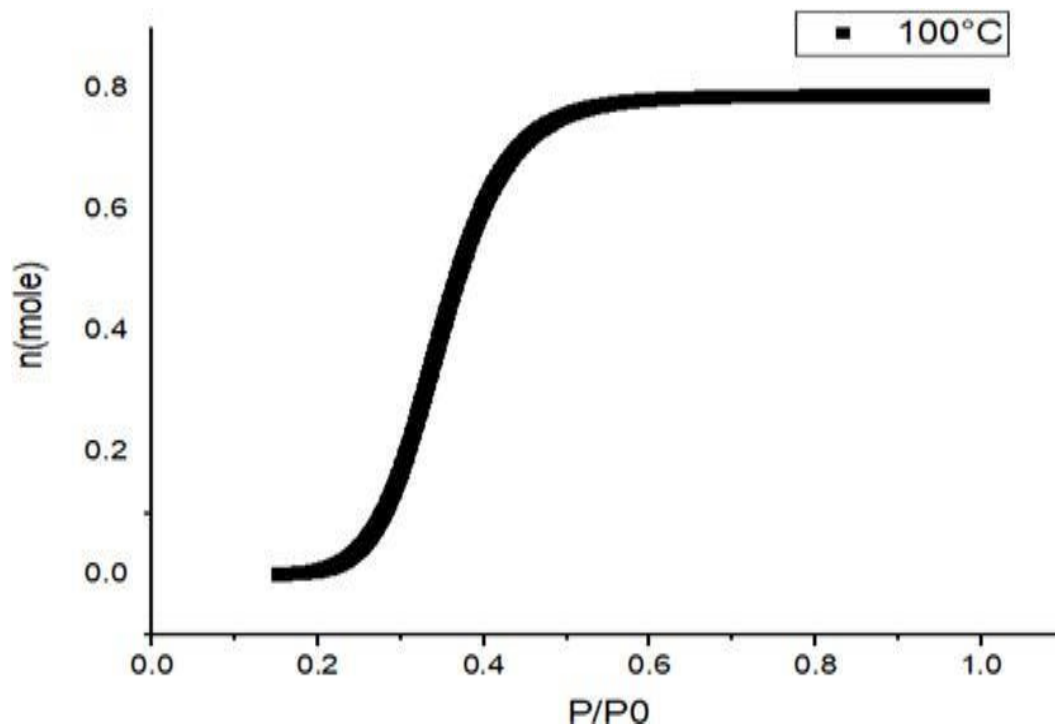


Figure IV.6 : L'isotherme de Langmuir à 100°C

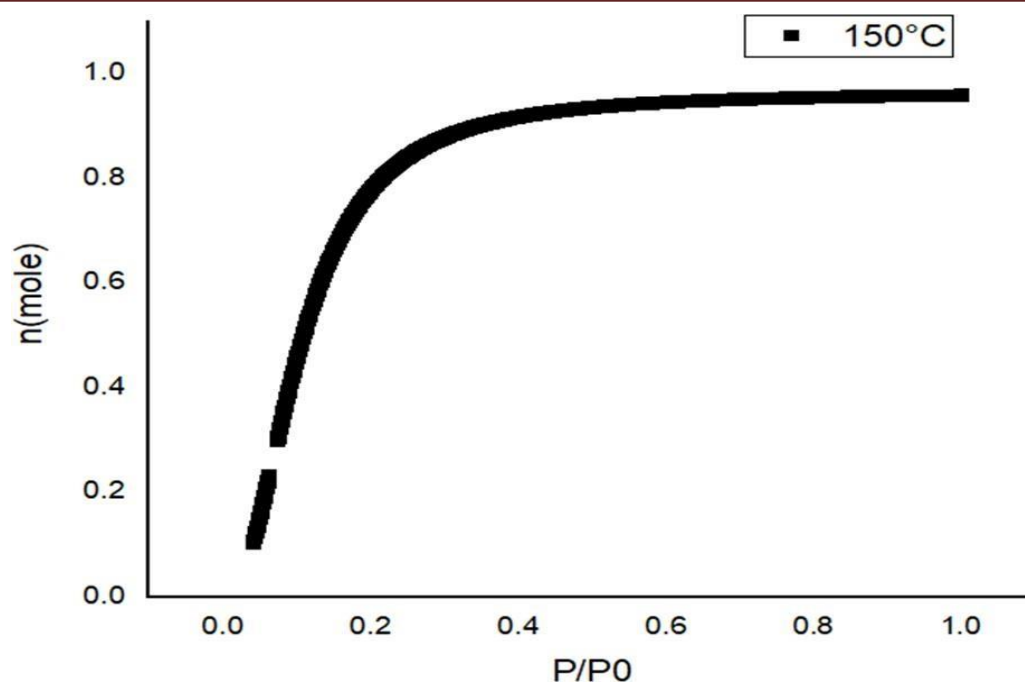


Figure IV.7 : L'isotherme de Langmuir à 150°C

Les Références bibliographiques

- [1] : Y. ACHOUR, "élimination des polluants chimiques en milieu aqueux par utilisation d'un nouvel adsorbant : bombax buonopozense," 2019.
- [2] : H. ABIKEUR and S. BADJEBBAR, "Elimination des nitrates présentes dans l'eau par adsorption sur charbon à base de l'écorce de jujubier."
- [3] : H. M. YACINE, "Etude de capacité d'adsorption d'un déchet végétal."

CONCLUSION GENERALE

La recherche présentée dans ce mémoire constitue une contribution significative aux études dédiées à la simulation de l'élimination de dioxyde de carbone présent dans les gaz de combustion, un processus qui pose de nombreux problèmes environnementaux. Cette étude met en évidence l'utilité de la simulation pour faciliter les recherches expérimentales dans les domaines du raffinage et de la pétrochimie.

L'objectif initial était d'analyser le processus d'absorption chimique de carbone en utilisant l'amine MDEA pour maximiser la capture de CO₂ postcombustion grâce au logiciel de simulation Aspen HYSYS.

Les résultats ont démontré que les conditions optimales pour capturer la plus grande quantité de carbone se situent entre une température de 35 à 45 degrés Celsius et une pression de 1.2 à 1.5 bars.

Les résultats indiquent également que la fraction molaire de CO₂ est directement proportionnelle à la pression et inversement proportionnelle à la température.

Cette analyse souligne la relation complexe entre la pression et la température dans le processus d'absorption chimique et comment les conditions peuvent être optimisées pour améliorer l'efficacité de la capture de CO₂.

La problématique des émissions de dioxyde de carbone des centrales électriques constitue un défi majeur qui doit être pris au sérieux. La technologie de capture et de stockage du carbone semble être une solution prometteuse, mais elle présente des défis liés à des coûts élevés.

L'idée principale derrière cette technologie est d'utiliser des solvants pour absorber le dioxyde de carbone après la combustion, ce qui aide à empêcher son rejet dans l'atmosphère. Cependant, cette approche nécessite une infrastructure spécifique pour extraire et stocker le dioxyde de carbone en toute sécurité, ce qui demande d'importants investissements financiers et énergétiques.

Il est crucial de mener des études plus détaillées pour évaluer l'efficacité de cette solution et déterminer si elle peut être appliquée de manière pratique et économique à grande échelle. De plus, il est également nécessaire de rechercher d'autres alternatives qui pourraient être plus efficaces du point de vue économique et environnemental, telles que l'augmentation de la dépendance aux sources d'énergie renouvelables et le développement de techniques de stockage d'énergie plus efficaces.

Dans l'ensemble, les gouvernements et les entreprises doivent prendre des mesures sérieuses pour effectuer une transition vers une énergie propre et durable. L'attention portée aux technologies de capture et de stockage du carbone doit faire partie de cette transition, mais il est également essentiel de trouver un équilibre entre efficacité, coût et impacts environnementaux.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le processus de simulation d'élimination du dioxyde de carbone présent dans les gaz de cheminée, qui entraîne de nombreux problèmes et effets négatifs sur l'environnement. Ce processus est réalisé en utilisant le logiciel ASPEN HYSYS pour une colonne d'absorption à différentes pressions et températures afin d'atteindre la plus grande quantité de dioxyde de carbone capturée en utilisant l'amine MDEA par la méthode d'absorption chimique. Les résultats obtenus ont montré que les valeurs optimales pour capturer le plus grand pourcentage de carbone sont une température (de 35 à 45 °C) et une pression (de 1.2 à 1.5 bar).

Mots clefs CO₂, Carbone capture, absorption chimique, Aspen HYSYS, MDEA.

المخلص

هدف هذا العمل هو دراسة عملية محاكاة إزالة ثاني أكسيد الكربون الموجود في غازات المداخن، التي تسبب العديد من المشاكل والآثار السلبية على البيئة. يتم تنفيذ هذه العملية باستخدام برنامج اسبن هاييسيس لعمود الامتصاص بضغوط ودرجات حرارة مختلفة للوصول إلى أكبر كمية ممكنة من ثاني أكسيد الكربون المحتجز باستخدام الأمين MDEA بطريقة الامتصاص الكيميائي. النتائج المتحصلة أظهرت أن القيم المثلى لاحتجاز أكبر نسبة من الكربون تكون عند درجة حرارة تتراوح بين 35 إلى 45 درجة مئوية وضغط يتراوح بين 1.2 إلى 1.5 بار.

الكلمات المفتاحية ثاني أكسيد الكربون، احتجاز الكربون، الامتصاص الكيميائي، برنامج Aspen HYSYS، الأمين MDEA.

Abstract

The objective of this work is to study the simulation process of removing carbon dioxide present in flue gases, which leads to numerous problems and negative effects on the environment. This process is carried out using the ASPEN HYSYS software for an absorption column at different pressures and temperatures in order to achieve the largest amount of carbon dioxide captured using the MDEA amine through the chemical absorption method. The results obtained showed that the optimal values for capturing the highest percentage of carbon are a temperature (from 35 to 45 °C) and a pressure (from 1.2 to 1.5 Bar).

Keywords CO₂, Carbon capture, chemical absorption, Aspen HYSYS, MDEA.