

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Instalaion Energétique et Turbomachine

Transformation Du CO2 Gaz Brulées EN neige Carbonique

Présenté par :

Doumaz Abdeldjalel

Cherief Abdeldjalil Aymen

Promoteur :

Mr.HACHMI MADJID

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciement



Notre remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr. HACHMI qui nous a apporté une aide précieuse. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il nous a apportés.

Nous voudrions également remercier l'ensemble de l'équipe de la centrale à cycle combiné, qui nous a beaucoup aidés à faire notre travail dans de bonnes conditions.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel.





Dédicace

Je remercie tout d'abord le Bon Dieu de m'avoir donné le courage pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste mémoire :

À ma très chère mère qui m'a toujours soutenu.

Et à mon très cher père aussi.

À ma chère femme

Et à mes sœurs.

À tous mes amis

À toute la famille DOUMAZ.

Abdeldjalel





Dédicace

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste
travail:

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère

A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père.

A Mes chers Frères et Mes souers.

À tous mes amis.

À toute la famille **CHERIEF**

Aymen



Ce mémoire explore la transformation du dioxyde de carbone (CO₂) issu des gaz brûlés en neige carbonique, également connue sous le nom de glace sèche. La réduction des émissions de CO₂ est un enjeu majeur pour atténuer les effets du changement climatique. L'utilisation de la neige carbonique peut offrir une solution intéressante en capturant et en valorisant ce gaz à effet de serre.

This thesis explores the transformation of carbon dioxide (CO₂) from burnt gases into dry ice, also known as dry ice. Reducing CO₂ emissions is a major challenge in mitigating the effects of climate change. The use of dry ice can offer an interesting solution by capturing and recovering this greenhouse gas.

تستكشف هذه الأطروحة تحول ثاني أكسيد الكربون (CO₂) من الغازات المحترقة إلى جليد جاف ، المعروف أيضًا باسم الثلج الجاف. يعد تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أحد التحديات الرئيسية في التخفيف من آثار تغير المناخ. يمكن أن يوفر استخدام الثلج الجاف حلاً مثيراً للاهتمام من خلال التقاط واستعادة غازات الاحتباس الحراري.

SOMMAIRE

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale :	1
Chapitre I : L'effet de serre et sans impact sur l'environnement	
I.1 Introduction.....	3
I.2 l'effet de serre	3
I.2.1 Définition de l'effet de serre.....	3
I.2.2 Mécanisme de l'effet de serre.....	5
I.2.3 Les gaz à effet de serre retiennent la chaleur émise la terre	7
I.3 Les principaux gaz à effet de serre	7
I.4 L'impact de l'activité humaine sur l'effet de serre	8
I.4.1 Les émissions de gaz à effet de serre	8
I.4.1.1 Les principales activités humaines responsables des émissions de gaz à effet de serre	9
I.4.1.2 Les études de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre	10
I.5 Les causes et les conséquences de l'effet de serre sur la planète	11
I.5.1 Les causes	12
I.5.2 Les conséquences	12
I.6 Comment limiter l'effet de serre	14
I.7 Conclusion	14
Chapitre II : Caractéristique Du dioxyde de carbone	
□ Introduction.....	17
II.1 HISTOIRE DE DIOXYDE DE CARBONE CO ₂	17
II.2 DÉFINITION DU DIOXYDE DE CARBONE	18
II.3 CARACTÉRISTIQUE	19
II.3.1 Propriété physique	20
II.3.2 Pression de vapeur saturante : 5 720 kPa (20 °C)	21

II.3.3 Propriété chimique	21
II.4Thermochimie.....	22
II.4.1capacité thermique	23
II.4.2Capacité thermique du CO2 gaz	24
II.4.3Propriétés électroniques et cristallographie.....	25
II.4.4Pression de vapeur saturante	26
II.5Chaleurs latentes de transition d'état	27
II.6UTILISATIONS DU DIOXYDE DE CARBONNE	27
II.6.1Sous forme gazeuse.....	27
II.6.2Sous forme liquide	28
II.6.3Sous forme solide.....	28
II.7Transport du CO2.....	29
II.8 Stokage du CO2	30
Chapitre III : application pratique de bilan de carbone CO2 et formation ou fabrication de glace	
III.1SOURC ES ET IMPACTS.....	31
III.1.1Sources et puits	31
III.2ÉMISSIONS DANS LE MONDE PAR PAYS	32
III.2.1Les sources d'émissions de CO2	33
III.4APPLICATION PRATIQUE DU BILAN CARBONE	34
III.4.1Solutions techniques de traitement	34
III.4.2Enrichissement : capture du CO2 dans les fumées.....	35
III.4.3Les concepts de séparation et captage.....	35
III.4.4La différence entre les méthodes de captage de CO2	36
III.4.4.1Captage du CO2 en post-combustion.....	37
III.4.4.2Captage du CO2 en pre-combustion	39
III.4.4.3Captage du CO2 grâce à l'oxy-combustion	40
III.5Méthode de séparation.....	41
III.5.1Absorption dédiée à la séparation.....	41
III.5.2Séparation membranaire.....	43
III.5.3Séparation cryogénique	45
III.5.4Adsorption solide – gaz.....	45
III.5 Glace carbonique	47
III.6Schéma de la phase du composé CO2	48

III.7	Définition de la glace sèche	49
III.8	Le processus de formation ou de fabrication de glace carbonique	49
III.9	Les Avantages de la glace sèche	50
III.10	Les inconvénients de la glace carbonique	51
Chapitre IV : Etude théorique de la transformation de CO ₂ en glace carbonique		
IV.1	CEPARATION ET CAPTAGE	52
IV.1.1	Principe	52
IV.2	L'ABSORPTION CHIMIQUE	55
IV.2.1	Les solvants chimiques	55
IV.2.1.1	Amine primaire	55
IV.2.1.2	Amine secondaire	56
IV.2.1.3	Amine tertiaire	56
IV.3	Cinétique de la réaction d'absorption	57
IV.3.1	Les réactions chimiques	57
IV.3.2	Procédé de séparation du CO ₂ par absorption chimique	58
IV.4	Bilan de la puissance thermique	60
IV.5	La quantité de dioxyde de carbone (co ₂) capté dans les fumées	61
IV.6	Réservoir CO ₂ en acier au carbone a sous pression	63
IV.7	Les granulateurs de glace carbonique	64
IV.7.1	Avantages d'une production interne de glace carbonique	65
IV.8	CRYOGEINIE DES MACHINES	72
IV.8.1	Matériaux compatibles et /ou incompatibles	72
IV.8.2	IMPACT ENVIRONNEMENTAL	72
IV.8.2.1	SANITAIRE	73
Conclusion générale		74
Références bibliographiques		

Liste des figures

Chapitre I : L'effet de serre et sans impact sur l'environnement

Figure I.1 : Schéma de l'effet de serre	3
Figure I.2: Explication du mécanisme de l'effet de serre	5
Figure I.3: Les gaz à effet de serre	8
Figure I.4 : Activités humaines responsables des émissions de gaz à effet de serre	10
Figure I.5 : Records de concentration de gaz à effet de serre	11

Chapitre II : Caractéristique du dioxyde de carbone

Figure II.1: Molécule du dioxyde de carbone	18
Figure II.2: Courbe de la masse volumique du dioxyde de carbone.....	21
Figure II.3: Courbe de la pression de vapeur saturante du dioxyde de carbone.	21
Figure II.4: Courbe de la capacité thermique du CO ₂	24
Figure II.5: Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique	25
Figure II.6: Structure cristalline de la « glace sèche » : cubique à faces centrées	26
Figure II.7: Granulats de « glace sèche » se sublimant à l'air	28
Figure II.8: Différents formes du dioxyde de carbone solide	29

Chapitre III : Application pratique du bilan de CO₂ et formation ou fabrication de glace

Figure III.1: Émission de CO ₂ (tonne/habitant) en fonction du niveau de développement des pays	33
Figure III.2: Évolution de la concentration en CO ₂ (ppm) dans l'atmosphère au cours d'une longue période, lors de la Révolution industrielle [1800-2007] et prédiction jusqu'en 2100	33
Figure III.3: Diagramme des sources d'émissions de CO ₂	34
Figure III.4: Modes des séparations intégrales aux différents types des centrales	36
Figure III.5: Concept de séparation du CO ₂ en post-combustion.....	39
Figure III.6: Concept de séparation en pré-combustion	40
Figure III.7: Concept de séparation en oxy-combustion	41

Figure III.8: Procédé d'absorption pour la séparation du CO ₂ des effluents	42
Figure III.9: Schéma de principe simplifié d'un procédé membranaire pour la capture de dioxyde de carbone	43
Figure III.10: Schéma d'un contacteur membranaire	44
Figure III.11: Diagramme de phase du dioxyde de carbone	45
Figure III.12: Procédé d'adsorption solide – gaz	47
Figure III.13: Formes de glace carbonique.....	47
Figure III.14: Structure cristalline de glace carbonique	47
Figure III.15: Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique	48

Chapitre IV : Etude théorique de la transformation de CO₂ en glace carbonique

Figure IV.1: Absorption phys -Absorption chimique (Roizard et al. 1997)	54
Figure IV.2: Pression partielle en CO ₂ à l'équilibre pour un solvant physique et un solvant chimique	54
Figure IV.3: Les différents types d'Amines, Avec R1, R2, R3 chaînes carbonées	55
Figure IV.4: Procédé d'absorption chimique (Aroonwilas et Veawab 2007).....	68
Figure IV.5: La charge en MW en fonction de CO ₂ en Kg (par heure).....	61
Figure IV.6: La charge en MW en fonction de CO ₂ en Kg (par jour)	61
Figure IV.7 La charge en MW en fonction de CO ₂ en Kg (par mois	62
Figure IV.8 La charge en MW en fonction de CO ₂ en Kg (par mois	62
Figure IV.9: Stockage horizontal	63
Figure IV.10: Stockage verticale.....	63
Figure IV.11: Images de granulateur de glace carbonique ASCO A30P	64
Figure IV.12: Images des tailles de pellet	66
Figure IV.13: Images de pelletiseur à glace carbonique A55P d'ASCO	67
Figure IV.14: Images de granulateur de glace carbonique ASCO P28	69
Figure IV.15: Images d'écran de le pelletiseur ASCO P28.....	69
Figure IV.16: Images des tailles de pellet	71

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : caractérisation de dioxyde de carbone et revue des travaux	
Tableau II.1: Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone	20
Tableau II.2: Différentes valeurs de la masse volumique du dioxyde de carbone.....	20
Tableau II.3: Différents valeurs de pression du dioxyde de carbone.....	22
Tableau II.4: Différents caractéristique des points des phases du dioxyde de carbone	22
Tableau II.5: Résultats des données de la capacité thermique du CO2 liquide	23
Tableau II.6: Résultats des données de la capacité thermique du CO2 gaz	25
Tableau II.7: Valeurs de la pression de vapeur saturante	27
Tableau II.8: Différentes valeurs de la chaleur latente de transition d'état.....	27
Chapitre III : Application pratique du bilan de CO2 et formatin ou fabrication de glace	
Tableau III.1: Les différences méthodes de captage.....	37
Chapitre IV : Etude théorique de la transformation de CO2 en glace carbonique	
Tableau IV.1: Conditions opératoires d'amines primaires et secondaires (Butwell 1982 ..	60

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
c_p	Capacité thermique du gaz	j.mol⁻¹.K⁻¹
$\alpha_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{am}}$	La quantité de CO2 présent dans le solvant	Kg
	La quantité d'amine présente initialement sous forme moléculaire	Kg
$\Delta_f H_{gaz}^0$	Enthalpie standard de formation	KJ.mol⁻¹
φ_{CO_2}	<i>le flux spécifique moyen d'absorption</i>	Mol.m⁻².s⁻¹
P	La pression	Pascal
Q_{chauf}	<i>La puissance de chauffage</i>	W
Q_r	<i>La puissance de réaction</i>	W
V_{des,CO_2}	<i>la vitesse de désorption du CO2</i>	mol.s⁻¹
Q_{vap}	<i>La puissance de vaporisation</i>	W
φ^0	<i>le flux spécifique moyen d'absorption</i>	W
∂C_{CO_2}	<i>Aire interfaciale gaz-liquide</i>	mol.m⁻².s⁻¹

$C_{CO_2,S}$	<i>la concentration en CO₂ au sein du liquide</i>	
k_L	<i>le coefficient de transfert de matière côté liquide</i>	<i>m.s⁻¹</i>
$P_{CO_2,i}$	<i>la pression partielle en CO₂</i>	<i>Pascal</i>

➤ INTRODUCTION GENERALE

La transformation du dioxyde de carbone (CO₂) des gaz brûlés en neige carbonique est une approche innovante pour lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique. L'effet de serre est un phénomène naturel crucial pour maintenir la vie sur Terre, où certains gaz, dont le CO₂, retiennent la chaleur émise par la surface de la planète. Cependant, les activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles, ont considérablement augmenté les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, entraînant un déséquilibre dans le système climatique.

Le CO₂ est considéré comme un gaz à effet de serre majeur en raison de sa capacité à piéger la chaleur émise par la Terre et à la renvoyer vers sa surface, ce qui entraîne un réchauffement global. Cette augmentation de la température mondiale a des conséquences significatives, telles que la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer, les événements météorologiques extrêmes et la perturbation des écosystèmes.

La transformation du CO₂ des gaz brûlés en neige carbonique offre une solution potentielle pour réduire les émissions de CO₂ et atténuer l'effet de serre. En convertissant le CO₂ en une forme solide et stable, telle que la neige carbonique ou les carbonates, il est possible de le stocker de manière permanente et de le retirer de l'atmosphère. Cette méthode permet de réduire la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, atténuant ainsi l'effet de serre et ses conséquences néfastes.

De plus, la transformation du CO₂ en neige carbonique présente des avantages supplémentaires. Elle utilise des ressources abondantes, telles que des déchets industriels ou des minéraux disponibles dans la nature, ce qui réduit la dépendance aux combustibles fossiles. De plus, elle peut contribuer à la gestion des déchets en valorisant des matériaux qui seraient autrement considérés comme des polluants.

Cependant, il est important de noter que la transformation du CO₂ en neige carbonique n'est pas une solution complète au problème du réchauffement climatique. Elle doit être

INTRODUCTION GENERALE

combinée à d'autres mesures, telles que l'adoption d'énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et la réduction globale des émissions de gaz à effet de serre. De plus, des recherches et des investissements supplémentaires sont nécessaires pour développer cette technologie et la rendre économiquement viable à grande échelle.

CHAPITRE I :
L'EFFET DE SERRE ET
SANS IMPACT SUR
L'ENVIRENNEMENT

I.1 Introduction :

L'effet de serre est un phénomène naturel essentiel à la vie sur Terre. Cependant, l'activité humaine a intensifié cet effet, entraînant des conséquences néfastes sur l'environnement. Dans ce chapitre, nous explorerons l'effet de serre, son fonctionnement et son impact sur notre planète.

I.2 L'effet de serre:

I.2.1 Définition de l'effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel qui se produit dans l'atmosphère de la Terre. Il se réfère à la capacité de certains gaz présents dans l'atmosphère, appelés gaz à effet de serre, à absorber et à retenir une partie du rayonnement thermique émis par la surface terrestre. Cette rétention du rayonnement entraîne le réchauffement de l'atmosphère et de la surface de la Terre, contribuant ainsi à maintenir une température moyenne propice à la vie.

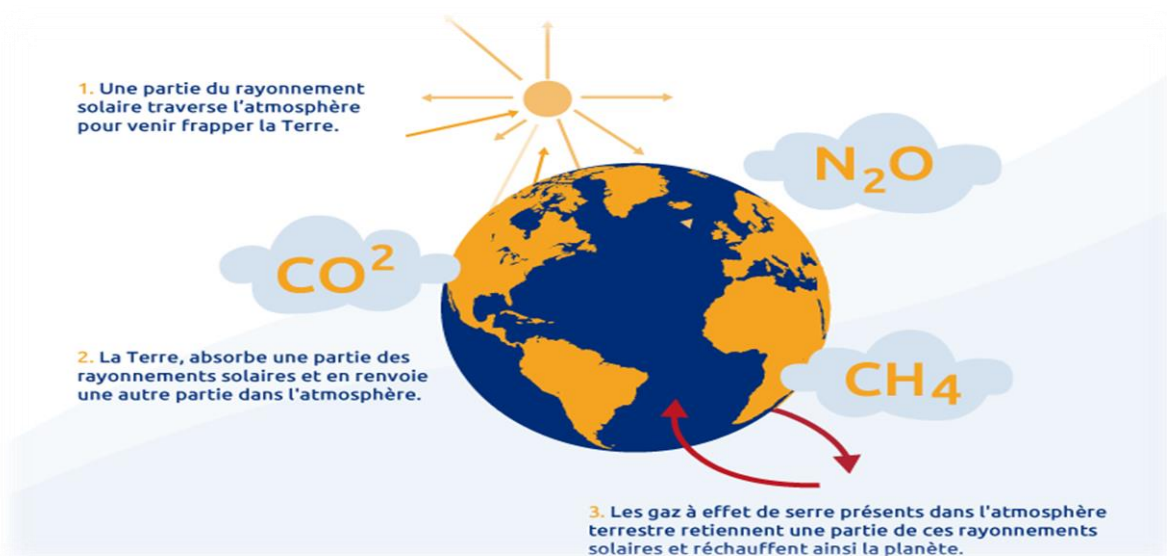


Figure I.1 :Schéma de l'effet de sere

L'effet de serre fonctionne de la manière suivante : lorsque le rayonnement solaire atteint la surface de la Terre, une partie de l'énergie est absorbée et transformée en chaleur. La surface terrestre émet ensuite cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de

CHPITRE I : L'EFFET DE SERRE ET SANS IMPACT SUR L'ENVIRENNMENT

serre, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et la vapeur d'eau, présentent des propriétés qui leur permettent d'absorber une partie de ce rayonnement infrarouge et de le renvoyer vers la surface terrestre.

Cet effet de "piégeage" du rayonnement thermique par les gaz à effet de serre est essentiel pour maintenir une température moyenne relativement stable sur Terre, permettant ainsi la vie telle que nous la connaissons. Sans l'effet de serre, la température moyenne de la Terre serait beaucoup plus basse, rendant notre planète inhospitalière.

Cependant, en raison des activités humaines, notamment la combustion de combustibles fossiles, l'industrialisation et la déforestation, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a augmenté de manière significative depuis l'ère industrielle. Cette augmentation accrue des gaz à effet de serre perturbe l'équilibre naturel de l'effet de serre, entraînant un réchauffement supplémentaire de la planète, connu sous le nom de réchauffement climatique ou changement climatique.

Ainsi, si l'effet de serre est nécessaire à la vie sur Terre, son augmentation excessive due à l'activité humaine a des conséquences environnementales importantes, telles que l'élévation des températures, la fonte des glaciers, les variations des précipitations et les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité. Pour mieux comprendre ce mécanisme, il faut distinguer l'effet de serre "naturel" de l'effet de serre "additionnel".[1]

L'effet de serre naturel

L'atmosphère est une fine enveloppe de gaz qui englobe la terre et protège les êtres vivants sur terre. En effet, non seulement elle les protège des chutes de météorites et des excédents de rayons ultraviolets (grâce à la couche d'ozone), mais elle procure également une température moyenne agréable de 15°C à la surface de la planète grâce aux gaz à effet de serre qu'elle contient. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre naturel.

La terre reçoit beaucoup d'énergie du soleil, sous forme de rayonnement (principalement sous forme de lumière). Une partie de cette énergie va être réfléchi directement dans l'espace par l'atmosphère, les nuages ou encore la surface de la terre (voir illustration ci-dessous). Le reste est absorbé momentanément, avant d'être rejeté sous forme de chaleur (rayons infrarouges). C'est là qu'entrent en action les gaz à effet de serre qui bloquent partiellement les rayons infrarouges et les empêchent de s'échapper immédiatement vers l'espace. En retenant ainsi un peu plus longtemps cette énergie, ils contribuent à augmenter la chaleur moyenne à la surface de la terre. Au final, la Terre renvoie dans l'espace la même quantité d'énergie qu'elle reçoit du soleil, cependant, pas forcément immédiatement. Le mécanisme d'effet de serre naturel est vital : sans lui, la température moyenne sur terre serait similaire à celle de la lune : -18°C.

CHPITRE I : L'EFFET DE SERRE ET SANS IMPACT SUR L'ENVIRENNMENT

Les gaz à effet de serre présents naturellement dans l'atmosphère sont principalement :

- la vapeur d'eau (H₂O) qui se forme par évaporation depuis le sol, les plantes, les rivières, les océans, etc.

L'effet de serre additionnel

Depuis le début de la révolution industrielle, l'homme a émis une grande quantité de différents gaz dans l'atmosphère, principalement en brûlant du charbon, du gaz et du pétrole. Une partie de ces gaz sont des gaz à effet de serre. Leur accumulation dans l'atmosphère produit un effet de serre "additionnel", entraînant une modification du système climatique et une augmentation de la température moyenne sur Terre.

- le gaz carbonique (CO₂) émis par exemple par la respiration humaine et animale, la décomposition d'un corps mort ou lors d'un incendie de forêt.
- le méthane (CH₄) émis principalement par la décomposition dans les zones humides (marais, forêts tropicales, ...) et la digestion des animaux (en particulier les ruminants et les termites).
- le protoxyde d'azote (N₂O) émis par les océans et les sols.[1]

I.2.2 Mécanisme de l'effet de serre :

Le mécanisme de l'effet de serre repose sur l'interaction entre le rayonnement solaire, la surface terrestre et les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. Voici les étapes clés de ce mécanisme :

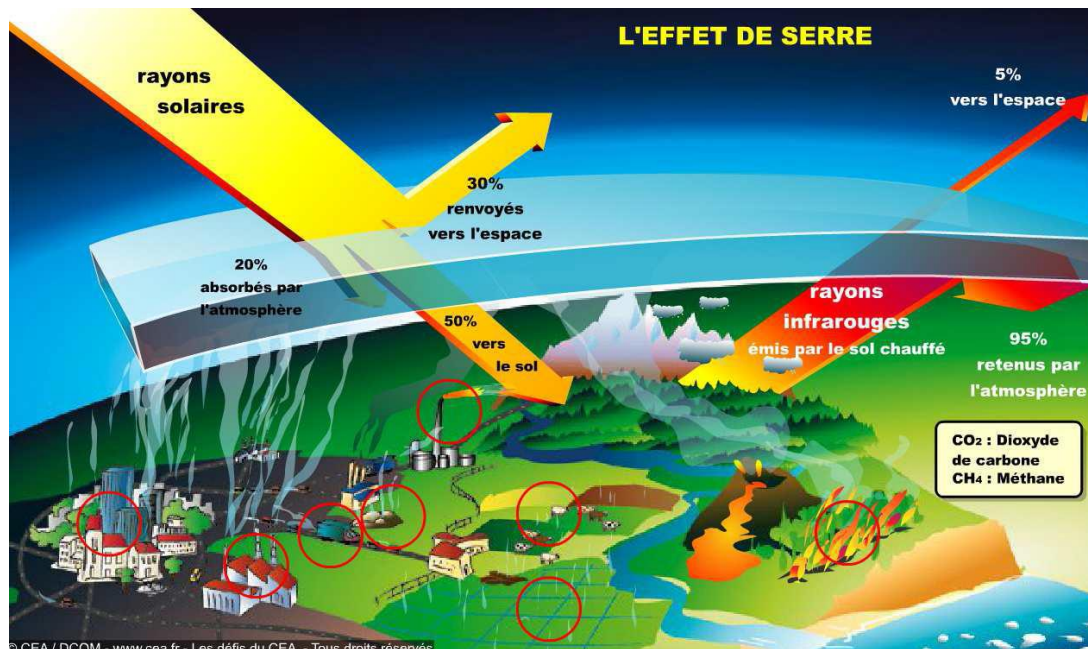


Figure I.2 : Explication du mécanisme de l'effet de serre

1. **Rayonnement solaire** : Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, principalement sous forme de rayons visibles et ultraviolets, qui atteint la surface de la Terre.
2. **Absorption et réflexion** : Une partie du rayonnement solaire est absorbée par la surface terrestre, notamment par les océans, les sols et les végétaux. Cette absorption convertit l'énergie solaire en chaleur. Une autre partie du rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace par la surface terrestre et les nuages.
3. **Rayonnement thermique** : Une fois absorbée, la surface terrestre émet de la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge, également appelé rayonnement thermique.
4. **Gaz à effet de serre** : Certains gaz présents dans l'atmosphère, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et la vapeur d'eau, ont la capacité d'absorber le rayonnement thermique émis par la Terre.
5. **Rétention du rayonnement thermique** : Les gaz à effet de serre absorbent une partie du rayonnement thermique émis par la Terre. Cette absorption se produit car les molécules des gaz à effet de serre ont des liaisons chimiques qui vibrent et tournent lorsqu'elles absorbent l'énergie du rayonnement infrarouge.
6. **Émission de rayonnement** : Après avoir absorbé le rayonnement thermique, les gaz à effet de serre réémettent une partie de cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge dans toutes les directions. Une partie de ce rayonnement est renvoyée vers la surface terrestre, contribuant à réchauffer l'atmosphère.
7. **Équilibre thermique** : L'échange continu de rayonnement entre la surface de la Terre, l'atmosphère et l'espace permet d'établir un équilibre thermique relatif. Cela maintient une température moyenne stable à la surface de la Terre, permettant ainsi la vie telle que nous la connaissons.

Le mécanisme de l'effet de serre implique que certains gaz à effet de serre absorbent une partie du rayonnement thermique émis par la Terre et le renvoient vers la surface terrestre. Ce processus contribue à réchauffer l'atmosphère et maintenir une température moyenne propice à la vie. Cependant, l'activité humaine entraîne une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, perturbant ainsi l'équilibre naturel de l'effet de serre et entraînant un réchauffement supplémentaire de la planète, connu sous le nom de réchauffement climatique.[3]

I.2 .3Les gaz de l'effet de serre :

Les gaz à effet de serre retiennent une partie du rayonnement thermique émis par la Terre. Lorsque la surface terrestre absorbe l'énergie solaire et la convertit en chaleur, cette chaleur est émise sous forme de rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et la vapeur d'eau, ont la propriété d'absorber ce rayonnement thermique.

Les molécules de ces gaz absorbent les longueurs d'onde spécifiques du rayonnement infrarouge, ce qui les fait vibrer et tourner. Cette absorption d'énergie augmente l'agitation moléculaire et, par conséquent, la température de l'atmosphère. En conséquence, une partie du rayonnement thermique émis par la Terre est piégée par les gaz à effet de serre et réémise dans toutes les directions, y compris vers la surface terrestre.

Cette réémission du rayonnement thermique de retour vers la surface terrestre contribue à réchauffer l'atmosphère, créant ainsi l'effet de serre. Cela permet de maintenir une température moyenne relativement stable à la surface de la Terre, favorisant ainsi la vie.

Cependant, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre résultant des activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles et la déforestation, perturbe cet équilibre naturel. Cette augmentation renforce l'effet de serre et entraîne un réchauffement supplémentaire de la planète, ce qui est préoccupant en raison de ses conséquences sur le climat et l'environnement.[2]

Ce mode de production d'électricité utilise les rayonnements lumineux du soleil qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autres matériaux ayant des propriétés de conversion lumière électricité.

I.3Les principaux gaz à effet de serre :

Les principaux gaz à effet de serre responsables de l'effet de serre sont :

- 1) Le dioxyde de carbone (CO₂) :** Il est le gaz à effet de serre le plus abondant et est principalement produit par la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ainsi que par la déforestation et la dégradation des sols.
- 2) Le méthane (CH₄) :** Il est principalement émis par la digestion des ruminants (comme les vaches), la fermentation des déchets organiques dans les décharges, la production et la

distribution de combustibles fossiles, ainsi que par les fuites dans les installations de gaz naturel.

- 3) **Le protoxyde d'azote (N₂O)** : Il est produit par les processus microbiens dans les sols agricoles, les océans, les décharges et les émissions industrielles. Les engrais chimiques et la combustion de biomasse contribuent également aux émissions de N₂O .
- 4) **La vapeur d'eau (H₂O)** : Bien que la vapeur d'eau soit le gaz à effet de serre le plus abondant, ses niveaux sont principalement régulés par les changements de température globale plutôt que par les émissions directes causées par l'activité humaine. La vapeur d'eau agit cependant comme un amplificateur de l'effet de serre dû aux autres gaz à effet de serre.
- 5) **L'ozone (O₃)** : molécule formée de trois atomes d'oxygène (les molécules du gaz oxygène « normal » comportent 2 atomes d'oxygène seulement).

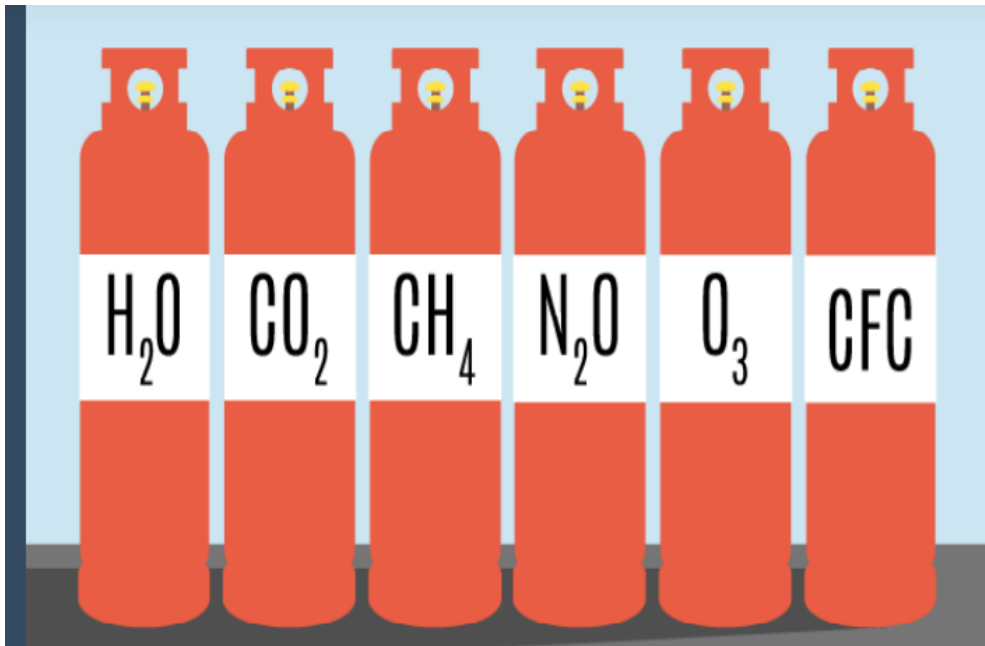


Figure I.3 : Les gaz à effet de serre

Ces gaz jouent un rôle crucial dans le maintien de la température de la Terre en absorbant et en réémettant le rayonnement thermique. Cependant, leur augmentation due aux activités humaines contribue au réchauffement climatique, avec des impacts environnementaux significatifs tels que l'élévation des températures, la fonte des glaciers, les variations des précipitations et les changements dans les écosystèmes.[3]

I.4 L'impact de l'activité humaine sur l'effet de serre :

I.4.1 Les émissions de gaz à effet de serre :

I.4.1.1 les principales activités humaines responsables des émissions de gaz à effet de serre :

Les principales activités humaines responsables des émissions de gaz à effet de serre (GES) comprennent la combustion des combustibles fossiles, l'industrie, l'agriculture et la déforestation :

- a) Combustion des combustibles fossiles : La combustion de charbon, de pétrole et de gaz naturel pour la production d'électricité, le chauffage, le transport et diverses activités industrielles est la principale source d'émissions de CO₂. Les centrales électriques, les usines, les véhicules à moteur et les installations résidentielles et commerciales utilisant des combustibles fossiles contribuent de manière significative aux émissions.
- b) Industrie : Les processus industriels, tels que la production d'acier, d'aluminium, de ciment, de verre et de produits chimiques, émettent d'importantes quantités de CO₂. Ces émissions proviennent principalement de la combustion de combustibles fossiles utilisés comme source d'énergie dans les installations industrielles.
- c) Agriculture : L'agriculture est une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. Les principales sources sont la fermentation entérique des ruminants, principalement les bovins et les ovins, qui produit du méthane (CH₄). Les autres sources incluent la gestion des déchets agricoles, la riziculture, qui génère également du méthane, et l'utilisation d'engrais chimiques et de fertilisants azotés, qui contribuent aux émissions de protoxyde d'azote (N₂O).
- d) Déforestation : La déforestation, principalement due à l'expansion agricole, libère d'importantes quantités de CO₂ stocké dans les arbres. Lorsque les forêts sont coupées ou brûlées, le carbone est libéré dans l'atmosphère. La conversion des forêts en terres agricoles, en pâturages ou en zones urbaines contribue également à la diminution de la capacité des écosystèmes à absorber le CO₂.*

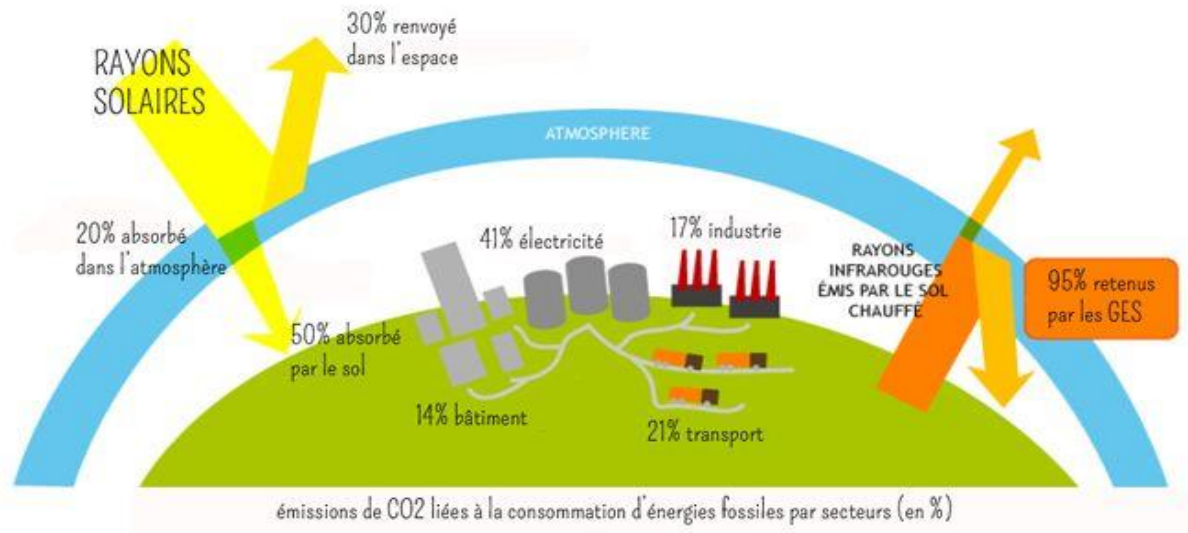


Figure I.4 : Activités humaines responsables des émissions de gaz à effet de serre

Ces activités sont les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, contribuant au réchauffement climatique et aux changements climatiques observés à l'échelle mondiale. La réduction des émissions de GES dans ces secteurs est essentielle pour atténuer les effets du réchauffement climatique. Cela peut être réalisé grâce à des mesures telles que la transition vers des sources d'énergie renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'adoption de pratiques agricoles durables, la préservation des forêts et l'utilisation de technologies plus propres dans l'industrie .[3]

I.4.1.2 Les étude de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre :

Depuis le début de l'ère industrielle, les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ont considérablement augmenté. Cette augmentation est principalement attribuable aux activités humaines, en particulier à la combustion des combustibles fossiles. Voici une étude de l'augmentation des concentrations de GES clés :

- Dioxyde de carbone (CO₂) :** Avant l'ère industrielle, les concentrations atmosphériques de CO₂ étaient d'environ 280 parties par million (ppm). Depuis lors, en raison de la combustion massive de combustibles fossiles, de la déforestation et d'autres activités humaines, les concentrations de CO₂ ont augmenté de manière significative. En septembre 2021, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère ont atteint près de 413 ppm, soit une augmentation d'environ 47 % par rapport aux niveaux préindustriels.
- Méthane (CH₄) :** Les concentrations de méthane ont également augmenté depuis l'ère industrielle. Avant cette période, les concentrations de méthane étaient d'environ 700

parties par milliard (ppb). Actuellement, les concentrations de méthane dépassent 1 850 ppb, ce qui représente une augmentation d'environ 160 % par rapport aux niveaux préindustriels. Les sources majeures d'émissions de méthane incluent l'élevage intensif de bétail, la production et la distribution de combustibles fossiles, la gestion des déchets et les émissions provenant des zones humides.

- c) **Protoxyde d'azote (N₂O)** : Les concentrations de protoxyde d'azote ont également augmenté depuis l'ère industrielle. Avant cette période, les concentrations de N₂O étaient d'environ 270 ppb. Actuellement, les concentrations de N₂O dépassent 330 ppb, ce qui représente une augmentation d'environ 20 % par rapport aux niveaux préindustriels. Les principales sources d'émissions de N₂O comprennent l'utilisation d'engrais chimiques, la combustion de biomasse, le traitement des eaux usées et les processus microbiens dans les sols, les océans et les lacs.

Ces augmentations des concentrations de GES ont conduit à un renforcement de l'effet de serre et au réchauffement climatique observé à l'échelle mondiale. Les impacts comprennent l'élévation des températures, la fonte des glaciers, l'augmentation du niveau de la mer, les changements dans les régimes de précipitations, les événements climatiques extrêmes et les perturbations des écosystèmes. Pour atténuer ces effets, il est crucial de réduire les émissions de GES, d'adopter des pratiques durables et de transitionner vers des sources d'énergie renouvelables et des technologies à faible émission de carbone.

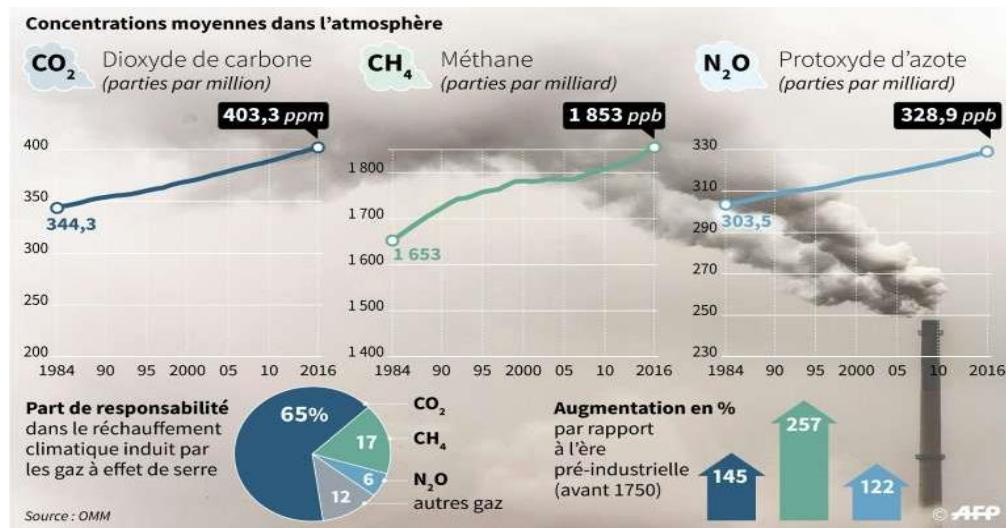


Figure I.5 :Records de concentration de gaz à effet de serre

I.5 Les cause et les conséquences de l'effet de serre sur la planète :

Cet effet de serre est indispensable à l'équilibre des écosystèmes terrestres. Sans lui, tout serait différent car la température ne parviendrait pas à réchauffer durablement la planète. Le problème, c'est que depuis 150 ans à 200 ans, on constate que cet effet de serre semble «

perturbé » et amplifié. En résumé, la planète se réchauffe de plus en plus. Mais alors, quelles sont les causes et les conséquences de ce réchauffement ?

I.5.1 Les causes :

Depuis 200 ans, ce qui a changé, c'est la Révolution Industrielle. Pour nos activités économiques et industrielles, nous avons développé partout sur la planète des machines et des technologies qui avaient besoin d'énergie pour fonctionner. Pour produire cette énergie, on a utilisé du bois, du charbon, puis du pétrole, du gaz... Et en brûlant toutes ces ressources pour produire de l'énergie, on a émis dans l'atmosphère de plus en plus de gaz à effet de serre et notamment le CO₂, le dioxyde de carbone.

De ce fait, on a perturbé l'équilibre habituel de l'atmosphère et amplifié l'effet de serre. Résultat, le climat se réchauffe et aujourd'hui on mesure sur la planète des températures moyennes supérieures de près de 1 degré aux températures pré-industrielles (c'est-à-dire les températures du début du 19ème siècle).

Dans le monde, il y a de nombreuses sources d'émissions de gaz à effet de serre qui peuvent contribuer au réchauffement climatique. Les principales sources de ces émissions sont d'origine humaine c'est-à-dire qu'elles sont causées par des activités humaines. Certaines sont d'origine naturelle : par exemple, les marécages ou les zones humides émettent du méthane qui est un gaz à effet de serre, quand la matière organique fermente sous l'effet de l'humidité. Les volcans peuvent aussi émettre des gaz à effet de serre. Toutefois, l'essentiel des émissions récentes qui ont amplifié l'effet de serre sont causées par l'Homme.

La principale source de gaz à effet de serre d'origine humaine est l'utilisation de l'énergie fossile. En brûlant des énergies comme le charbon, le gaz ou le pétrole pour produire de l'énergie ou pour alimenter les moteurs de nos moyens de transport, on émet du CO₂ qui contribue au réchauffement climatique. Près de 25% des émissions de CO₂ mondiales sont ainsi liées à la production d'énergie (électricité et chaleur) à laquelle il faut ajouter l'énergie utilisée dans les transports (pétrole et diesel) qui représente environ 14% des émissions de CO₂. Et comme avec l'industrialisation, la consommation de masse et la mondialisation nous avons besoin de toujours plus d'énergie et de toujours plus de pétrole pour nous déplacer, cela produit des quantités très importantes de gaz à effet de serre.

C'est pour cette raison que l'on investit aujourd'hui dans les énergies renouvelables, qui émettent beaucoup moins de CO₂ que les énergies fossiles.

La transformation des écosystèmes est aussi une source d'émissions de CO₂. Par exemple, lorsque l'on coupe des arbres, on affaiblit le potentiel des écosystèmes à stocker du CO₂, donc on augmente indirectement nos émissions. C'est ce que l'on appelle la déforestation. En détruisant certains écosystèmes qui capturent du CO₂, comme les forêts vierges, on augmente donc le réchauffement climatique. C'est le même problème avec l'acidification des océans : nous polluons les océans et cela réduit sa capacité à absorber le CO₂ ce qui augmente indirectement l'effet de serre.

Enfin, certaines activités comme l'agriculture émettent aussi beaucoup de gaz à effet de serre. L'élevage, ou les cultures en milieu humides comme la riziculture (la culture du riz) émettent beaucoup de méthane, un gaz à effet de serre puissant qui contribue fortement au réchauffement climatique.[2]

I.5.2 Les conséquences :

CHPITRE I : L'EFFET DE SERRE ET SANS IMPACT SUR L'ENVIRENNMENT

L'effet de serre, lié aux activités humaines, a déjà provoqué une augmentation de la température de 1,1°C environ par rapport à l'ère préindustrielle (avant 1850). Les changements climatiques sont déjà visibles : inondations, vagues de chaleur, et températures extrêmes sont de plus en plus intenses et fréquents. Le GIEC rappelle qu'il est impératif d'agir vite et de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre.

Plus le changement climatique sera important, plus l'équilibre de nos écosystèmes sera menacé. Ainsi, l'augmentation de la température moyenne de plus de 1,5°C entraînerait des phénomènes climatiques extrêmes et l'accélération de phénomènes tels que la fonte des glaces, qui contribue à l'élévation du niveau de la mer et menace l'existence de certaines populations en zones côtières.

En 2022, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a établi un rapport spécial décrivant en détail les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C :

- Augmentation de la température moyenne ;
- Sécheresses intenses ;
- Fortes précipitations...

Une conséquence possible du réchauffement océanique (qui n'apparaît pas dans les modèles actuels, car leur maille n'est pas suffisamment fine pour représenter ces phénomènes) pourrait être de favoriser la formation et le déplacement des perturbations tropicales (typhons, ouragans) jusqu'à des latitudes plus élevées qu'actuellement. Une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des cyclones tropicaux ou des modifications dans les trajectoires des tempêtes, pourraient provoquer des inondations et des marées de tempête, et dévaster les zones côtières et les îles exposées. Ce danger pourrait être aggravé par une accélération de la montée du niveau de la mer, qui a été de 1 à 2 mm par an en moyenne globale au cours des 100 dernières années. Selon les projections d'un scénario du GIEC la hausse progressive du niveau des océans, provoquée par leur dilatation thermique ou la récession de glaciers de montagne, pourrait atteindre de 8 à 29 cm en 2030, et 21 à 71 cm en 2070. Ceci pourrait augmenter la fréquence des inondations sur les îles et les basses terres littorales, et conduire à une réduction des réserves côtières d'eau douce, par suite d'intrusions accrues d'eau salée.

Parmi les conséquences indirectes du réchauffement on peut s'attendre à des modifications des conditions hydriques et thermiques en surface qui peuvent avoir des impacts sur l'agriculture, notamment sur le choix des variétés les plus adaptées, et sur les dates des récoltes. Une réduction de l'humidité des sols, donc, de l'évaporation, pourrait augmenter l'amplitude du cycle diurne, et les températures maximales atteintes. Ceci peut avoir une incidence sur la fréquence des incendies de forêt et l'étendue des régions concernées. Les conséquences du

changement climatique pourront être défavorables dans certaines régions (par exemple, augmentation des sécheresses et désertifications de régions qui jusqu'à présent avaient des conditions propices à la production agricole), et favorables dans d'autres régions (atténuation de la rigueur des hivers aux hautes latitudes permettant la mise en valeur de régions actuellement peu hospitalières). Mais la vitesse du changement climatique risque d'être un facteur critique. Un changement climatique trop rapide pourrait entraîner un certain nombre de bouleversements écologiques, tels qu'une réduction de la superficie des zones forestières. En effet, la disparition des forêts dans les zones où les conditions climatiques leur sont devenues adverses, sera rapide, tandis que leur réimplantation et leur croissance dans d'autres zones nécessitera des dizaines d'années. A cause de l'amplification du réchauffement aux hautes latitudes, la forêt boréale serait plus menacée que la forêt tropicale.[2]

I.6 Comment limiter l'effet de serre :

Modifier ses habitudes de déplacements : réduire fortement ses trajets aériens, opter pour le train, le covoiturage, le vélo et la marche au quotidien sont des mesures puissantes pour réduire notre empreinte carbone ;

Réduire sa consommation de viande : l'élevage est un des principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre ;

Manger des fruits et des légumes de saison : les fruits et légumes hors saison sont souvent cultivés sous des serres chauffées ou importés de l'autre bout du monde ;

Recycler ses déchets : plastique, verre, carton, le recyclage permet de revaloriser ses déchets ;

Opter pour l'économie circulaire : adopter un mode de consommation responsable pour limiter les externalités négatives sur l'environnement ;

Passer à l'énergie verte et privilégier les énergies renouvelables tout en gardant en tête que l'énergie la moins émettrice est celle qu'on ne consomme pas ! La seule solution pour diminuer l'effet de serre dû aux activités humaines est de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, en décembre 2015, 192 pays se sont mobilisés en signant l'Accord de Paris et en fixant des objectifs pour limiter le réchauffement climatique.[4]

1.7 Conclusion :

L'effet de serre amplifié par les activités humaines a des conséquences profondes sur l'environnement. Le réchauffement climatique, la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer, les phénomènes météorologiques extrêmes, la perte de biodiversité et les risques pour la santé humaine sont autant de défis majeurs auxquels nous devons faire face. La réduction

CHPITRE I : L'EFFET DE SERRE ET SANS IMPACT SUR L'ENVIRENNMENT

des émissions de gaz à effet de serre, la transition vers des sources d'énergie propres, la préservation des écosystèmes et l'adoption de pratiques durables sont des mesures essentielles pour atténuer ces impacts et assurer un avenir durable pour notre planète et les générations futures.

CHAPITRE 2 :
CARACTERISTIQUE DU
DIOXYDE DE CARBONE

➤ Introduction

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz incolore et inodore qui joue un rôle essentiel dans de nombreux processus naturels et industriels. Il est produit par diverses sources, notamment la respiration des êtres vivants, la combustion de combustibles fossiles et les processus industriels. En raison de son impact sur le changement climatique et son implication dans les problèmes environnementaux, la caractérisation précise du dioxyde de carbone est d'une grande importance.

II.1 HISTOIRE DE DIOXYDE DE CARBONE CO₂ :

Le dioxyde de carbone est l'un des premiers gaz (avec la vapeur d'eau) à avoir été décrit comme étant une substance distincte de l'air . le chimiste et médecin flamand Jean-Baptiste Van Helmont observa qu'en brûlant du charbon de bois en vase clos, la masse des cendres résultantes est inférieure à celle du charbon. Son interprétation était que la masse manquante s'était transmutée en une substance invisible qu'il nomme « gas » ou spiritus sylvestre (« esprit sauvage »)

Les propriétés du dioxyde de carbone furent étudiées plus en détail dans les années 1750 par le chimiste et physicien écossais Joseph Black. Il découvrit qu'en chauffant ou en versant un acide sur du calcaire (roche composée de carbonate de calcium), il en résultait l'émission d'un gaz, qu'il nomma « air fixe », mettant à mal la théorie du phlogiston encore enseignée à cette époque. Il observa que celui-ci est plus dense que l'air et qu'il ne peut ni entretenir une flamme, ni la vie d'un animal. Black découvrit également que lorsque le dioxyde de carbone est introduit dans une solution calcaire (hydroxyde de calcium), il en résulte un précipité de carbonate de calcium. Il utilisa ce phénomène pour illustrer le fait que le dioxyde de carbone est produit par la respiration animale et la fermentation microbienne.

En 1772, le chimiste anglais Joseph Priestley publia un ouvrage intitulé *Impregnating Water with Fixed Air* dans lequel il décrit un processus consistant à verser de l'acide sulfurique (ou « huile de vitriol » comme on la nommait à cette époque) sur de la craie afin de produire du dioxyde de carbone, puis forçant le gaz à se dissoudre dans un bol d'eau. Il vint en fait d'« inventer » l'eau gazeuse²³. Le procédé est ensuite repris par Johann Jacob Schweppe qui fonda, en 1790, à Londres une usine de production de soda connue sous le nom de Schweppes.

En 1781, le chimiste français Antoine Lavoisier mit en évidence le fait que ce gaz est le produit de la combustion du carbone avec le dioxygène.

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

Le dioxyde de carbone fut liquéfié pour la première fois en 1823 par Humphry Davy et Michael Faraday. La première description du dioxyde de carbone en phase solide fut écrite par Charles Thilorier, qui en 1834 ouvrit un container pressurisé de gaz carbonique liquéfié et découvrit que le refroidissement produit par la rapide évaporation du liquide générait de la « neige » de CO₂. [5]

II.2 DEFINITION DU DIOXYDE DE CARBONE :

Le dioxyde de carbone, aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé chimique dont la formule est CO₂, la molécule ayant une structure linéaire de la forme O=C=O. Il se présente, sous les conditions normales de température et de pression, comme un gaz incolore, inodore, à la saveur piquante.

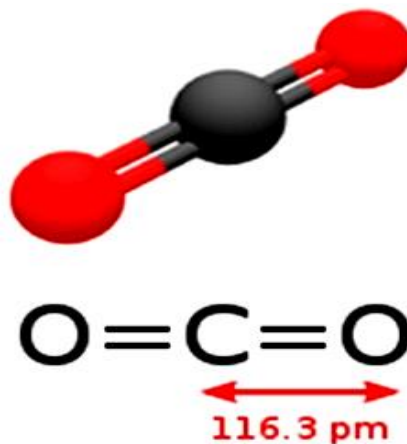


Figure II.1 : Molécule du dioxyde de carbone

Le CO₂ est utilisé par l'anabolisme des végétaux pour produire de la biomasse à travers la photosynthèse, processus qui consiste à réduire le dioxyde de carbone par l'eau, grâce à l'énergie lumineuse reçue du Soleil et captée par la chlorophylle, en libérant de l'oxygène pour produire des oses, et en premier lieu du glucose par le cycle de Calvin. Le CO₂ est libéré, à travers la chaîne respiratoire, par le catabolisme des plantes, des animaux, des fungi (mycètes, ou champignons) et des micro-organismes. Ce catabolisme consiste notamment à oxyder les lipides et les glucides en eau et en dioxyde de carbone grâce à l'oxygène de l'air pour produire de l'énergie et du pouvoir réducteur, sous forme respectivement d'ATP et de NADH + H⁺. Le CO₂ est par conséquent un élément fondamental du cycle du carbone sur notre planète. Il est également produit par la combustion des énergies fossiles telles que le charbon, le gaz naturel et le pétrole, ainsi que par celle de toutes les

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

matières organiques en général. Des quantités significatives de CO₂ sont par ailleurs rejetées par les volcans et autres phénomènes géothermiques tels que les geysers.

Le dioxyde de carbone est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre à une concentration de près de 0,039 % en volume au début des années 2010¹⁴, c'est-à-dire 390 ppmv (parties par million en volume) ou 591 ppmm (parties par million en masse). En 2009, cette concentration atteignait précisément 386 ppmv¹⁵, contre seulement 283,4 ppmv en 1839 d'après les carottes de glace prélevées dans la région du cap Poinsett dans l'Antarctique¹⁶, soit une augmentation globale de 36,2 % en 170 ans¹⁷.

Le CO₂ est un gaz à effet de serre bien connu, transparent en lumière visible mais absorbant dans le domaine infrarouge, de sorte qu'il tend à bloquer la réémission vers l'espace de l'énergie thermique reçue au sol sous l'effet du rayonnement solaire ; il serait responsable de 26 % de l'effet de serre à l'œuvre dans notre atmosphère (la vapeur d'eau en assurant 60 %), où l'augmentation de sa concentration serait en partie responsable du constaté à l'échelle de notre planète depuis les dernières décennies du siècle 19 . Non seulement le dioxyde de carbone réchaufferait l'atmosphère de la planète, mais il se dissout aussi en partie dans les océans et les acidifie. Au cours du siècle, cette acidification pourrait devenir si importante que les coraux seront dans l'incapacité de constituer des récifs.[5]

II.3 CARACTERISTIQUE :

Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone	
Dioxyde de carbone	CO ₂
Gaz carbonique	O = C = O
Anhydride carbonique	
Numéro CAS	124-38-9
État à pression et température ordinaires	Gaz incolore et inodore
Masse molaire.....(g · mol⁻¹)	44,01
Taille.....(nm)	0,35 – 0,51
Masse volumique sous 1 atm à :	
0 °C..... (kg · m⁻³)	1,977
20 °C..... (kg · m⁻³)	1.87
Viscosité à – 78C.....(Pa · s)	7 · 10 ⁻⁵
Température de sublimation(°C)	– 78,5
Température de fusion (°C)	– 57
Chaleur latente de fusion.....(kJ · kg⁻¹)	196,33
Température critique..... (°C)	31,06

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

Pression critique..... (MPa)	7,4
Température au point triple..... (°C)	- 56,6
Pression au point triple(bar)	5,185
Solubilité dans l'eau à 25 °C.....(g · L ⁻¹)	1,45
Solubilité dans l'éthanol à 20°C (g ·L ⁻¹)	2,964
Constante de Henry à 25 °C..... (atm)	1,51 · 10 ²
Saveur	Piquante

Tableau II.1 : Caractéristiques physico-chimiques du dioxyde de carbone

II.3.1 Propriété physique :

T (K)	T (°C)	ρ (kmol·m ⁻³)	ρ (g·cm ⁻³)	T (K)	T (°C)	ρ (kmol·m ⁻³)	ρ (g·cm ⁻³)
216,58	-56,57	26,828	1,1807	263,32	-9,83	22,28898	0,98094
222,42	-50,73	26,33541	1,15902	266,24	-6,91	21,93681	0,96544
225,34	-47,81	26,08345	1,14793	269,16	-3,99	21,57091	0,94934
228,26	-44,89	25,82729	1,13666	272,08	-1,07	21,18936	0,93254
231,19	-41,97	25,56666	1,12519	275	1,85	20,78979	0,91496
234,11	-39,04	25,30127	1,11351	277,92	4,77	20,36917	0,89645
237,03	-36,12	25,0308	1,10161	280,84	7,69	19,92355	0,87684
239,95	-33,2	24,75489	1,08946	283,76	10,61	19,4476	0,85589
242,87	-30,28	24,47312	1,07706	286,68	13,53	18,93392	0,83328
245,79	-27,36	24,18504	1,06438	289,61	16,46	18,37158	0,80853
248,71	-24,44	23,89014	1,05141	292,53	19,38	17,74341	0,78089
251,63	-21,52	23,58782	1,0381	295,45	22,3	17,01963	0,74903
254,55	-18,6	23,27739	1,02444	298,37	25,22	16,13969	0,71031
257,47	-15,68	22,95809	1,01039	301,29	28,14	14,93702	0,65738
260,4	-12,76	22,62898	0,9959	304,21	31,06	10,560	0,46475

Tableau II.2 : Différentes valeurs de la masse volumique du dioxyde de carbone

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

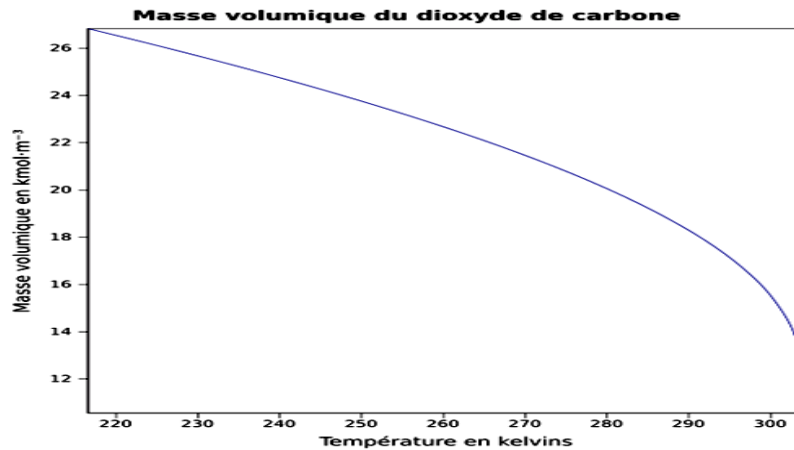


Figure II.2 : Courbe de la masse volumique du dioxyde de carbone

II.3.2 Pression de vapeur saturante : 5 720 kPa (20 °C)

- 569,1 mmHg (-82 °C)
- 104,2 mmHg (-100 °C)
- 10,5 mmHg (-120 °C)

Formule de la pression de vapeur saturante :

$$P_{vs} = \exp\left(140.54 + \frac{-4735}{T} + (-21.268) \times \ln(T) + (4.0909 E - 2) \times T\right)$$

Pression en pascals et température en kelvins, de 216,58 à 304,21K.

Valeurs calculées :

6 447 890,53 Pa à 25 °C.

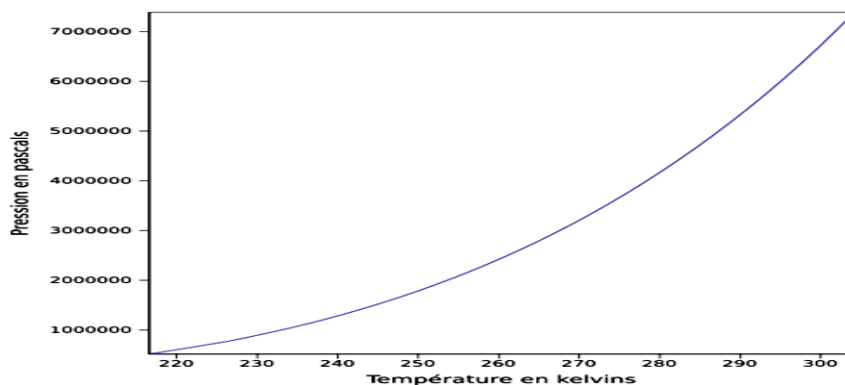


Figure II.3 : Courbe de la pression de vapeur saturante du dioxyde de carbone

II.3.3 Propriété chimiques :

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

T (K)	T (°C)	P (Pa)	T (K)	T (°C)	P (Pa)
216,58	-56,57	5,1867E5	263,32	-9,83	2 664 927,43
222,42	-50,73	664 086,24	266,24	-6,91	2 893 111,53
225,34	-47,81	747 226,81	269,16	-3,99	3 135 430,32
228,26	-44,89	837 848,22	272,08	-1,07	3 392 479,34
231,19	-41,97	936 353,81	275	1,85	3 664 877,53
234,11	-39,04	1 043 154,91	277,92	4,77	3 953 268,94
237,03	-36,12	1 158 671,36	280,84	7,69	4 258 324,53
239,95	-33,2	1 283 332,07	283,76	10,61	4 580 744,03
242,87	-30,28	1 417 575,74	286,68	13,53	4 921 257,93
245,79	-27,36	1 561 851,69	289,61	16,46	5 280 629,47
248,71	-24,44	1 716 620,73	292,53	19,38	5 659 656,84
251,63	-21,52	1 882 356,14	295,45	22,3	6 059 175,35
254,55	-18,6	2 059 544,8	298,37	25,22	6 480 059,81
257,47	-15,68	2 248 688,3	301,29	28,14	6 923 226,91
260,40	-12,76	2 450 304,21	304,21	31,06	7,3896E6

Tableau II.3 : Différents valeurs de pression du dioxyde de carbone

II.4 Thermochimie :

	0,07 mPa·s à -78 °C
<u>Point critique</u>	31,3 °C ; 72,9 atm; 0,464 g·cm ⁻³
<u>Point triple</u>	-56,6 °C à 5,11 atm
<u>Conductivité thermique</u>	3,840×10 ⁻⁵ cal·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹ à 20 °C
<u>Vitesse du son</u>	259 m·s ⁻¹ (0 °C, 1 atm)

Tableau II.4 : Différents caractéristique des points des phases du dioxyde de carbone

$$\Delta_f H^0_{\text{gaz}} = -393,52 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

L'équation :

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

$$C_p = (-8.3043 E 6) + (104370) \times T + (-433.33) \times T^2 + (0.60052) \times T^3$$

Capacité thermique du liquide en J•kmol⁻¹•K⁻¹ et température en kelvins, de 220 à 290 K

Valeurs calculées

II.4.1 Capacité thermique du CO2 liquide :

T (K)	T (°C)	$C_p \left(\frac{J}{kmol \times K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \times K} \right)$	T (K)	T (°C)	$C_p \left(\frac{J}{kmol \times K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \times K} \right)$
220	-53,15	78 270	1 778	257	-16,15	91 359	2 076
224	-49,15	81 313	1848	259	-14,15	2 019	2 107
227	-46,15	82 961	1885	262	-11,15	95 324	2 166
229	-44,15	83 810	1904	264	-9,15	97 427	2 214
231	-42,15	84 492	1 920	266	-7,15	99 867	2 269
234	-39,15	85 268	1 937	269	-4,15	104 225	2 368
236	-37,15	85 661	1 946	271	-2,15	107 637	2 446
238	-35,15	85 989	1 954	273	-0,15	111 489	2 533
241	-32,15	86 422	1 964	276	2,85	118 152	2 685
243	-30,15	86 712	1 970	278	4,85	123 228	2 800
245	-28,15	87 039	1 978	280	6,85	128 843	2 928
248	-25,15	87 658	1 992	283	9,85	138 342	3 143
250	-23,15	88 200	2004	285	1,85	145 433	3 305
252	-21,15	88 878	2019	287	3,85	153 166	3 480
255	-18,15	90 214	2050	29	6,85	166 030	3 773

Tableau II.5 : Résultats des données de la capacité thermique du CO2 liquide

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

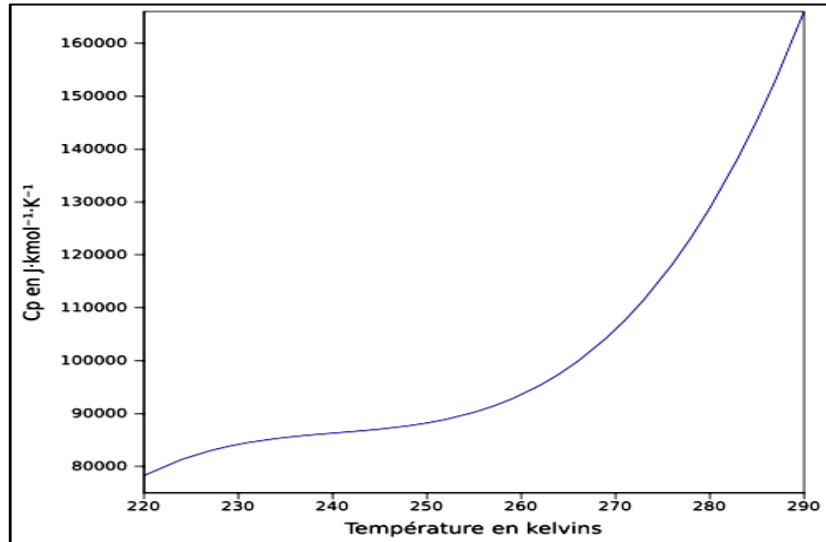


Figure II.4 : Courbe de la capacité thermique du CO2

- **Capacité thermique du liquide**

Capacité thermique du gaz en $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ et température en kelvins, de 50 à 5 000 K

Valeurs calculées :

38,418 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ à 25 °C.

L'équation :

$$C_p = (27.437) + (4.2315 E - 2) \times T + (-1.9555 E - 5) \times T^2 + (3.9968 E - 9) \times T^3 + (2.9872 E - 13) \times T^4$$

II.4.2 Capacité thermique du CO2 gaz :

T (K)	T (°C)	$C_p \left(\frac{J}{kmol \times K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \times K} \right)$	T (K)	T (°C)	$C_p \left(\frac{J}{kmol \times K} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \times K} \right)$
50	-223,15	29 504	670	2 690	2 416,85	61 919	1 407
380	106,85	40 906	929	2 855	2 581,85	62 017	1 409
545	271,85	45 311	1 030	3 020	2 746,85	62 117	1 411
710	436,85	48 978	1 113	3 185	2 911,85	62 234	1 414
875	601,85	51 993	1 181	3 350	3 076,85	62 375	1 417
1 040	766,85	54 440	1 237	3 515	3 241,85	62 543	1 421
1 205	931,85	56 396	1 281	3 680	3 406,85	62 735	1 425
1 370	1 096,85	57 931	1 316	3 845	3 571,85	62 943	1 430
1 535	1 261,85	59 112	1 343	4 010	3 736,85	63 152	1 435

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

1 700	1 426,85	60 000	1 363	4 175	3 901,85	63 346	1 439
1 865	1 591,85	60 651	1 378	4 340	4 066,85	63 499	1 443
2 030	1 756,85	61 114	1 389	4 505	4 231,85	63 581	1 445
2 195	1 921,85	61 436	1 396	4 670	4 396,85	63 560	1 444
2 360	2 086,85	61 655	1 401	4 835	4 561,85	63 393	1 440
2 525	2 251,85	61 807	1 404	5 000	4 726,85	63 037	1 432

Tableau II.6 : Résultats des données de la capacité thermique du CO₂ gaz

II.4.3 Propriétés électroniques et cristallographie :

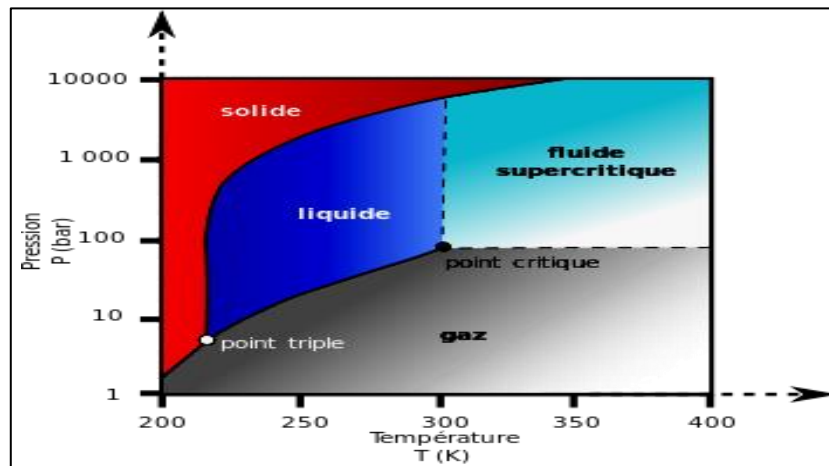


Figure II.5 : Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique.

À pression atmosphérique, il se sublime à $-78,5\text{ °C}$ (passage de l'état solide à l'état gazeux), mais ne fond pas (passage de l'état solide à l'état liquide).

La phase liquide ne peut exister qu'à une pression minimale de 519 kPa (soit 5,12 atm), et dans un intervalle de température allant de $-56,6\text{ °C}$ (point triple) à $31,1\text{ °C}$ au maximum à 7,38 MPa (soit 72,8 atm) (point critique).

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

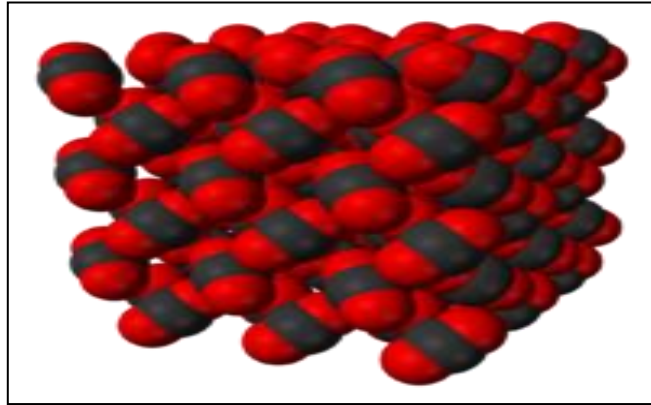


Figure II.6 : Structure cristalline de la « glace sèche » : cubique à faces centrées

II.4.4 Pression de vapeur saturante :

Température	Pression	État	Température	Pression	État
-138,15 °C	0,1 kPa	solide	-53,15 °C	599 kPa	Liquide
-133,15 °C	0,2 kPa	solide	-48,15 °C	734 kPa	Liquide
-128,15 °C	0,4 kPa	solide	-43,15 °C	893 kPa	Liquide
-123,15 °C	0,8 kPa	solide	-38,15 °C	1 075 kPa	Liquide
-118,15 °C	1,7 kPa	solide	-33,15 °C	1 283 kPa	Liquide
-113,15 °C	3,1 kPa	solide	-28,15 °C	1 519 kPa	Liquide
-108,15 °C	5,7 kPa	solide	-23,15 °C	1 785 kPa	Liquide
-103,15 °C	9,9 kPa	solide	-18,15 °C	2 085 kPa	Liquide
-98,15 °C	16,8 kPa	solide	-13,15 °C	2 419 kPa	Liquide
-93,15 °C	27,6 kPa	solide	-8,15 °C	2 790 kPa	Liquide
-88,15 °C	44,0 kPa	solide	-3,15 °C	3 203 kPa	Liquide
-83,15 °C	68,4 kPa	solide	1,85 °C	3 658 kPa	Liquide
-78,15 °C	104 kPa	solide	6,85 °C	4 161 kPa	Liquide
-73,15 °C	155 kPa	solide	11,85 °C	4 714 kPa	Liquide
-68,15 °C	227 kPa	solide	16,85 °C	5 318 kPa	Liquide
-63,15 °C	327 kPa	solide	21,85 °C	5 984 kPa	Liquide
-58,15 °C	465 kPa	solide	26,85 °C	6 713 kPa	Liquide
-56,6 °C	518 kPa	<u>point triple</u>	31,3 °C	7 387 kPa	<u>point critique</u>

Tableau II.7 : Valeurs de la pression de vapeur saturante

II.5 Chaleurs latentes de transition d'état :

Vaporisation	0 °C	234,5 kJ.kg⁻¹
Vaporisation	-16,7 °C	276,8 kJ.kg⁻¹
Vaporisation	-28,9 °C	301,7 kJ.kg⁻¹
Fusion	-56,6 °C	199 kJ.kg⁻¹

Tableau II.8 : Différentes valeurs de la chaleur latente de transition d'état

II.6 UTILISATIONS DU DIOXYDE DE CARBONE :

II.6.1 Sous forme gazeuse :

Le CO₂ a beaucoup d'utilisations, dont :

- l'extinction des feux : beaucoup de Datacenter (salles de serveurs d'ordinateurs) ou de salles des archives sont équipées d'un système qui, en cas d'incendie, remplit la salle de CO₂ ce qui a pour effet d'éteindre le feu ;
- composant pétillant dans les boissons gazeuses ;
- en aquariophilie et culture sous serre pour une meilleure croissance des plantes ;
- en emballages à atmosphère contrôlée comme élément neutralisant ;
- en distribution d'eau potable, associé au carbonate, pour relever la dureté de l'eau (TH) des eaux trop agressives ;
- solubilisation du calcaire dans les eaux dures (TH > 25 °F) ;
- les pompes à bière : en étant en contact avec la surface de la bière, il évite son oxydation et prolonge sa conservation, contrairement à un compresseur utilisant de l'air (ambiant) ;
- on se sert aussi parfois du CO₂ dans les grands abattoirs de porcs afin de les insensibiliser avant de les saigner ; il a été utilisé pour la conservation de la viande.
- l'extraction de la caféine du café (pour produire du café décaféiné d'une part et de la caféine d'autre part).

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

- Composant nécessaire au phénomène de photosynthèse qui permet aux végétaux de croître en transformant les matières inorganiques en matières organiques constituant ainsi leur bois.[6]

II.6.2 Sous forme liquide :

Sous forme liquide, il est utilisé comme :

- réfrigérant pour congeler certains aliments ;
- réfrigérant dans l'industrie électronique ;
- agent d'extinction dans les extincteurs dits « au dioxyde de carbone », on parle parfois de neige carbonique parce que le CO₂ liquide se solidifie immédiatement à la sortie de l'extincteur en produisant une poudre blanche ;
- agent propulseur (et parfois également carbonatant) pour les boissons servies à la pression.

Quand il est utilisé comme fluide frigorigène, le CO₂ porte la dénomination R744.

À pression atmosphérique, le dioxyde de carbone n'est jamais sous forme liquide. Il passe directement de la forme solide à la forme gazeuse (sublimation).[6]

II.6.3 Sous forme solide :



Figure II.7 : Granulats de « glace sèche » se sublimant à l'air

Le dioxyde de carbone sous forme solide a de nombreuses appellations : « glace carbonique », « neige carbonique », « carboglace », « glace sèche ». Il est issu de la solidification du CO₂ liquide. On obtient de la neige carbonique qui est ensuite comprimée pour obtenir de la glace carbonique. Dans sa phase solide, cette glace carbonique se sublime en ne laissant aucun résidu, selon une chaleur latente de fusion de 196,104 kJ/kg (soit 8,63 kJ/mol), à -78,5 °C et à 1 atm . On lui a donc rapidement trouvé de multiples utilisations en tant que réfrigérant. Il est commercialisé sous différentes présentations selon son usage :

CHPITRE II : CARACTERISTIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE

en granules (de la taille d'un grain de riz de 3 mm de diamètre) : essentiellement pour le nettoyage et le décapage cryogénique ;

- en bâtonnets (d'une longueur d'environ 16 mm) : pour la conservation, le transport des produits sous température dirigée (produits pharmaceutiques, transport de surgelés, transport d'échantillons, etc.) ;

- pour la recherche fondamentale ou appliquée ;
- pour la vinification : il ralentit la fermentation et évite l'oxydation ;
- en plaquette ou en blocs :

pour le ravitaillement aérien (catering), les traiteurs, les pompes funèbres, etc.

- en pains :

pour faire de la fumée épaisse (effets spéciaux, cinéma, vidéo).

Le dioxyde de carbone sous forme solide est également présent en abondance aux pôles de la planète Mars, où il forme de véritables calottes glaciaires.[6]



(a)

(b)

(c)

Figure II.8 : Différents formes du dioxyde de carbone solide

(a) : Neige carbonique, (b) : plaquette de glace carbonique, (c) : blocs de glace

II.7 Transport du CO₂ :

Le transport de CO₂ du lieu de captage vers le lieu de stockage est une technique maîtrisée. Puisqu'elle est semblable à celle appliquée au transport des autres gaz, il peut être transporté selon la distance par gazoducs, bateau ou camion. [7]

Il existe plusieurs moyens de transport de CO₂ :

- Transport terrestre par camion ou par train
- Transport par bateau
- Transport par canalisation

II.8 Stockage du CO₂ :

Le stockage du CO₂ dans les formations géologiques profondes sous terre ou sous la mer est la principale solution envisagée. Une autre solution consisterait à minéraliser le CO₂ avec des oxydes métalliques. Le CSC consiste à capter le CO₂ émis par les installations industrielles (principalement les centrales électriques, mais également les cimenteries, les aciéries, etc.) pour ensuite le stocker dans le sous-sol. Différentes zones géologiques sont envisagées pour stocker le CO₂

- Les aquifères salins profonds.
- Les réservoirs d'hydrocarbures des champs matures :

soit après exploitation dans les réservoirs déplétés, soit en cours de production avec le bénéfice additionnel d'aider à drainer les hydrocarbures hors des réservoirs, les vides de charbon non exploitables, un stockage sous forme minérale dans les roches ultrabasiques. Seuls les champs matures ou les aquifères salins permettront de stocker des quantités suffisantes à l'échelle du problème posé. De leur manque d'intérêt économique à ce jour, ils sont peu étudiés et donc encore mal connus.[7]

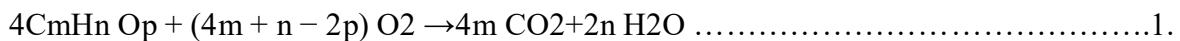
CHAPITRE III:
APPLICATION PRATIQUE
DU BILAN DU CO₂ ET
FORMATION OU
FABRICATION DE GLACE

III.1 SOURCES ET IMPACT :

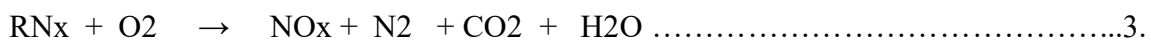
III.1.1 Source et puits :

III.1 .1.1 Sources :oxydation de la matière carbonique

La principale source de CO₂ est l'oxydation de la matière organique sous toutes ses formes ou de composés inorganiques comme les charbons. C'est un produit fatal de cette transformation, c'est-à-dire que thermodynamiquement le plus stable, il reste le produit ultime de réaction. Cette oxydation peut être due à un effet thermique (combustion, incinération), chimique (réaction avec un oxydant) ou biologique (biodégradation principalement par des micro-organismes aérobies). En effet, toute matière organique, définie par une formule brute du type C_mH_nO_p, réagit pour donner du dioxyde de carbone et de l'eau suivant une réaction générale de forme :



Si la matière organique comprend des hétéroatomes (azote, soufre, chlore...), les réactions (simplifiées dans les équations suivantes) conduisent à la production de composés multiples plus ou moins polluants :



Dans le cas de la matière minérale carbonée, on obtient une réaction qui peut être symbolisée par :



Il est évident que des impuretés présentes dans des charbons ou des fuels, comme le soufre très présent sous la forme de S_o, de mercaptans ou de sulfures, vont produire des oxydes de soufre (SO_x).[8]

III.1.1.2 Puits de carbone : océans – photosynthèse

En 2006, on estime qu'environ 25 millions de tonnes de gaz carbonique sont transférées dans l'eau de mer par jour. Après dissolution et en fonction du pH, se forment alors des hydrogénocarbonates et des carbonates peu solubles. Cela représente environ 30 % du CO₂ émis, tandis que 30 % sont absorbés par la biosphère terrestre et 40 % demeurent dans l'atmosphère.

Ces quelques chiffres globaux peuvent expliquer l'augmentation continue des concentrations dans l'atmosphère. Le CO₂ dissous rentre dans les équilibres physico-chimiques calcocarboniques avec formation des espèces carbonates et bicarbonates. Les

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

micro-organismes (bactéries et algues) peuvent aussi avoir une part importante dans ce cycle du carbone avec formation et dégradation des carbonates, on peut citer notamment la précipitation bactérienne d'aragonite et de calcite. Une conséquence problématique de la trop forte dissolution de CO₂ serait une acidification conséquente des océans dont le pH serait passé de 8,2 à 8,1 à la surface (100 premiers mètres) et au rythme actuel de décroissance, le pH de la mer en surface pourrait atteindre 7,9 en 2100. Toutefois, aucune modification notable du pH n'a été observée dans les profondeurs. Cette chute entraîne, en surface, une diminution de la concentration en carbonates par solubilisation. Certains micro-organismes marins à coquille (ptéropodes, coccolithophores, foraminifères) ayant besoin de ces carbonates pour former leur exosquelette d'aragonite pourraient rencontrer des problèmes, voire disparaître à terme. Un autre puits important pour le CO₂ est la photosynthèse dont le processus transforme l'eau et le gaz carbonique en molécules biologiques élaborées, sous l'action de l'énergie lumineuse, par des végétaux (plantes et algues) et certaines bactéries. Ces réactions se déroulent dans les chloroplastes où se trouve la chlorophylle. Ce pigment est sensible aux rayonnements bleus et rouges. Il capte l'énergie lumineuse et la transforme en énergie chimique. Après fixation du carbone du CO₂ atmosphérique, cette énergie est utilisée pour la synthèse de molécules organiques comme les sucres, acides aminés ou lipides et pour l'oxydation de l'eau, produisant du dioxygène (O₂). Une valeur due principalement à la photosynthèse on estime ce puits à environ 30 % du dioxyde de carbone émis par les activités humaines.[8]

III.2 ÉMISSIONS DANS LE MONDE PAR PAYS :

L'Organisation des Nations unies a établi, pour l'année 2002, une liste des quantités de CO₂ rejetées dans l'atmosphère par pays. Les deux tiers des émissions actuelles proviennent des États-Unis, de l'Union européenne, de la Chine, de la Russie et de l'Inde. Les fortes quantités rejetées sont souvent la conséquence des transports et de l'utilisation massive de centrales thermiques à charbon ou à fuel pour la production d'électricité.

Quelques études prévisionnelles montrent que la Chine va remplacer les États-Unis au premier rang d'ici 2009. La France ayant un parc de centrales nucléaires important (80 % environ de l'électricité produite) participe à un niveau relativement faible soit environ 1,6 % des rejets mondiaux en CO₂

Il existe aussi de fortes disparités d'émissions de CO₂ par habitant suivant le niveau de développement des pays ; cette répartition, présentée sur la figure 2.8 , est directement liée à la consommation d'énergie et donc au niveau de vie des habitants concernés.[8]

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

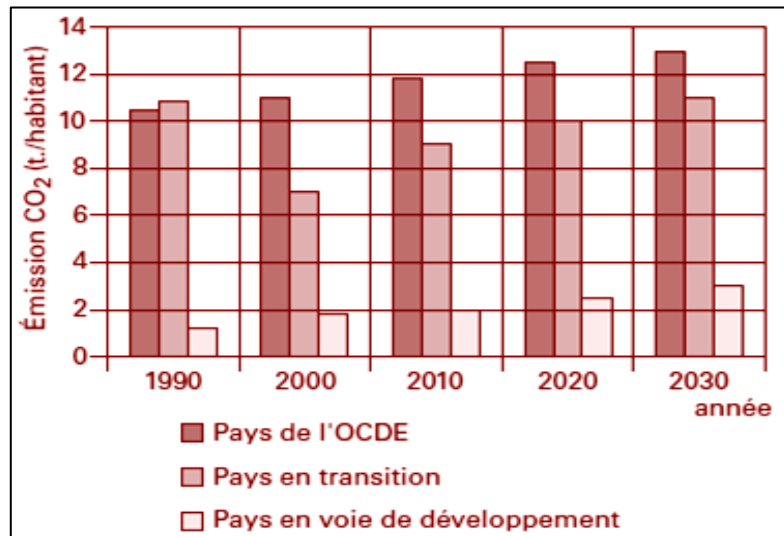


Figure III.1 : Émission de CO₂ (tonne/habitant) en fonction du niveau de développement des pays

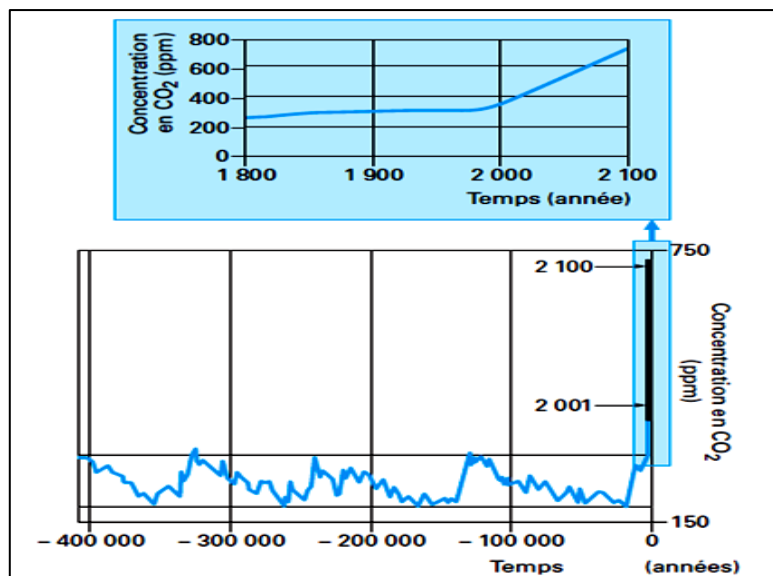


Figure III.2 : Évolution de la concentration en CO₂ (ppm) dans l'atmosphère au cours d'une longue période, lors de la Révolution industrielle [1800-2007] et prédiction jusqu'en 2100

III.2.1 Les sources d'émissions de CO₂ :

le diagramme de la figure N°III.11 décrit la répartition des émissions de CO₂ par secteur au niveau mondial, on peut noter que de 60% des émissions de CO₂ sont dues aux activités de production d'électricité et à l'industrie, de plus le transport est responsable à lui seul de près d'un tiers des rejets de CO₂ et le secteur résidentiel compte pour 10% de ces émissions.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

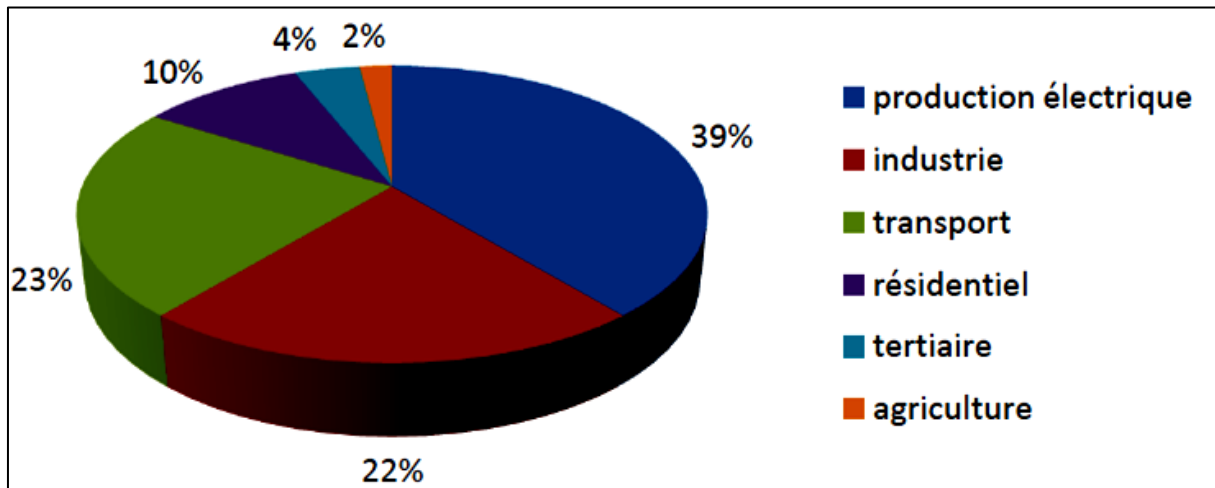


Figure III.3 : Diagramme des sources d'émissions de CO2

III.3 APPLICATION PRATIQUE DU BILAN CARBONE :

Dans cette approche générale de réduction des émissions de gaz à effet de serre et en particulier de CO₂, une démarche environnementale pragmatique a été proposée par l'ADEME le bilan carbone. Il est opérationnel pour les entreprises, les activités du tertiaire et les particuliers. Il permet d'évaluer les dépendances aux énergies fossiles, d'anticiper les fluctuations du prix de l'énergie et, plus largement, de limiter les émissions de dioxyde de carbone dues à l'activité humaine.

Le bilan carbone consiste à déterminer, à l'aide de tableaux de Calcul, le poids (en tonnes d'équivalent carbone) des émissions de gaz à effet de serre poste par poste. Il convient d'entrer dans des feuilles de calculs les données d'activités disponibles (factures d'énergie, flux de matières premières, distances parcourues par les véhicules...). Le logiciel (du bilan carbone) prend en compte l'ensemble des émissions dues à l'activité et permet de définir le poids de chaque poste (énergie, procédés de fabrication, fret, transports, matériaux, déchets, utilisation des produits vendus, fin de vie des produits...).

L'analyse de ces données, en considérant la spécificité de l'activité ou du site industriel, permet d'agir en conséquence.[8]

III.3.1 Solutions techniques de traitement :

Le traitement des rejets de CO₂ fait appel à une chaîne d'étapes spécifiques qui peuvent être résumées sur la figure 3. Les émissions produites sont un mélange complexe de gaz carbonique mais aussi de vapeur d'eau, d'azote, d'oxygène... qu'il convient, dans un premier temps, d'enrichir ou, mieux encore, de séparer. La figure 3 présente des technologies utilisables pour des centrales thermiques importantes ou des sites industriels de grande

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

dimension. Afin de minimiser les volumes et les coûts de transport, il est nécessaire de compresser le gaz. Enfin, pour le traitement, deux voies possibles sont actuellement favorisées la valorisation et le stockage.

III.3.2 Enrichissement : capture du CO₂ dans les fumées :

L'enrichissement ou la capture vise à séparer le CO₂ des Autres éléments constitutifs des fumées (essentiellement Vapeur d'eau et azote) ou des flux de gaz.

- La capture est une étape nécessaire pour au moins deux raisons :
 - Les fumées de combustion contiennent en moyenne entre 3 et 15 % de dioxyde de carbone. En séparant le CO₂, il y a réduction des volumes à transporter et donc des coûts ;
 - les sites de stockage géologiques, adaptés au stockage de CO₂, nécessitent un certain nombre de caractéristiques, ils sont donc limités. Il faut alors stocker le dioxyde de carbone seul afin d'optimiser les capacités de stockage existantes.

En raison de leur coût d'investissement élevé, les techniques de captage du CO₂ sont plus adaptées aux sources d'émissions importantes et concentrées qu'aux sources de faible flux. Les centrales électriques (et notamment celles fonctionnant à partir de charbon) ainsi que, dans une moindre mesure, quelques autres installations industrielles (cimenteries, raffineries, installations de production d'engrais, de la sidérurgie et de la pétrochimie) sont à ce jour celles pour lesquelles la capture du CO₂ apparaît la plus intéressante.

Le captage du CO₂ peut être réalisé suivant trois procédés dépendants du type d'installation : la postcombustion, la précombustion et l'oxycombustion (Figure 2.12) .

Chacune de ces techniques se trouve à des stades de développement différents et est dotée d'avantages et inconvénients divers (technologies, coût, consommation énergétique...) :

III.3.3 Les concepts de séparation et captage :

Le captage du CO₂ constitue la partie la plus pénalisante en termes de coût de la chaîne captage-transport-stockage. La séparation du CO₂ des autres constituants présents dans les fumées (azote, argon et oxygène) est nécessaire pour limiter la consommation d'énergie lors de la compression du CO₂ avant le transport et pour limiter la quantité de gaz injecté dans le lieu de stockage. Trois concepts majeurs liés à la récupération du CO₂ se démarquentLe captage du CO₂ en post-combustion à partir des fumées grâce à un solvant chimique. L'oxycombustion qui consiste à brûler le combustible avec de l'oxygène séparé préalablement de

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

l'azote de l'air. Ce procédé permet de concentrer le CO₂ dans les fumées et d'en faciliter la récupération.

Le captage du CO₂ en pré-combustion s'effectue en amont du système de production d'électricité : conversion en gaz de synthèse (H₂ + CO) suivi d'une conversion du CO en CO₂ dans un réacteur shift.

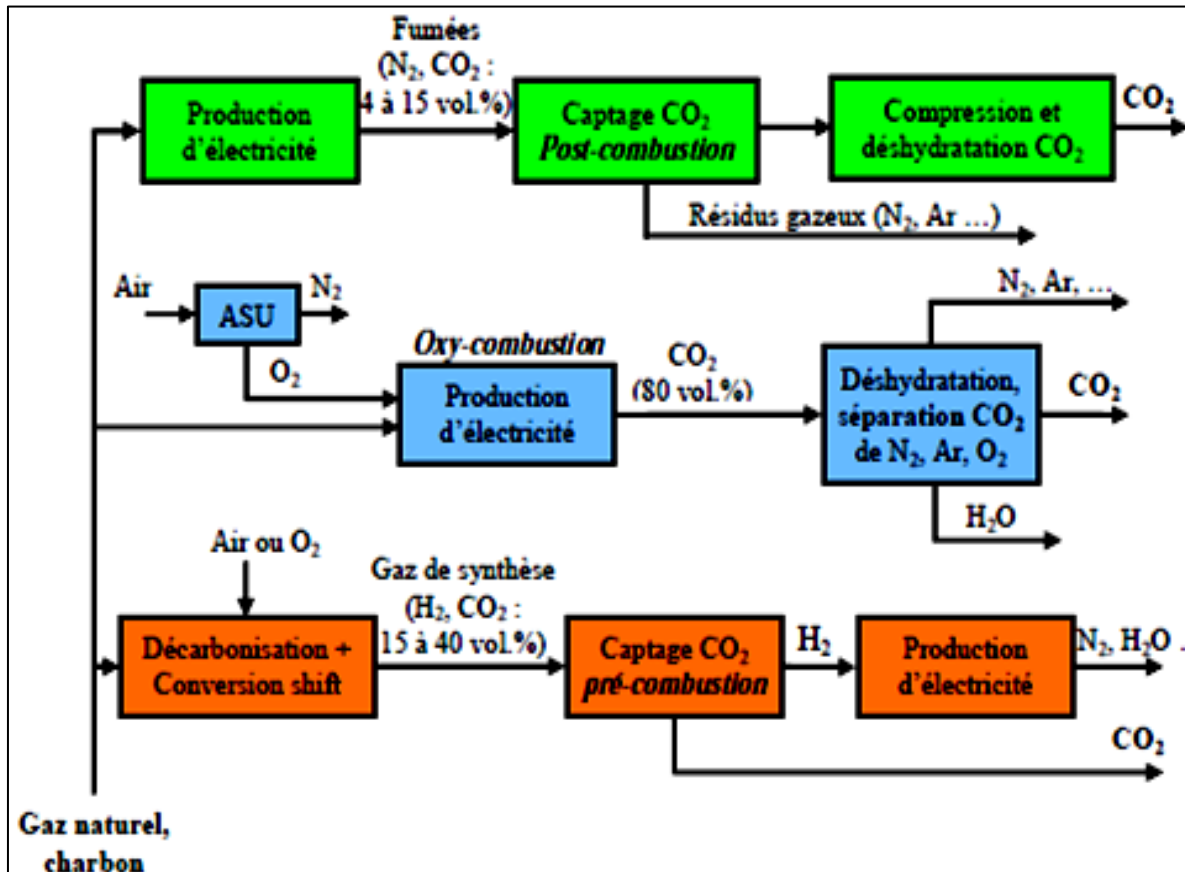


Figure III.4 : Modes des séparations intégrales aux différents types des centrales

III.3.4 La différence entre les méthodes de captage de CO₂ :

capture par pré-combustion :	pour capter le CO ₂ dans un gaz de synthèse après conversion du CO en CO ₂ ;
captage post-combustion:	capturer le CO ₂ dans les gaz d'échappement une fois que le carburant a été complètement brûlé à l'air ;

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

capture en oxy-combustion :	consiste en une combustion en oxygène avec recyclage des gaz d'échappement (composés principalement de CO ₂ et d'eau) et purification du flux de CO ₂ afin d'éliminer les gaz incondensables.
capture par pré-combustion :	pour capter le CO ₂ dans un gaz de synthèse après conversion du CO en CO ₂ ;
captage post-combustion:	capturer le CO ₂ dans les gaz d'échappement une fois que le carburant a été complètement brûlé à l'air ;
capture en oxy-combustion :	consiste en une combustion en oxygène avec recyclage des gaz d'échappement (composés principalement de CO ₂ et d'eau) et purification du flux de CO ₂ afin d'éliminer les gaz incondensables.

Tableau III .1: Les différences méthodes de captage

III.3.4.1 Captage du CO₂ en post-combustion :

Un procédé de captage post-combustion peut être mis en œuvre sur des centrales existantes sans modifications majeures du système de production électrique. L'objectif du captage du CO₂ en post-combustion est de récupérer le CO₂ présent dans les fumées en sortie de chaudière. Le principe repose sur l'utilisation de deux colonnes : une colonne d'absorption permettant de séparer le CO₂ des autres constituants gazeux à l'aide d'un solvant et une colonne de régénération permettant de récupérer le CO₂ sous forme gazeuse et de régénérer le solvant. La concentration en CO₂ dans les fumées dépend du combustible utilisé. Dans le cas d'une centrale NGCC, la concentration sera de l'ordre de 3-5 vol.%, alors que pour une centrale CP elle pourra atteindre entre 10 et 15 vol.%. Le charbon contenant plus de carbone par unité de masse, la quantité de CO₂ formé durant la combustion est plus importante. Les fumées étant récupérées à pression atmosphérique, la pression partielle en CO₂ est très faible.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

Il existe deux types de solvants physiques et chimiques ; pour séparer le CO₂ des autres constituants.

Les solvants physiques séparent le CO₂ des autres constituants gazeux par différence de solubilisation. Le CO₂, plus soluble, se retrouve sous forme moléculaire dans le solvant. Pour une concentration en CO₂ donnée dans le solvant, la thermodynamique associe une pression partielle du CO₂ à l'équilibre via la loi de Henry. Ainsi il y a absorption du CO₂ tant que la pression partielle en CO₂ à l'interface est supérieure à cette pression partielle à l'équilibre. Le flux d'absorption est alors proportionnel à la différence entre ces deux pressions. Les solvants physiques sont généralement utilisés pour les fortes pressions partielles. En pratique, les procédés utilisant des solvants physiques ne sont utilisés que pour des pressions partielles en CO₂ supérieures à 1,4 MPa .

Les solvants chimiques permettent, quant à eux, une bonne séparation du CO₂ même à faible pression partielle. Le CO₂ sous forme gazeuse se solubilise dans le solvant puis réagit avec une autre molécule (amine, carbonate de potassium...).

La réaction chimique permet de limiter la présence du CO₂ sous forme moléculaire dans le solvant et donc de diminuer la pression partielle en CO₂ à l'équilibre. La réaction chimique est reliée au facteur d'accélération E qui représente le rapport entre le flux moyen d'absorption en présence de réaction chimique et le flux moyen d'absorption en l'absence de réaction chimique. La réaction chimique permet d'augmenter le gradient de concentration du CO₂ à l'interface gaz-liquide et donc d'augmenter le flux d'absorption.

Les solvants chimiques sont généralement des solutions aqueuses à base d'amines. Le groupement amine assure la basicité de la solution nécessaire à la réaction avec les gaz acides. Ces amines sont classées suivant le degré de substitution de leur atome d'azote.

Pour le captage du CO₂, les amines les plus utilisées sont : la monoéthanolamine (MEA) ; la diglycolamine (DGA) ; la diéthanolamine (DEA) ; la diisopropanolamine (DIPA) ; la N-méthyl-diéthanolamine (MDEA) et la Triéthanolamine (TEA).

Ces dernières années, des nouvelles amines ont été développées pour diminuer le surcoût énergétique lié au captage du CO₂. Il s'agit d'amines à encombrement stérique. La réaction du CO₂ avec ces amines forme un carbamate instable à cause de la configuration géométrique de la molécule. L'amine à encombrement stérique la plus connue est la 2-amino-2-méthyl-1-propanol (AMP). Deux caractéristiques principales sont à prendre en compte lorsqu'on utilise un solvant chimique. D'abord la cinétique de la réaction d'absorption du CO₂ : les amines primaires sont plus réactives que les amines secondaires, elles-mêmes plus réactives que les

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

amines tertiaires. La vitesse d'absorption du CO₂ influera sur le dimensionnement de la colonne d'absorption et donc sur le coût d'investissement du procédé de captage.

Ensuite la solubilité du CO₂ dans le solvant : une amine réactive avec le CO₂ permettra d'avoir une très bonne solubilité du CO₂ mais sera plus difficilement régénérable. [9]

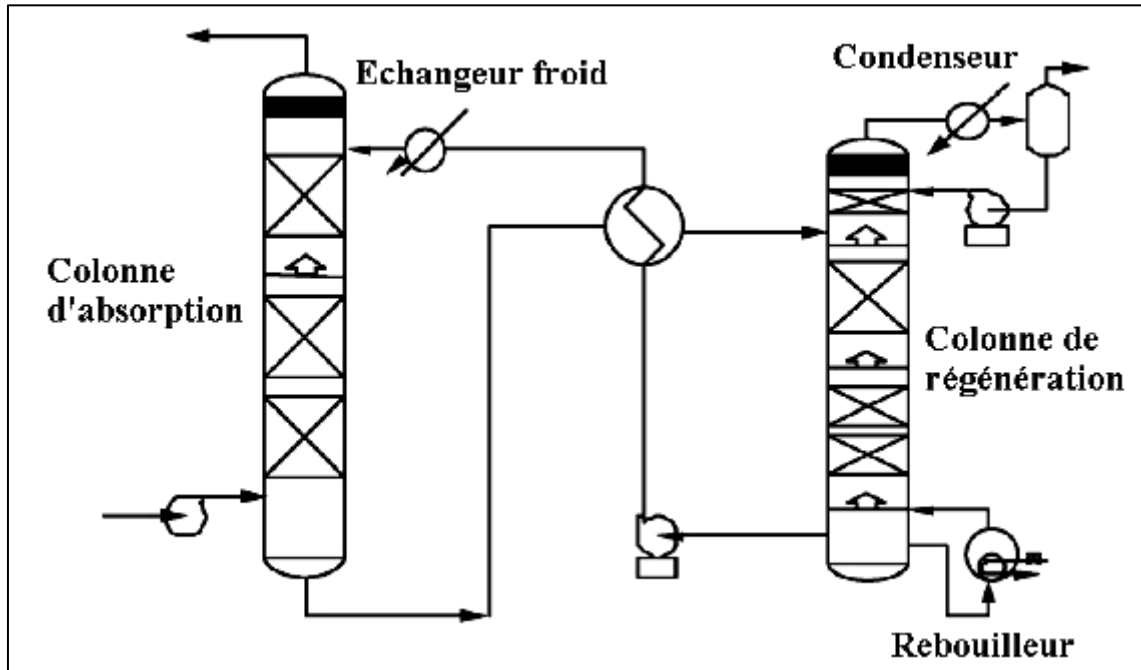


Figure III.5 : Concept de séparation du CO₂ en post-combustion

III.3.4.2 Captage du CO₂ en pre-combustion :

Le combustible (charbon ou gaz naturel) est converti, avant le système de production d'électricité, en un gaz de synthèse composé de H₂, CO et CO₂. Il est alors possible de séparer le carbone de l'élément énergétique H₂ en amont de la chambre de combustion. Dans le cas du charbon, la conversion du combustible se fait dans des gazéificateurs où se déroule la combustion partielle du charbon à l'oxygène. On parle alors de centrale Cycle Combiné à Gazéification Intégrée (IGCC). Dans le cas du gaz naturel, on fait appel à un four de reformage, procédé bien connu dans les usines de production d'ammoniaque et de dihydrogène. L'étude sur les IGCC a été réalisée dans .Dans cette revue seul le reformage du gaz naturel est abordé.

Le reformage du gaz naturel consiste en la conversion des hydrocarbures en gaz de synthèse contenant du CO et du H₂. Cette opération se déroule dans un four catalytique. Quand le reformage est associé au captage du CO₂, des réacteurs catalytiques de conversion shift sont utilisés pour convertir, en présence d'eau, le CO en CO₂ et H₂. Le gaz de synthèse est alors très riche en CO₂ et H₂. Dans la suite, on assimilera, pour simplifier les annotations, le gaz naturel au méthane, composant majoritaire. Il existe trois types de reformage. Le reformage à

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

la vapeur qui consomme beaucoup de vapeur (rapport molaire H₂O/C > 2, en général 3). Ce reformage nécessite un apport d'énergie externe pour produire la vapeur alimentant le four de reformage, pour fournir la chaleur nécessaire à la réaction endothermique entre l'hydrocarbure et l'eau et les pertes thermiques. L'oxydation partielle consiste en la combustion des hydrocarbures avec un apport d'oxygène limité. Cette réaction est exothermique. Ce procédé a un rendement modéré. Le reformage auto-thermique combine les deux techniques citées ci-dessus. On injecte dans le four de reformage le gaz naturel, la vapeur d'eau et l'oxygène.

L'oxygène provient soit d'une ASU soit d'un flux d'air. Le méthane réagit alors avec l'oxygène. La réaction exothermique fournit la chaleur nécessaire aux réactions endothermiques.[9]

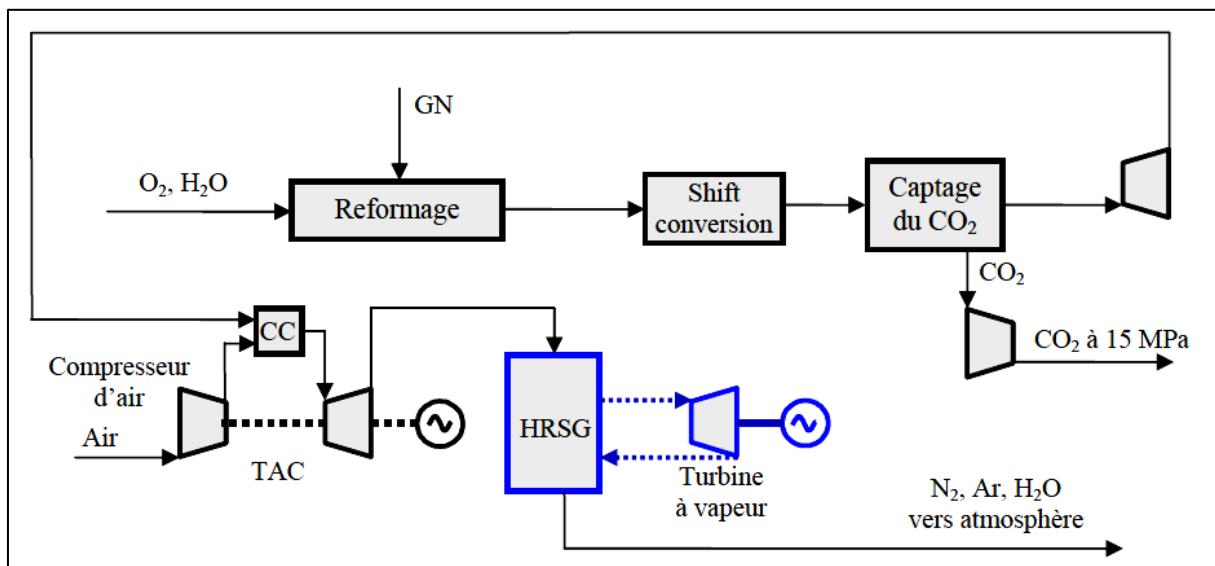


Figure III.6 : Concept de séparation en pré-combustion

III.3.4.3 Captage du CO₂ grâce à l'oxy-combustion :

Avec une combustion à l'air, la concentration du CO₂ dans les fumées est de l'ordre de 3 à 15 vol. % suivant le type de combustible. L'azote présent dans l'air constitue le principal diluant. Les procédés d'absorption chimique, permettant une séparation CO₂-N₂, entraînent des surcoûts énergétiques importants. L'oxy-combustion a pour objectif d'éviter la dilution à l'azote en brûlant le combustible avec de l'oxygène quasiment pur.

La combustion donne des fumées riches en CO₂ et H₂O. La récupération du dioxyde de carbone est alors plus aisée. Le concept d'oxy-combustion appliqué aux centrales thermiques est communément appelé concept O₂/CO₂.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

Lorsque l'oxy-combustion est appliquée à une centrale électrique de type NGCC ou CP, il faut qu'une partie des fumées sortant de la chaudière de récupération de chaleur soit recyclée pour contrôler la température de flamme dans la chambre de combustion. Dans le cas d'une centrale NGCC, environ 90% des fumées sont recyclées contre 70% pour une centrale CP. Une petite partie des fumées est alors traitée pour séparer le CO₂, permettant une réduction de la taille des installations. La Figure 6 représente le schéma de principe d'une centrale NGCC convertie pour un fonctionnement en oxy-combustion. La centrale électrique peut être découpée en quatre éléments principaux :

L'ASU qui fournit l'oxygène nécessaire à la combustion du gaz naturel, la turbine à combustion (TAC), la chaudière de récupération de la chaleur avec les turbines à vapeur (TAV) et le procédé de séparation du CO₂ situé en aval du système de production d'électricité. L'oxy-combustion a lieu dans la chambre de combustion(CC) de la turbine à combustion. [9]

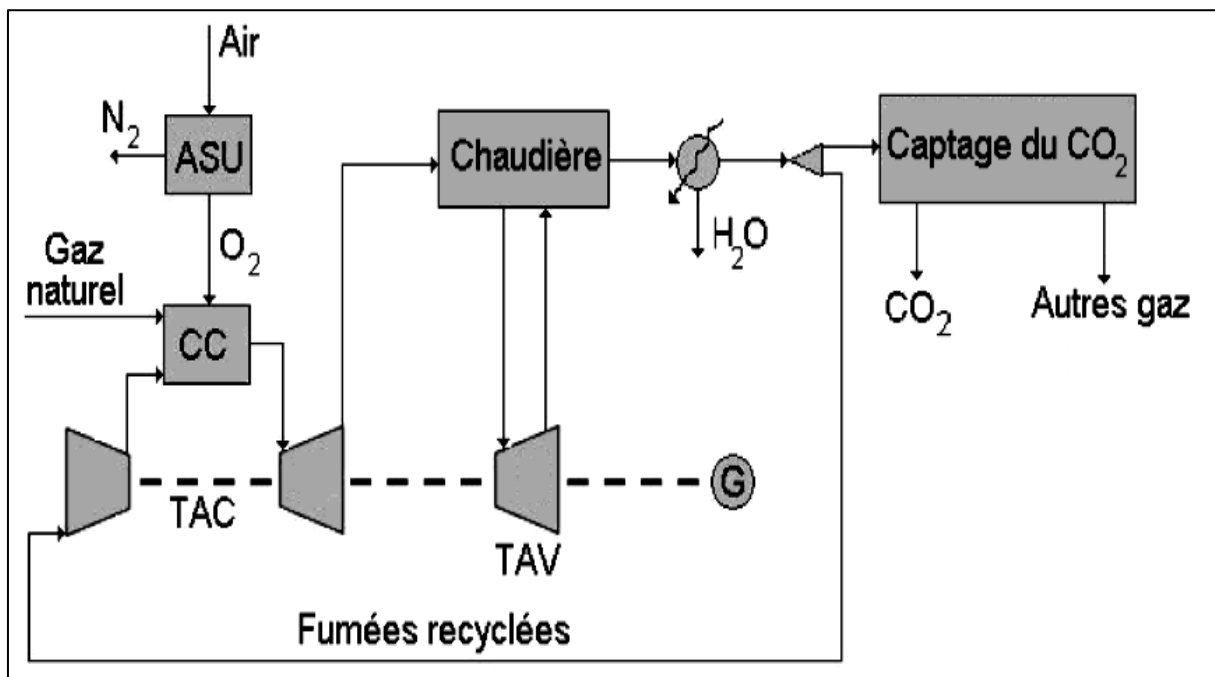


Figure III.7 : Concept de séparation de en oxy-combustion

III.4 Méthode de séparation :

III.4.1 Absorption appliquée à la séparation :

Un solvant chimique ou physique ayant des affinités pour le CO₂ est utilisé. Un schéma d'un procédés d'absorption est montré sur la figure suivante :

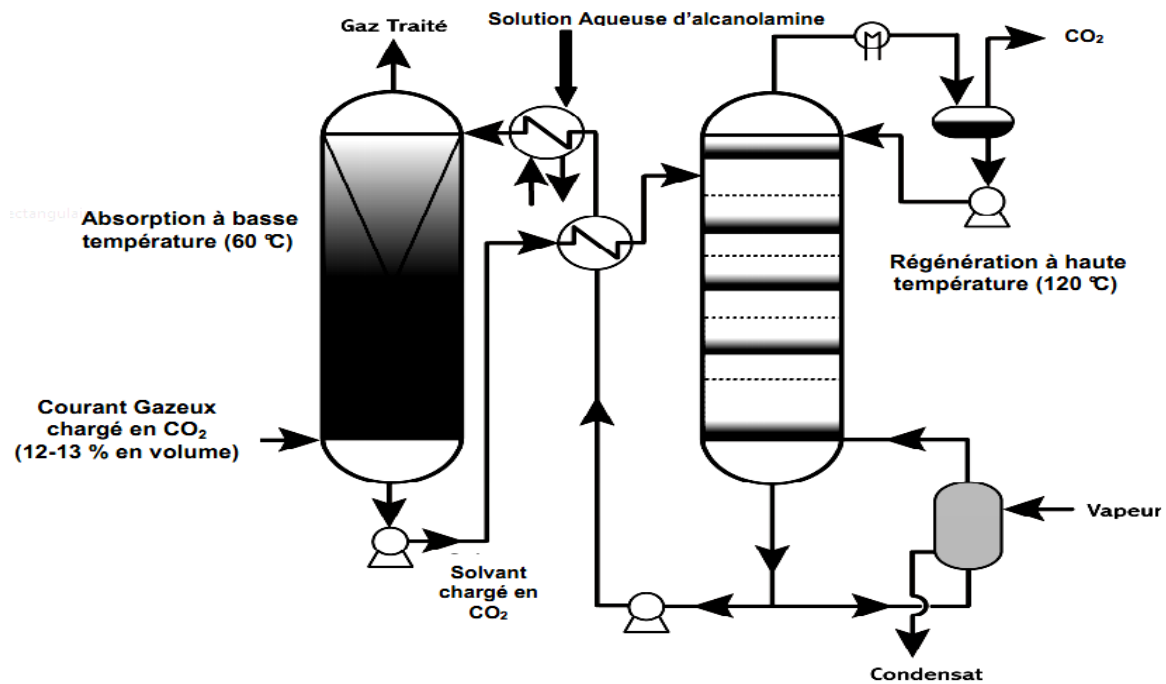


Figure III.8 : Procédé d'absorption pour la séparation du CO₂ des effluents

Le procédé comporte deux colonnes, la première, dite colonne d'absorption ou absorbeur, fonctionne en mode absorption et assure le traitement de la fumée alors que la deuxième fonctionne en mode régénération.

Le gaz de poste –combustion est refroidit entre 40 et 60 °C avant son introduction dans la colonne d'absorption. Ensuite, il est introduit en bas de la colonne, à contre –courant avec le solvant. Ainsi, le dioxyde de carbone est dissout dans le cas d'un solvant physique (Diméthylether de polyéthylène Glycol).

Avant de quitter la colonne d'absorption, le gaz appauvri en CO₂ passe dans une section de lavage à l'eau se trouvant en tête de l'absorbeur pour enlever les vapeurs de solvant qu'il est susceptible de contenir.

Le solvant riche en gaz carbonique est récupéré en bas de l'absorbeur. un système de pompe permet de faire passer dans la colonne de régénération.

Avant son introduction dans la colonne de régénération, le solvant est préchauffé, la régénération a lieu à une température comprise entre 100 et 140 °C et une pression qui avoisine la pression atmosphérique.

L'un des principaux inconvénients du procédé d'absorption est le coût énergétique élevé du préchauffage du solvant à l'entrée de la colonne de régénération et de production de la vapeur d'eau nécessaire pour le stripping.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

La vapeur d'eau qui sort en tête de la colonne de régénération est condensée. Le CO₂ ainsi récupéré a une pureté supérieure à 99%. En effet, grâce à la haute sélectivité des absorbeurs chimiques, seul le dioxyde de carbone est fixé.

Le CO₂ produit contient principalement des traces de solvant ou de composés obtenus à partir de la décomposition du solvant et qui sont entraînés par la vapeur d'eau.

Un autre inconvénient lié à l'utilisation du procédé d'absorption est celui de la corrosion.

Pour la limiter, certains inhibiteurs de corrosion comme la Pipérazine sont souvent mélangés au solvant.

Il faut également savoir que certains gaz acides comme le SO₂ peuvent réagir avec la solution d'alcanolamine. Pour remédier à ce problème, des solutions alcalines comme la soude sont ajoutées. Ceci conduit à la formation de sels stables d'alcalins.

Le solvant régénéré est refroidi et réintroduit en tête de l'absorbeur. Il est nécessaire d'assurer un apport continu de solution d'alcanolamine pour compenser les pertes différentes pertes de solvant.

III.4.2 Séparation membranaire :

Ils sont basés sur la diffusion sélective d'un ou plusieurs composés à travers une membrane sélective.

Dans un séparateur membranaire, les membranes sont intégrées dans un support pour former ce qu'on appelle un module, un schéma type de ce procédé est proposé sur la figure II.17

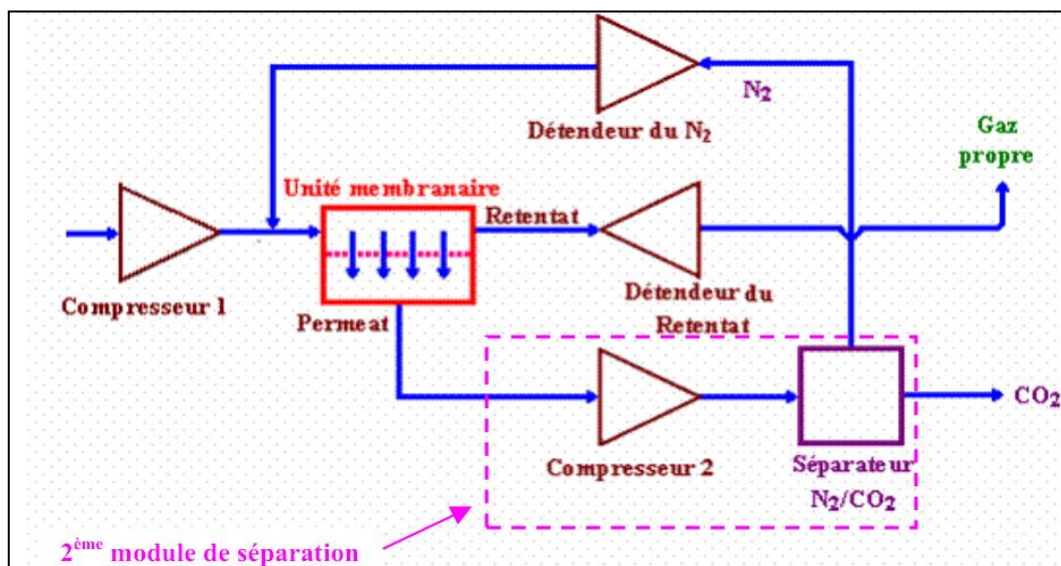


Figure III.9 : Schéma de principe simplifié d'un procédé membranaire pour la capture de dioxyde de carbone

Les fumées riches en dioxyde de carbone issues par exemple d'une centrale thermique sont comprimées avant d'entrer dans l'unité membranaire ou le module.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

Le dioxyde de carbone traverse la membrane et est récupère dans le permeat .le retentat appauvrit en gaz carbonique passe dans un détendeur avant d'être renvoyé dans l'atmosphère
La pureté de dioxyde de carbone dans le permeat dépend de la sélectivité de la membrane utilise .suivant la pureté souhaite .il peut être nécessaire d'ajouter un deuxième module de séparation en série avec le premier en sortie de deuxième séparateur le dioxyde de carbone est récupère dans le permeat, le retentat riche N₂ est soit renvoyé dans l'atmosphère soit mélange a la fumée a traite a l'entrée du premier séparateur

L'efficacité de procède membranaire dépend de la perméabilité et la sélectivité de la membrane .les membrane les mieux adaptes a la récupération du dioxyde de carbone sont de type organique (polysulphone, polyamides, dérivés de cellulose) ou inorganique (métallique, céramique ...)

Pour que le procède membranaire soit en compétition avec les autres procédés de capture de dioxyde de carbone, il est nécessaire de produire des membranes plus perméable et plus sélectives .la sélectivité CO₂/N₂ souvent motionné se située entre 100 et 200

Une nouvelle méthode combinant le procède membranaire et le procordé absorption en cour d'étude a l'échelle de laboratoire .elle consiste a utilisé des contacteurs membranaire dont le principe est montre sur la figure II.18

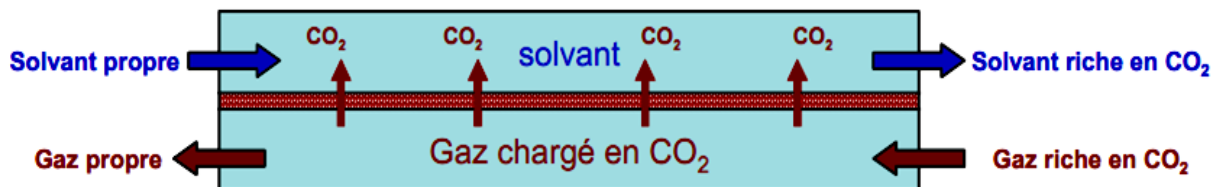


Figure III.10 : Schéma d'un contacteur membranaire

Le gaz riche en dioxyde de carbone est en contact avec l'une des deux faces de la membrane .

l'autre face est en contact, avec un solvant (carbonates, amines, hydrates de sel fondus ...) les membranes actuellement testées sont des membranes poreuses et des membranes échangeuses d'ions.

Les principaux problèmes lies a l'utilisation de cette méthode sont d'une part la stabilité des membranes utilises et la volatiles des solvants. De plus la sélectivité de système décroît avec la pression partielle de CO₂ dans l'alimentation .ceci est du a la saturation de solvant qui limite le transfert de CO₂ a travers la membrane .De plus l'augmentation de la pression total de l'alimentation entraine le passage des autre gaz a travers la membrane ce qui a comme

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

conséquence la baisse de la sélectivité .la faible épaisseur des membranes utilisées est aussi à l'origine de la baisse de la sélectivité du système .

III.4.3 Séparation cryogénique :

Il s'agit de séparer le dioxyde de carbone du reste de la fumée par simple changement de phase du a une diminution de température et une augmentation de la pression

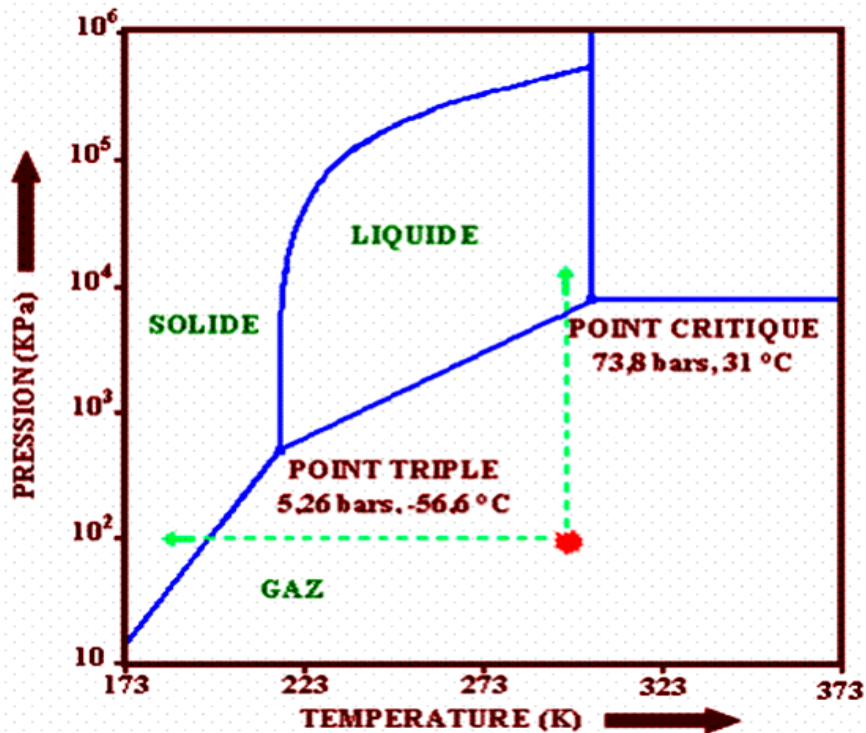


Figure III.11 : Diagramme de phase du dioxyde de carbone

Considérons une fumée en sortie d'une centrale électrique classique .elle est à 1 bar et à 120 °C et contient environ 15% en volume de CO2.

Pour transformer le dioxyde de carbone qu'elle contient en liquide, le point le plus bas du diagramme de phase à atteindre est le point critique, soit une température d'environ -57 °C

Pour récupérer 90% du CO2 contenu dans la fumée il faut comprimer cette dernière jusqu'à environ 350 bars. Cette pression est de 750bars si on veut récupérer 95% du CO2.dans le cas d'une centrale IGCC, la fumée est à environ 24bars et contient 40% de dioxyde de carbone en volume .pour récupérer 90% du CO2 qu'elle contient, il faut la comprimer jusqu'à 131,5bars.

La séparation du CO2 des fumées par distillation à très basses températures est très coûteuse .actuellement, cette technique n'est pas en compétition avec les autres techniques de récupération du CO2 en post-combustion .Elle demande encore beaucoup de développement avant d'arriver au stade de la commercialisation industrielle.

III.4.4 Adsorption solide – gaz :

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

Les adsorbants utilisés peuvent être de différentes natures. On recherche des matériaux de très grandes surfaces spécifiques, qui ont une distribution de pores permettant d'effectuer une adsorption plus ou moins sélective et dont des fonctions de surface favorisent le piégeage du CO₂. On peut citer par exemple : les tamis moléculaires, l'alumine, les zéolithes [26] ou encore les charbons actifs dont le rôle essentiel du volume nanoporeux a été démontré [27]. Le procédé est relativement simple. Il consiste à mettre en œuvre deux adsorbants en parallèle remplis d'adsorbants. Chaque réacteur travaille alternativement en adsorption et en régénération (figure 2.20).

Deux processus physiques sont utilisés pour l'adsorption-désorption : soit par différence de pression (PSA : pressure swing adsorption) soit par différence de température (TSA : température Swing adsorption). L'adsorption PSA est plus intéressante que l'adsorption TSA en raison de sa consommation énergétique moindre et de son taux de régénération rapide [28]. En utilisant le caractère acide du CO₂, il est possible de le piéger sur des amines solides. Après saturation, les adsorbants sont régénérés par de la vapeur d'eau. Des cycles alternatifs adsorption-désorption sont réalisés. Dans une approche similaire, des hydroxydes métalliques comme l'hydroxyde de lithium (LiOH), la potasse (KOH) ou la chaux vive (CaO) ont été mis en œuvre pour éliminer le CO₂ d'ambiance confinée ou en milieu médical. La capacité d'adsorption théorique est estimée à 500 L • kg⁻¹ mais expérimentalement elle est comprise entre 200 et 400 L • kg⁻¹ suivant les mises en œuvre.

Dans le cas des matériaux du type fibres de carbone activé (tamis moléculaires), des unités ont été conçues et réalisées en utilisant un chauffage électrique pour la désorption. En effet, ce matériau étant légèrement conducteur de l'électricité du fait de structure de graphènes (couches constituées de quelques motifs graphitiques), il peut être chauffé par effet Joule. Des cycles d'adsorption et d'électro-désorption sont alors réalisés.

Le principal avantage de cette technique de séparation réside dans le fait que le système fonctionne en continu avec une utilisation de l'adsorbant pour de très nombreux cycles. Cependant, ce procédé ne peut être employé pour des concentrations élevées en CO₂ (traitement de concentration < 1 à 2 %), ce qui peut poser problème pour le traitement des fumées. De plus, les adsorbants utilisés ne sont pas assez sélectifs du fait de leur porosité et sont susceptibles de laisser passer les molécules de gaz dont la taille est inférieure à celle du CO₂, comme le N₂.

Enfin, l'adsorption est un procédé relativement lent, ce qui le rend peu approprié aux traitements de trop forts débits de fumées

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

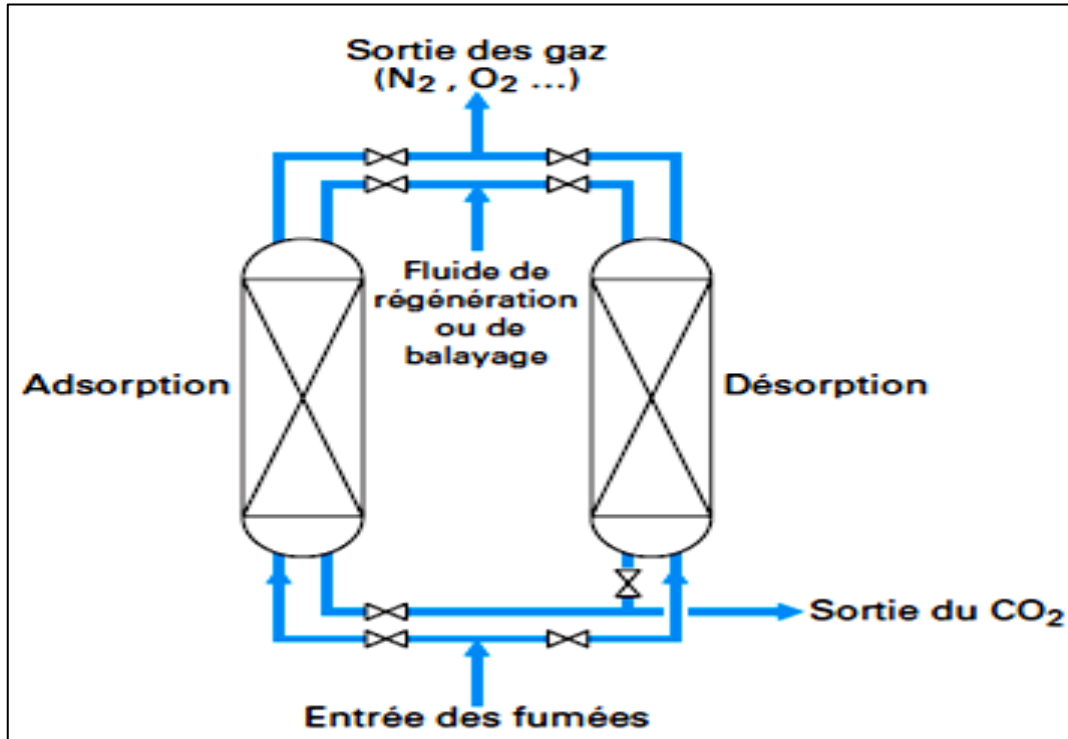


Figure III.12 : Procédé d'adsorption solide – gaz

III.5 Glace carbonique :



Figure III.13 : Formes de glace carbonique

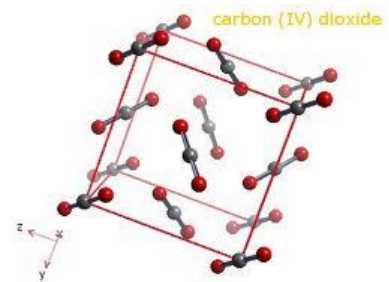
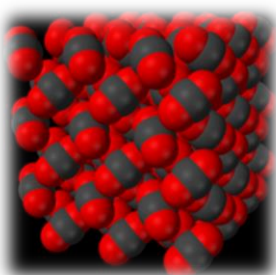


Figure III.14 : Structure cristalline de glace carbonique

III.6 Schéma de la phase du composé CO₂ :

Le processus de sublimation est très similaire au processus de distillation. Le terme distillation est utilisé pour passer de liquide à vapeur après refroidissement, il devient liquide ou solide. La sublimation est le processus consistant à transformer la forme des solides directement en vapeur sans passer par une forme liquide et après avoir subi un refroidissement directement condensé à nouveau en solides.

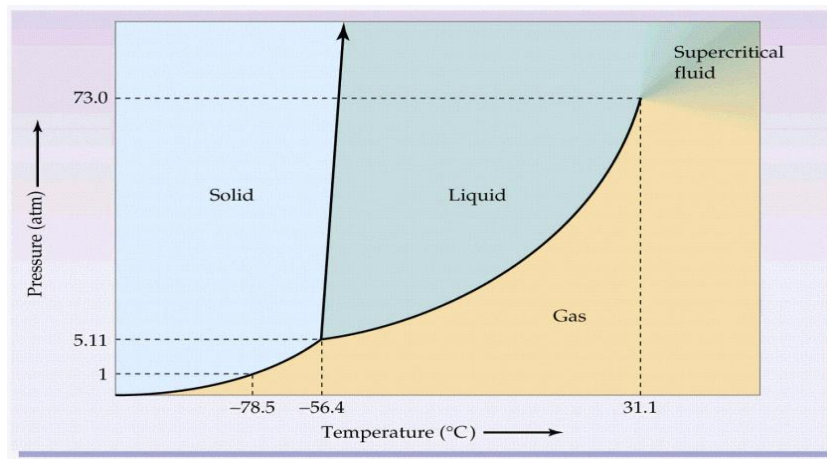


Figure III.15 : Diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone, montrant le point triple et le point critique.

La ligne entre le solide et le liquide est une courbe d'équilibre entre le liquide et la vapeur, la ligne entre le liquide et le gaz est un équilibre entre le gaz et le liquide, tandis que la ligne entre le solide et le gaz est un équilibre entre le solide et le gaz. Les trois courbes se croisent en un point appelé le point triple où les trois phases sont en équilibre.

Le point de fusion normal d'un composé est la température à laquelle les solides et les liquides sont en équilibre à une pression de 1 atmosphère.

Si le système est abaissé au-dessous du point triple, les substances de l'état de vapeur peuvent être directement condensées en solides ou inversement, ce processus est appelé sublime. Dans certaines substances, la pression de vapeur au point triple est à la température ambiante, de sorte que la substance peut subir une sublimation à la température ambiante. Par exemple, la température au point triple est de 79 ° C et la pression de vapeur de 370 mmHg.

Le dioxyde de carbone (CO₂) au point triple est à 56,4 ° C et la pression de vapeur à 5,11 atm.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

III.7 Définition de la glace sèche :

La glace sèche est une forme solide de dioxyde de carbone (formule chimique de CO₂),



Qui consiste en deux atomes d'oxygène liés à un seul atome de carbone, le dioxyde de carbone lui-même est un gaz libéré à la suite de la respiration et de la combustion d'hydrocarbures. Cette neige carbonique est incolore, dégage une odeur acidulée, n'est pas inflammable et est légèrement acide.

La densité de la glace carbonique varie, mais varie généralement entre 1,4 et 1,6 g / cm³ (87-100 lb/ pi³).

Les basses températures et la sublimation directe au gaz font de la neige carbonique un refroidisseur efficace.

La première personne à avoir observé la présence de CO₂ solide a été le chimiste français Charles Thilorier en 1835, lors de l'ouverture d'un conteneur de dioxyde de carbone liquide sous pression. À une forme comme la glace ou la neige.

La masse des types de neige carbonique varie généralement entre 1,2 et 1,6 kg / dm³.

La masse moléculaire de la neige carbonique est de 44,01 g / mol.

III.8 Le processus de formation ou de fabrication de glace carbonique :

Le dioxyde de carbone (CO₂) à des températures inférieures à -56,4 ° C (-69,5 ° F) et à une pression inférieure à 5,13 atm (point triple) formera directement des solides sans passer par la phase liquide. La formation de solides de la phase gazeuse ou solide en gaz sans passer par la phase liquide est appelée sublimation. Les solides de CO₂ formés sont appelés neige carbonique. À la pression atmosphérique, la sublimation / dépôt se produit à -78,5 ° C (-109,3 ° F).

Lors de la fabrication de neige carbonique en usine, le CO₂ qui est normalement à la température ambiante et à une pression de 1 atmosphère forme un gaz, est refroidi et reçoit une pression importante pour devenir un objet solide (pour devenir de la neige carbonique).
Glace Pour compresser le CO₂ sous forme de gaz, des températures exceptionnellement basses sont nécessaires. À une pression normale de 1 atmosphère, la température minimale de condensation du CO₂ est de -78,5 ° C (-109,3 ° F).

Bien qu'à des fins de recherche en laboratoire, les chercheurs n'aient besoin que d'une petite quantité de neige carbonique. On peut fabriquer de la glace carbonique en ouvrant le robinet

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO₂ ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

d'un réservoir de dioxyde de carbone liquide et en plaçant un sac en tissu sur l'embouchure du robinet. Un mélange de gaz carbonique et de neige carbonique est produit lorsque le gaz est liquide condensation détachée sur le tissu. Cette méthode est suffisamment efficace pour fabriquer de petites quantités de neige carbonique pour une utilisation en laboratoire.

Pour produire une plus grande quantité de neige carbonique, un refroidissement par évaporation est nécessaire. Le dioxyde de carbone liquide est produit en comprimant le dioxyde de carbone. Étant donné que la température d'une substance augmente lorsqu'elle est comprimée, le gaz doit être refroidi pendant le processus de compression pour favoriser la formation de liquide. Si le gaz dans le réservoir a atteint la température ambiante, la fusion commence lorsque la pression atteint environ 6 000 KPa. Pour information, dans les segments matériels, il y aura certaines molécules qui vont très vite et d'autres beaucoup plus lentement. La vitesse moyenne de déplacement de toutes ces molécules est ce qu'on appelle la température. Si le robinet d'un tube de dioxyde de carbone liquide est ouvert, certains d'entre eux tenteront de s'échapper, ce qui fera chuter l'élan de la molécule moyenne et la température. Une fois que toute la chaleur ambiante s'est évaporée, la température du liquide tombe en dessous de zéro et un dioxyde de carbone solide apparaît, appelé glace sèche.

La glace sèche est généralement stockée dans des conteneurs isolés. Lorsqu'elle est exposée à l'air, cette glace libère immédiatement du dioxyde de carbone. Comme la différence de température entre la neige carbonique et l'environnement est assez grande, les changements de phase se produisent directement du solide au gaz, sans passer par la phase liquide.

Le congélateur de notre réfrigérateur à la maison n'est pas assez froid pour condenser le CO₂. À une pression normale de 1 atmosphère, le CO₂ ne présente pas de phase liquide. Donc, si la neige carbonique (CO₂ solide) est chauffée à la température ambiante, elle passera immédiatement du solide au gaz. C'est pourquoi ce CO₂ solide est appelé neige carbonique, car si la glace fond dans la glace ordinaire, elle fond à la température ambiante, elle s'évapore directement en gaz sans avoir à fondre pour que la zone environnante devienne sèche.[9]

III.9 Les Avantages de la glace sèche :

L'avantage de la neige carbonique est que sa température est inférieure à celle de la glace et ne laisse aucun résidu. De plus, la neige carbonique est largement utilisée car sa fabrication est assez simple et facile à manipuler avec des gants isolants.

Certains des avantages de la neige carbonique sont les suivants :

1. Garder les aliments congelés au froid dans un endroit dépourvu de machine de réfrigération. parce que la température est très froide, à savoir : -78.5oC ou -109.3 ° F.

CHPITRE III : APPLICATION PRATIQUE DU BILAN DU CO2 ET FORMATION OU FABRICATION DE GLACE

2. En tant que caloporteur et donneur de fumée sur scène, fumez généralement des concerts au pied de la scène en utilisant de la neige carbonique. La fumée ne monte pas au sommet car elle a une densité supérieure à celle de l'air.

3. Les expositions laser utilisent aussi couramment de la neige carbonique pour disperser la lumière laser afin de la rendre plus visible.

4. Utilisé dans le processus de conservation du poisson. La glace sèche est généralement utilisée en l'ajoutant à un moyen de refroidissement de la glace, de sorte que la capacité d'absorption de la chaleur du poisson est supérieure à celle d'un moyen de glace. La vitesse de diminution de la température est plus rapide en raison de la forte absorption de chaleur due au point de température de sublimation bas de la neige carbonique, qui se situe autour de $-78,5^{\circ}\text{C}$ (Junianto, 2003). Selon Ilyas (1983), la chaîne du froid est un effort visant à maintenir la qualité du poisson pour le conserver au frais en utilisant des températures basses (0°C ou quelques degrés Celsius au-dessus de 0°C) lors des activités de manipulation destinées à atteindre les consommateurs.

III.10 Les inconvénients de la glace carbonique :

1. Le contact direct avec la neige carbonique peut provoquer des brûlures de froid. Par conséquent, vous devriez éviter le contact direct entre la glace sèche et les membres. Cela peut être fait en utilisant des gants.

2. Même si la neige carbonique et le dioxyde de carbone ne sont pas toxiques, l'utilisation de la neige carbonique peut entraîner un danger de respiration car elle remplace l'air près du sol ou lorsqu'elle se mélange à l'air. Il y aura donc un excès de dioxyde de carbone et moins d'oxygène lors de la respiration. Bien ventilé.

3. Ne scellez pas la neige carbonique dans un verre ou un autre récipient fermé, car une accumulation de pression peut causer des dommages ou une explosion.

4. Ne pas avaler ni manger de la neige carbonique. Si vous avez faim, mangez du riz.

5. La glace sèche dans votre boisson peut réellement apporter de la mousse et de la fraîcheur. Le CO_2 contenu dans l'eau se transformera en acide carbonique faible et instable (H_2CO_3), qui redeviendra ensuite de l'eau et du CO_2 , ce qui produira un effet de mousse et une sensation de fraîcheur semblable à celle des boissons gazeuses.

CHAPITRE IV :
ETUDE THEORIQUE DE LA
TRANSFORMATION DE
CO₂ EN GLACE
CARBONIQUE

IV.1 CEPARATION ET CAPTAGE :

IV.1.1 Principe :

Le captage en post-combustion est une option envisageable à court terme. Le lavage de gaz par un solvant chimique ou physique est utilisé depuis de nombreuses années pour la production d’ammoniaque et la purification du gaz naturel. Un procédé de captage post-combustion peut être mis en application sur des centrales existantes ce qui est le cas de cette étude pour la centrale de CAP DJINET sans modifications majeures du système de production électrique.

L’objectif du captage du CO2 en post-combustion est de récupérer le CO2 présent dans les fumées en sortie de chaudière. Le principe repose sur l’utilisation de deux colonnes :

Une colonne d’absorption permettant de séparer le CO2 des autres constituants gazeux à l’aide d’un solvant et une colonne de régénération permettant de récupérer le CO2 sous forme gazeuse et de régénérer le solvant.

La concentration en CO2 dans les fumées dépend du combustible utilisé. Dans le cas d’une centrale NGCC, la concentration sera de l’ordre de 3-15 vol.%,. Les fumées étant récupérées à pression atmosphérique, la pression partielle en CO2 est très faible. Il existe deux types de solvants pour séparer le CO2 des autres constituants :

- Les solvants physiques séparent le CO2 des autres constituants gazeux par différence de solubilisation. Le CO2, plus soluble, se retrouve sous forme moléculaire dans le solvant. Pour une concentration en CO2 donnée dans le solvant, la thermodynamique associe une pression partielle du CO2 à l’équilibre via la loi de Henry.

$$P_{CO_2} = H_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \dots\dots\dots 1.$$

Avec P_{CO_2} la pression partielle en C_{CO_2} , H_{CO_2} , est constante de la loi de Henry associée au, CO2, et C_{CO_2} la concentration en CO2 dans le solvant.

Le flux d’absorption physique peut alors s’écrire avec la formule suivante :

$$\varphi^0 = -D_{CO_2} \left(\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right)_i = k_L \cdot (C_{CO_2} - C_{CO_2,s}) = \frac{k_L}{H_{CO_2}} \cdot (P_{CO_2,i} - P_{CO_2,s}) \dots\dots\dots 2.$$

Avec φ^0 le flux spécifique moyen d’absorption par unité d’aire interfaciale gaz-liquide en l’absence de réaction chimique (mol. m⁻².s⁻¹), D le coefficient de diffusion (m².s⁻¹), k_L le coefficient de transfert de matière côté liquide (m.s⁻¹), $C_{CO_2,i}$ la concentration en CO2 à

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

l'interface gaz-liquide, $C_{CO_2,s}$ la concentration en CO₂ au sein du liquide, $P_{CO_2,i}$ la pression partielle en CO₂ à l'interface gaz-liquide en équilibre avec $C_{CO_2,i}$ et $P_{CO_2,s}$ la pression partielle en CO₂ à l'équilibre avec $C_{CO_2,s}$.

Ainsi il y a absorption du CO₂ tant que la pression partielle en CO₂ à l'interface est supérieure à cette pression partielle à l'équilibre. Le flux d'absorption est alors proportionnel à la différence entre ces deux pressions. C'est pourquoi les solvants physiques sont généralement utilisés pour les fortes pressions partielles. En pratique, les procédés utilisant des solvants physiques ne sont utilisés que pour des pressions partielles en CO₂ supérieures à 1,4 MPa (Jensen et al. 2005).[[10]

- **Les solvants chimiques** permettent, quant à eux, une bonne séparation du CO₂ même à faible pression partielle. Le CO₂ sous forme gazeuse se solubilise dans le solvant puis réagit avec une autre molécule (amine, carbonate de potassium...). La réaction chimique permet de limiter la présence du CO₂ sous forme moléculaire dans le solvant et donc de diminuer la pression partielle en CO₂ à l'équilibre. Cela permet une séparation du CO₂ même à faible pression partielle. La réaction chimique est reliée au facteur d'accélération E qui représente le rapport entre le flux moyen d'absorption en présence de réaction chimique et le flux moyen d'absorption en l'absence de réaction chimique :

$$\varphi_{CO_2} = E \cdot k_L \cdot (C_{CO_2,i} - C_{CO_2,s}) = \left(\frac{E \cdot k_L}{H_{CO_2}} \right) \cdot (P_{CO_2,i} - P_{CO_2,s}) \dots\dots\dots 3.$$

Avec φ le flux spécifique moyen d'absorption par unité d'air inter faciale gaz-liquide en présence de réaction chimique (mol. m⁻².s⁻¹).

La réaction chimique permet d'augmenter le gradient de concentration du CO₂ à l'interface gaz-liquide (FigureIV.1) et donc d'augmenter le flux d'absorption.

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

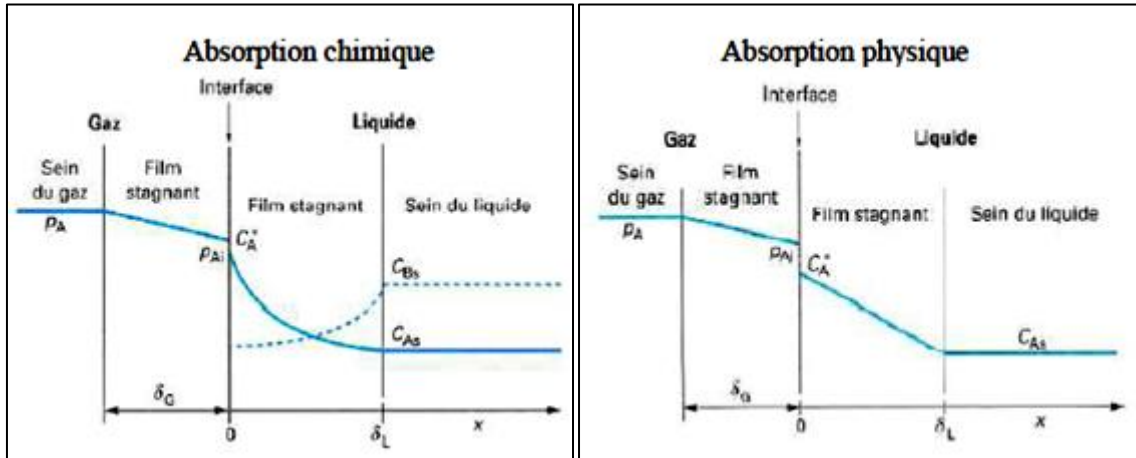


Figure IV.1 : Absorption physique - Absorption chimique (Roizard et al. 1997)

Le modèle de transfert de matière entre la phase gazeuse et la phase liquide le plus simple est celui du film de Whitman. Cette théorie considère que le transfert de matière par diffusion se fait dans un film mince situé entre l'interface gaz-liquide et la phase liquide homogène.

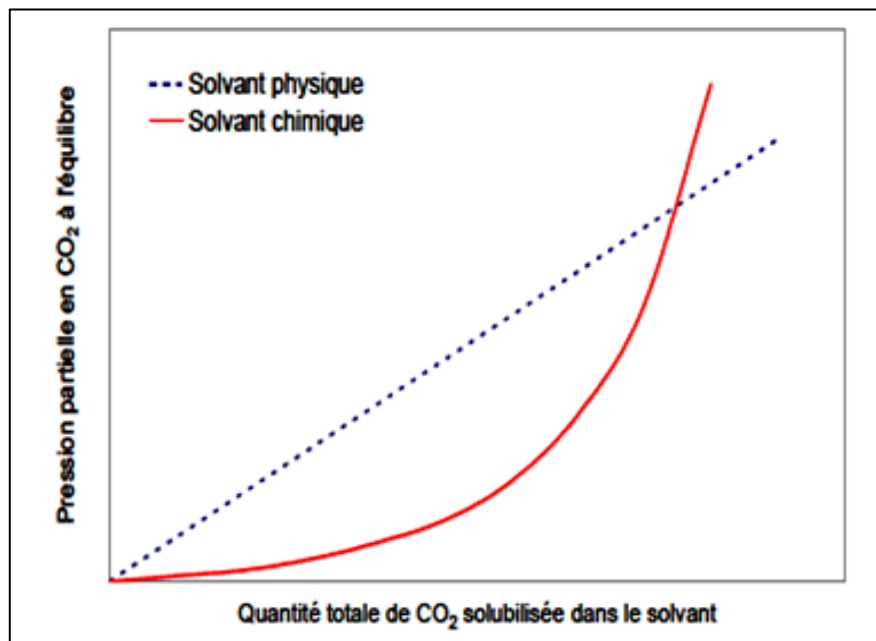


Figure IV.2 : Pression partielle en CO₂ à l'équilibre pour un solvant physique et un solvant chimique

La Figure IV.2 représente l'évolution de la pression partielle en CO₂ à l'équilibre au-dessus d'un solvant physique et chimique en fonction de la quantité totale de CO₂ dissous dans le solvant. Contrairement au solvant physique, la pression partielle en CO₂ au-dessus d'un solvant chimique ne varie pas linéairement avec la quantité de CO₂ dissoute. La réaction chimique permet d'abaisser la pression partielle en CO₂. Cependant, au-delà d'une certaine

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

quantité de CO₂ solubilisée, la réaction a consommée la majeure partie de l'agent actif expliquant une augmentation rapide de la pression partielle en CO₂. Pour les faibles pressions partielles en CO₂, l'utilisation d'un solvant physique n'est donc pas envisageable. En effet, pour des fumées à pression atmosphérique contenant de faible quantité de CO₂, l'utilisation d'un solvant physique résulterait en un débit de solvant trop important.

En ce qui concerne l'absorption chimique, le procédé de captage du CO₂ est basé sur la réversibilité de la réaction chimique par apport de puissance thermique. Les solvants chimiques sont sélectifs par rapport aux gaz inertes tels que l'azote et permettent de récupérer jusqu'à 95% et plus du CO₂ présent dans les fumées tout en ne contenant que des traces des autres composés gazeux.

IV.2 L'ABSORPTION CHIMIQUE :

IV.2.1 Les solvants chimiques :

Les solvants chimiques sont généralement des solutions aqueuses à base d'amines. Les amines sont des molécules organiques comportant une ou plusieurs fonctions amines (-N). Le groupement amine assure la basicité de la solution nécessaire à la réaction avec les gaz acides. Ces amines sont classées suivant le degré de substitution de leur atome d'azote.

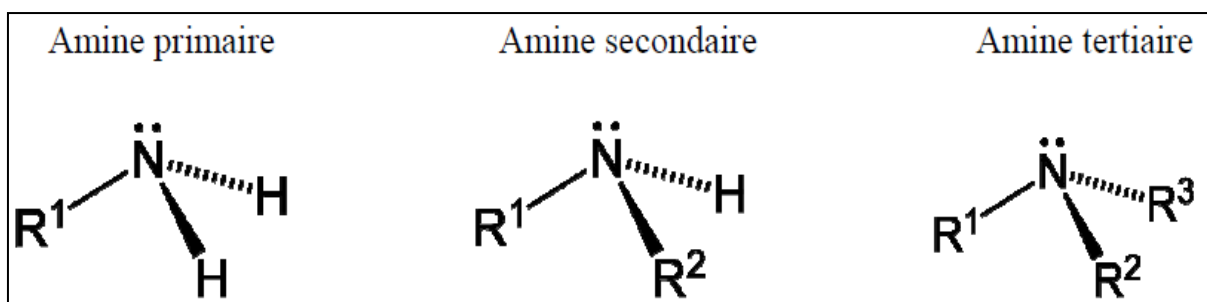


Figure IV.3 : Les différents types d'Amines, Avec R1, R2, R3 chaînes carbonées

- Pour le captage du CO₂ les amines les plus utilisés sont :

IV.2.1.1 Amine primaire :

la monoéthanolamine (MEA) et la diglycolamine (DGA). Ce sont des amines très réactives avec les gaz acides et qui permettent des séparations de grande pureté. Cependant leur capacité d'absorption du CO₂ est relativement faible : l'absorption d'une mole de CO₂ nécessite deux moles d'amine car le carbamate formé par la réaction entre le CO₂ et l'amine est très stable. Un carbamate est un ion contenant un groupement COO⁻. Ce carbamate n'est

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

donc que peu hydrolysé sous forme de bicarbonate. De plus l'utilisation de ces amines entraîne des problèmes de corrosion et de dégradation.

En ce qui concerne la MEA, il y a réaction irréversible avec le COS et le CS₂, dégradant encore la capacité d'absorption. Un solvant à base de MEA est aussi très corrosif, notamment lorsque la concentration en amine est supérieure à 20 mass.% et que le taux de charge en gaz acides est élevé. Le taux de charge représente le rapport entre la quantité de gaz acides dissous dans le solvant et le nombre de mole d'amine. Il existe cependant des inhibiteurs de corrosion permettant l'utilisation d'une solution aqueuse contenant 30 mass.% de MEA. La DGA a des performances similaires à la MEA mais avec une pression de vapeur plus faible entraînant une diminution des pertes de solvant par évaporation.

IV.2.1.2 Amine secondaire :

la diéthanolamine (DEA) et la diisopropanolamine (DIPA). Elles sont moins réactives que des amines primaires et ne sont donc à utiliser que pour des objectifs moins exigeants en termes de pureté. La dégradation avec le COS et le CS₂, est aussi moindre que pour les amines primaires. La tension de vapeur de la DEA est assez faible, limitant les pertes par évaporation. Par contre, il existe plusieurs réactions irréversibles avec le CO₂, formant des produits de dégradation corrosifs.

IV.2.1.3 Amine tertiaire :

La N-méthyl-diéthanolamine (MDEA) et la Triéthanolamine (TEA). Ces amines sont encore moins réactives que les amines secondaires mais leur capacité d'absorption est plus grande. Pour une solution aqueuse de MDEA, il faut une mole d'amine pour absorber une mole de CO₂. La MDEA n'agit pas directement avec le CO₂ mais comme un catalyseur pour l'hydratation du CO₂. La solution aqueuse peut contenir 60 mass.% de MDEA sans que les pertes par évaporation soient trop importantes. De plus elle est très résistante aux dégradations thermiques et chimiques. Puisque la vitesse de réaction des amines tertiaires avec le CO₂ est très lente, ces amines sont parfois activées avec des amines primaires ou secondaires afin d'augmenter leur réactivité vis-à-vis du CO₂.

Ces dernières années, des nouvelles amines ont été développées pour diminuer le surcoût énergétique lié au captage du CO₂. Il s'agit d'amines à encombrement stérique. La réaction du CO₂ avec ces amines forme un carbamate instable à cause de la configuration géométrique

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

de la molécule. L'amine à encombrement stérique la plus connue est la 2-amino-2-méthyl-1-propanol (AMP). Des solvants utilisant de telles amines, connus sous le nom de KS-1, KS-2 et KS-3, sont aussi développés par Mitsubishi Heavy Industry. En comparaison avec la MEA qui est l'amine de référence, ces derniers solvants permettent de diminuer d'environ 20% l'énergie nécessaire à la régénération (Jensen et al., 2005). Le débit de solvant est aussi réduit car leur capacité d'absorption est plus élevée. En effet, avec ces solvants, il ne faut qu'une mole d'amine par mole de CO₂.

Avec l'utilisation d'un solvant chimique, il y a deux caractéristiques principales à prendre en compte.

- ✦ La cinétique de la réaction d'absorption du CO₂ : les amines primaires sont plus réactives que les amines secondaires, elles-mêmes plus réactives que les amines tertiaires. La vitesse d'absorption du CO₂ influera sur le dimensionnement de la colonne d'absorption et donc sur le coût d'investissement du procédé de captage.
- ✦ La solubilité du CO₂ dans le solvant : une amine réactive avec le CO₂ permettra d'avoir une très bonne solubilité du CO₂ mais sera plus difficilement régénérable. Choisir une amine plus facilement régénérable est tentant mais cela se fait au détriment de la vitesse de réaction et de la solubilité du CO₂. La taille de l'installation sera donc plus importante et donc plus coûteuse.

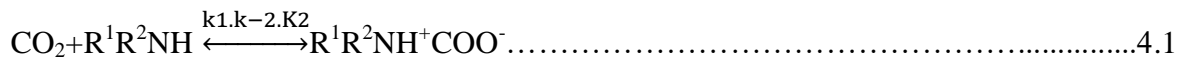
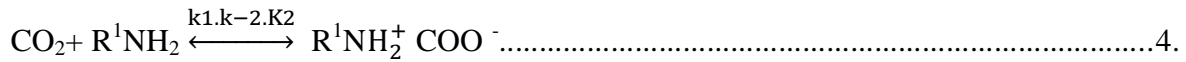
IV.3 Cinétique de la réaction d'absorption :

IV.3.1 Les réactions chimiques :

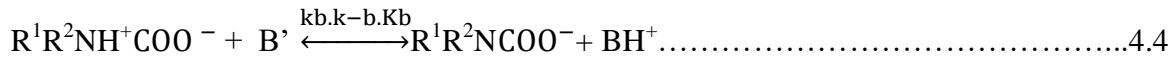
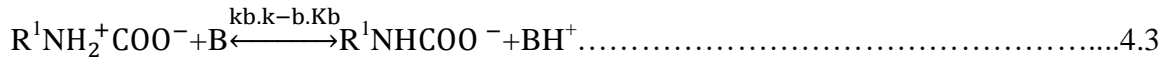
Il est généralement convenu que les amines primaires et secondaires vont réagir directement avec le CO₂ pour former un carbamate. La molécule de CO₂ va réagir avec la fonction amine pour former un groupe COO⁻ et libérer un proton. La théorie la plus connue est celle de la formation d'un zwitterion, espèce chimique possédant simultanément des charges positives et négatives, suivie d'une déprotonation de ce zwitterion par une base pour former un carbamate.

La formation d'un zwitterion entre le CO₂ et l'amine primaire et secondaire :

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

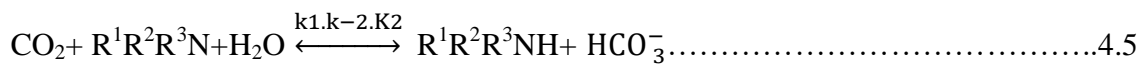


La déportation du zwitterion – formation du carbamate



Avec B et B' une base : H₂O, amine, OH⁻, HCO₃⁻ et CO₃²⁻

Les amines tertiaires ne réagissent pas directement avec le CO₂, mais vont favoriser la réaction de formation du bicarbonate suivant la réaction suivante :



Avec R¹, R², R³ chaînes carbonées.

IV.3.2 Procédé de séparation du CO2 par absorption chimique :

La Figure IV.4 représente un procédé de traitement de fumées avec absorption du CO₂ par un solvant chimique et régénération du solvant par apport de chaleur

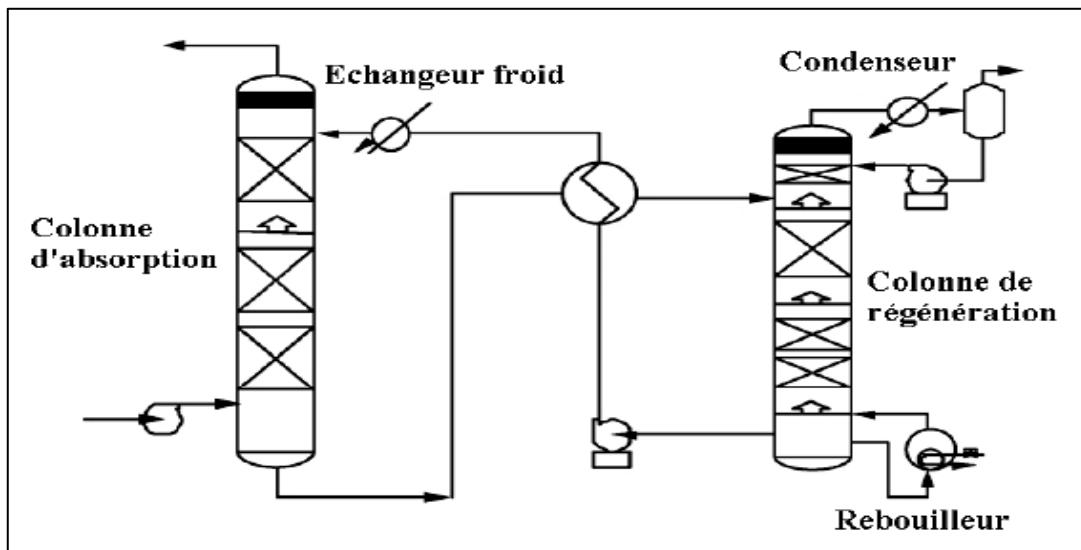


Figure IV.4 : Procédé d'absorption chimique (Aroonwilas et Veawab 2007)

Par la suite on désignera par α le taux de charge en CO₂, c'est à dire le rapport entre la quantité de CO₂ présent dans le solvant sous forme moléculaire et ionique et la quantité d'amine présente initialement sous forme moléculaire et ionique (Equation 4.6).

$$\alpha_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{am}}} \dots\dots\dots 4.6$$

Lors de la séparation du CO₂, le taux de charge passera d'une valeur minimale correspondant à la quantité résiduelle en CO₂ dans le solvant jusqu'à une valeur maximale après absorption

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

du CO₂. Le qualificatif « pauvre » associé au taux de charge ou au solvant fera référence à la quantité minimale du CO₂ dans le solvant tandis que le qualificatif « riche » désignera la quantité maximale du CO₂ dans le solvant après absorption. Les fumées à traiter sont généralement comprimés avant le procédé de captage pour compenser les pertes de charge dans la colonne d'absorption. Elles sont ensuite introduites en pied de colonne d'absorption et le solvant pauvre en tête de colonne. Tout au long de la colonne, les amines vont réagir avec le CO₂. Le gaz récupéré en tête de colonne d'absorption est épuré en CO₂. Le taux de captage dépend des caractéristiques de la colonne, du solvant, du gaz à traiter et des débits des effluents. Le taux de charge riche de la solution est limité par la capacité d'absorption de l'amine.

En effet plus le taux de charge en CO₂ augmente plus la pression partielle du CO₂ à l'équilibre augmente, limitant ainsi la vitesse d'absorption. De plus, une valeur limite du taux de charge riche peut être fixée en pratique pour éviter des problèmes de corrosion.

Le solvant enrichi en CO₂ sortant en pied de colonne d'absorption est envoyé dans la colonne de régénération après avoir été préchauffé par le solvant régénéré sortant de la colonne de régénération. Ce préchauffage permet de limiter la puissance thermique nécessaire pour amener la température du solvant riche jusqu'à la température de la colonne de régénération. La colonne de régénération est composée d'un rebouilleur et d'un condenseur. Le rebouilleur, situé en pied de colonne, récupère la chaleur de condensation de la vapeur basse pression (BP) pour inverser la réaction entre l'amine et le CO₂. Le condenseur, situé en tête de colonne, condense la vapeur d'eau du flux gazeux et la réinjecte dans la colonne. L'énergie nécessaire à la régénération du solvant est appelée chaleur de régénération ou encore chaleur de rebouillage en référence au rebouilleur de la colonne. Le solvant régénéré est renvoyé vers la colonne d'absorption après avoir préchauffé le solvant riche. Le gaz récupéré en tête de colonne de régénération est essentiellement composé de CO₂ et de vapeur d'eau. Ce flux gazeux est alors totalement déshydraté et comprimé. Le CO₂ doit être à l'état supercritique pour augmenter sa densité et diminuer les coûts liés au transport et au stockage.

Les conditions opératoires de quelques amines, ainsi que leurs capacités d'absorption, sont répertoriées dans le **Tableau (IV.1)**. Bien que les amines primaires soient plus réactives, elles ont une capacité d'absorption plus faible que les amines secondaires, en particulier la MEA pour laquelle une limite est imposée sur le taux de charge maximal et sur la concentration en amine afin de limiter les problèmes de corrosion.[10]

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

	Choix d'amines	Plage de concentration (mass.%)	Taux de charge en gaz acide (mol/mol)	Capacité de solution (m ³ gaz/m ³ solution)
Amines Primaires	MEA	10 - 20	0,15 - 0,35	6,0 - 27,7
	DGA	50 - 65	0,15 - 0,35	16,5 - 52,4
Amines Secondaires	DEA	20 - 40	0,50 - 0,85	22,4 - 74,8
	DIPA	20 - 40	0,50 - 0,85	18,0 - 60,6

Tableau IV.1 : Conditions opératoires d'amines primaires et secondaires (Butwell 1982)

IV.4 Bilan de la puissance thermique :

La puissance thermique à fournir lors de la régénération peut se décomposer en trois éléments :

- ❖ La puissance de chauffage : puissance nécessaire pour amener la température du solvant riche jusqu'à la température du rebouilleur :

$$Q_{chauf} = (F_{m,am}) \cdot (C_{P,am}) \cdot (\Delta T)_{solvant} \dots\dots\dots 5.$$

- ❖ La puissance de réaction : puissance nécessaire pour inverser la réaction entre l'amine et le CO2:

$$Q_r = (V_{des,CO_2}) \cdot (\Delta H_{s,CO_2}) \dots\dots\dots 6.$$

Avec V_{des,CO_2} - (mol. s⁻¹).

- ❖ La puissance de vaporisation qui permet de vaporiser une partie de l'eau du flux entrant dans la colonne de régénération afin de diluer le CO2 dans cette colonne .Cela permet d'assurer d'une force motrice positive pour la désorption du CO2 :

$$Q_{vap} = (V_{des,CO_2}) \cdot (Ratio_{vap}) \cdot (\Delta H_{v,CO_2}) \dots\dots\dots 7.$$

- ❖ La somme de ces trois composantes donne la puissance totale à fournir.

$$Q_{totale} = Q_{chauf} + Q_r + Q_{vap} \dots\dots\dots 8.$$

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

IV.5 La quantité de dioxyde de carbone (co2) capté dans les fumées :

Dans la centrale thermique de RAS-DJINET il y a 4 unité de production chaque 3 mois une unité est en révision, alors chaque unité marche 9 mois pour une année. Elle produit une puissance de 176MW chacun.

D'après la fiche de contrôle systématique de la centrale thermique de RAS-DJINET a 100% de charge pour un groupe 176MW produit 21120 tonnes de CO2 par an et pour 3 groupes à 100% de charge **528MW** produit **63360 tonnes** de co2 par jour.

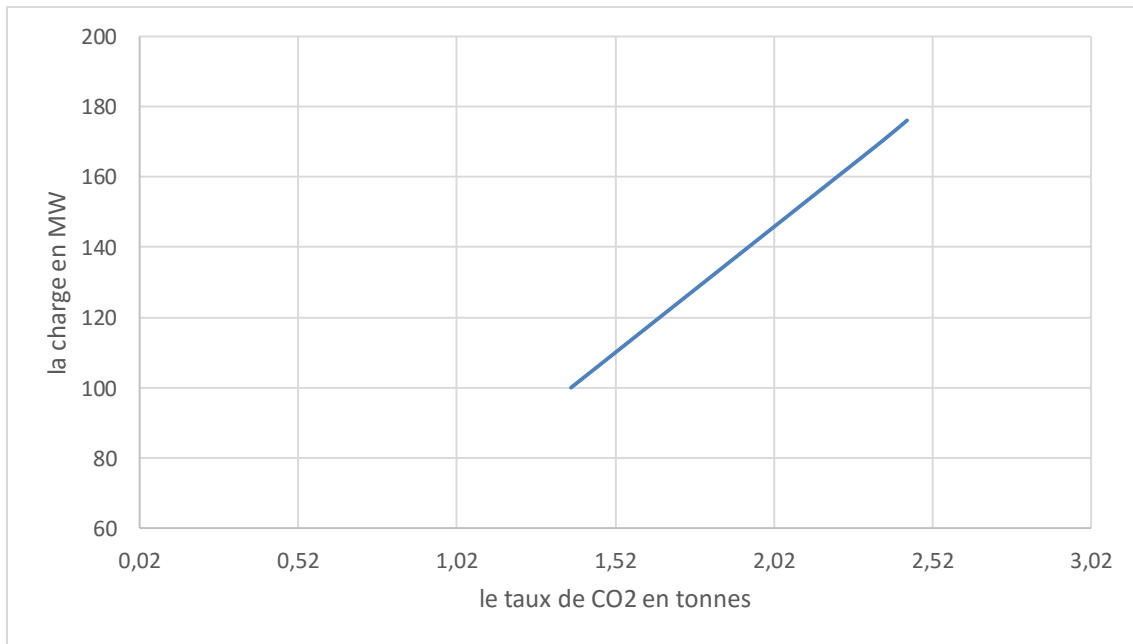


Figure IV.5 : La charge en MW en fonction de CO2 en tonnes (par heure)

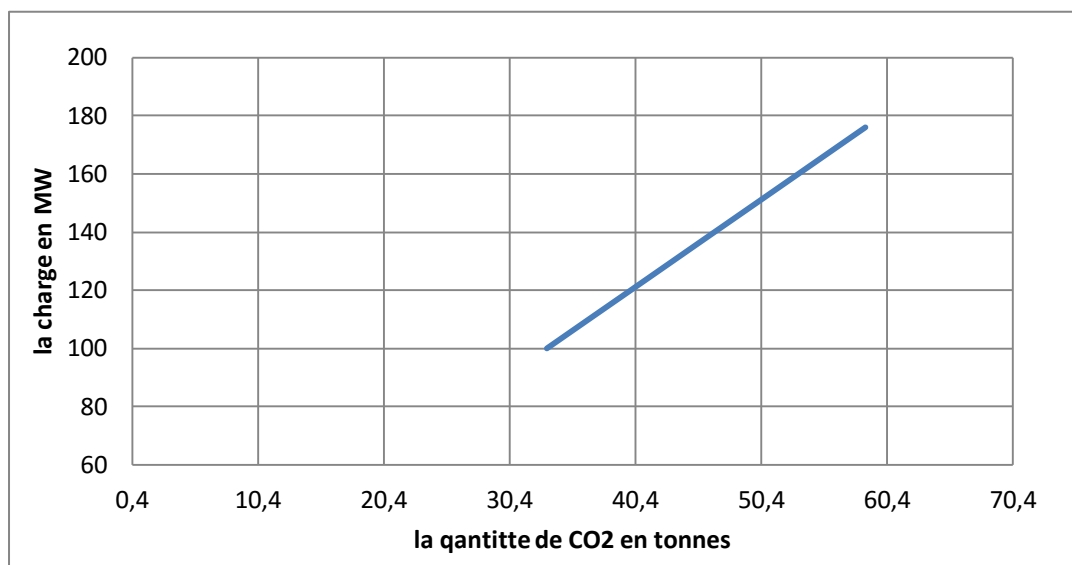


Figure IV.6 : La charge en MW en fonction de CO2 en tonnes (par jour)

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE



FigureIV.7 : La charge en MW en fonction de CO2 en tonnes (par mois)

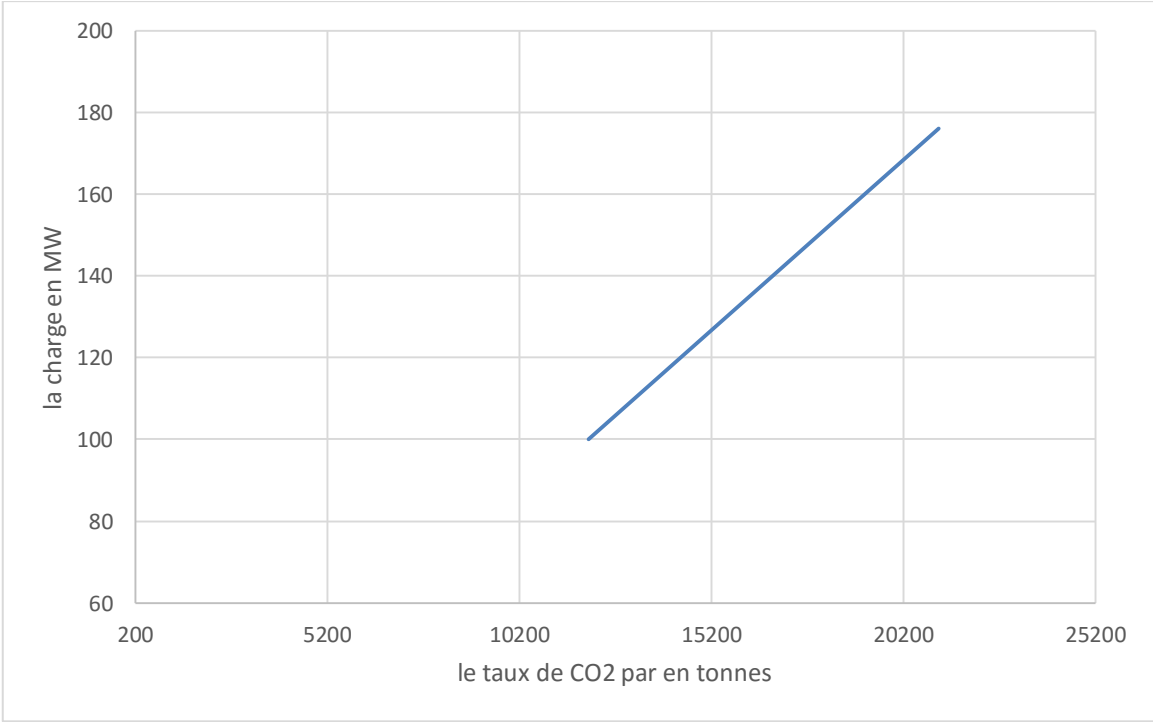


Figure IV.8 : La charge en MW en fonction de taux de CO2 en tonnes (par année)

IV.6 Réservoir CO2 en acier au carbone a sous pression :



Figure IV.9 : Stockage verticale



Figure IV.10 : Stockage horizontal

✓ **Applications produit :**

CO2

✓ **Matériau :**

En acier au carbone, en polyuréthane

✓ **Type :**

Sous pression

✓ **Applications :**

Industriel

✓ **Autres caractéristiques :**

Vertical, horizontal

✓ **Pression :**

24 bars (348,1 psi)

IV.7 Les granulateurs de glace carbonique :

Pour la transformation de dioxyde de carbone CO_2 en glace carbonique on utilise des granulateurs de glace carbonique comme suite :



Figure IV.11 : Images de granulateur de glace carbonique ASCO A30P

Le granulateur de glace carbonique ASCO A30P d'une capacité de production de 30 kg par heure convient à la production de petites quantités de neige carbonique à des fins de refroidissement.

Le pelletiseur à glace carbonique A30P ASCO est entraîné par une puissante unité hydraulique dotée d'un bouton-poussoir pour un démarrage instantané de production. Toutes les fonctions sont contrôlées par un automate. Contrôle entièrement automatique de la température de l'huile et de la neige carbonique

Ce processus garantit une production continue de glace carbonique sans aucune supervision dès le début du bouton.[11]

IV.7.1 Avantages d'une production interne de glace carbonique :

- pour la projection de glace carbonique : résultats de nettoyage plus efficaces car : plus la neige carbonique est fraîche, plus le nettoyage est efficace

- des arrêts de production plus courts

réduction de la neige carbonique perdue due à la sublimation

- diminution des dépenses logistiques liées à l'achat et à l'élimination de la neige carbonique.

IV.7.1.1 Caractéristiques :

- **Capacité de production :**

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

30 kg / h (66.14lb / h) à 17.5 bar (253.82psi) de pression d'entrée de CO2.

- **Tension :**

400V / 50Hz / 3Ph + PE (autres tensions sur demande).

- **Max. consommation d'énergie :**

1,6 kW (2,15 HP).

- **Dimensions du granulateur (L x l x h) :**

1 150 x 600 x 700 mm (45,28 x 23,62 x 27,56 pouces).

- **Incl. Base de la machine standard (L x l x h) :**

1 '150 x 600 x 1' 300mm (45.28 x 23.62 x 51.18in).

- **Poids net incl. Base de la machine standard :**

Env. 147 kg (avec huile hydraulique).

Environ. 141 kg (310.85lb) (sans huile hydraulique).

- **Raccord d'entrée de CO2 :**

1/2 "BSP femelle.

- **Source de CO2 :**

Réservoir de stockage de CO2, phase liquide (13-21 bars) (188,5-304,6 psi)

IV.7.1.2 Fonction et applications :

Le pelletiseur à glace carbonique A30P ASCO nécessite une alimentation en CO2 liquide (pression de 13 à 21 bars (188 à 304 psi)) et une alimentation électrique.

Alimentation de 400V / 50Hz / 3Ph + PE (autres tensions disponibles sur demande). La machine dispose d'un bouton instantané démarrer et toutes les fonctions sont contrôlées par un automate intégré. La neige carbonique est produite dans la chambre de neige, pressée puis extrudé par une puissante unité hydraulique. Des pellets de neige carbonique denses et denses sont produits en moins d'une minute après le démarrage du bouton-poussoir. Pour assurer un fonctionnement continu et fiable du pelletiseur, température de l'huile, durée du cycle, moteur La surcharge, la pression d'entrée de CO2 et la pression hydraulique sont toutes surveillées et affichées sur le panneau de commande.

Remarque :

Ne peut être utilisé qu'avec un réservoir basse pression (15-21 bar / 217-305 psi) - pas avec des bouteilles.

Les options :

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

Le pelletiseur à glace carbonique ASCO A30P-D3 est équipé en standard d'une extrudeuse pour la production de pellets avec Un diamètre de 3 mm (1/8 po). De tels granulés sont utilisés notamment pour la projection de glace carbonique. Plaques d'extrudeuse en option pour les granulés de diamètre 6 mm (1/4 po), 10 mm (3/8 po) et 16 mm (5/8 po) sont disponibles. Le A30P, cependant, peut également être livrés équipés en standard de plaques d'extrusion pour pellets de 6, 10 ou 16 mm (1/4, 3/8 ou 5 / 8in).





Pellet size				
	3mm (1/8in)	6mm (1/4in)	10mm (3/8in)	16mm (5/8in)
Operating range	Dry ice blasting	Cooling purposes	Cooling purposes	Cooling purposes

Figure IV.12 : Images des tailles de pellet

- Plaque d'extrudeuse pour pellets de 3 mm (1/8 po)
Pellets pour le dynamitage.
- Plaque d'extrudeuse pour pellets de 6 mm (1/4 po)
Pellets pour le refroidissement.
- Plaque d'extrudeuse pour granulés de 10 mm (3/8 po)
Pellets pour le refroidissement.
- Plaque d'extrusion pour granulés de 16 mm (5 / 8in)
Pellets pour le refroidissement.

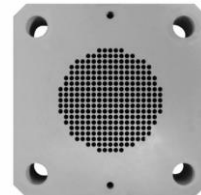




Figure IV.13 : Images de pelletiseur à glace carbonique A55P d'ASCO

Le pelletiseur à glace carbonique A55P d'ASCO, d'une capacité de production de 55 kg par heure, est idéal pour la construction une production de glace carbonique plus faible.

Le pelletiseur à glace carbonique A55P ASCO est entraîné par une puissante unité hydraulique dotée d'un bouton-poussoir pour un démarrage instantané de production. Toutes les fonctions sont contrôlées par un automate. Contrôle entièrement automatique de la température de l'huile et de la neige carbonique

Ce procédé garantit une production continue de glace carbonique sans aucune supervision dès le démarrage par bouton-poussoir.[11]

IV.7.1.3 Avantages d'une production interne de glace carbonique :

- pour la projection de glace carbonique : résultats de nettoyage plus efficaces car : plus la neige carbonique est fraîche, plus le nettoyage est efficace
- des arrêts de production plus courts
- réduction de la neige carbonique perdue due à la sublimation
- diminution des dépenses logistiques liées à l'achat et à l'élimination de la neige carbonique.

IV.7.1.4 Caractéristiques :

- Capacité de production :
55 kg / h (121,25 lb / h) à une pression d'entrée de CO2 de 17,5 bar

- **Tension :**

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

400 V / 50 Hz / 3 Ph + PE (autres tensions sur demande)

- **Max. consommation d'énergie :**

1,6 kW (2,15 HP)

- **Dimensions du granulateur (L x l x h):**

1 150 x 600 x 700 mm (45,28 x 23,62 x 27,56 pouces)

- **Incl. base de la machine standard (L x l x h) :**

1' 150 x 600 x 1' 300mm (45.28 x 23.62 x 51.18in)

- **Poids net incl. Base de la machine standard :**

env. 147 kg (avec huile hydraulique)

Environ. 141 kg (310.85lb) (sans huile hydraulique)

- **Raccord d'entrée de CO2 :**

1/2 "BSP femelle

- **Source de CO2 :**

Réservoir de stockage de CO2, phase liquide (13-21 bar) (188,5-304,6psi).

IV.7.1.5 Fonction et applications :

Le pelletiseur à glace carbonique A55P ASCO nécessite une alimentation en CO2 liquide (pression 13-21 bar / 188,5-304,6 psi) et une alimentation 400 V / 50 Hz / 3 Ph + PE (autres tensions disponibles sur demande). La machine dispose d'un bouton instantané démarrer et toutes les fonctions sont contrôlées par un automate intégré. La neige carbonique est produite dans la chambre de neige, pressée puis extrudé par une puissante unité hydraulique. Des pellets de neige carbonique denses et denses sont produits en moins d'une minute après le démarrage du bouton-poussoir. Pour assurer un fonctionnement continu et fiable du pelletiseur, température de l'huile, durée du cycle, moteur

La surcharge, la pression d'entrée de CO2 et la pression hydraulique sont toutes surveillées et affichées sur le panneau de commande.

Les options :

Le pelletiseur à glace carbonique ASCO A55P-D3 est équipé en standard d'une extrudeuse pour la production de pellets avec un diamètre de 3 mm (1/8 po). De tels granulés sont utilisés notamment pour la projection de glace carbonique. Plaques d'extrudeuse en option pour les granulés d'un diamètre de 6 mm (1/4 po), 10 mm (3/8 po) et 16 mm (5/8 po) sont disponibles. L'A55P, cependant, peut également être livrés équipés en standard de plaques d'extrusion pour pellets de 6, 10 ou 16 mm (1/4, 3/8 ou 5 / 8in).

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

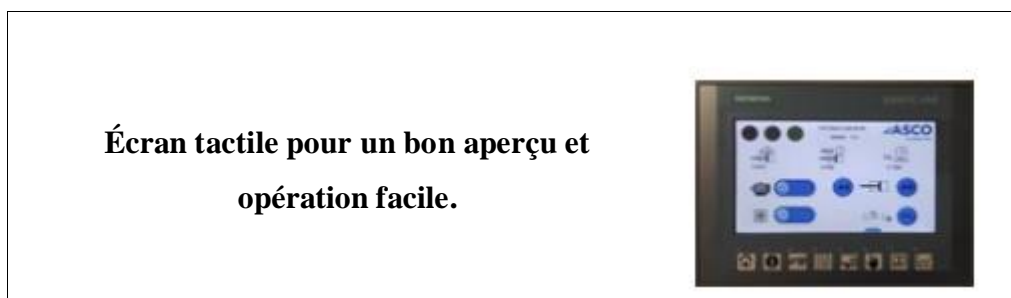


Figure IV.14 : Images de granulater de glace carbonique ASCO P28

Le granulater de glace carbonique ASCO P28 est une compacte et puissante machine à glace sèche. Ayant une capacité de production de 280kg / h (617.3lb / h) il répond aux demandes de quantités plus élevées de neige carbonique plus la qualité et la flexibilité dans le processus de travail quotidien.

Le granulater de glace carbonique P28 ASCO est entraîné par une puissante unité hydraulique avec démarrage à bouton-poussoir instantané. Toutes les fonctions sont contrôlées par un automate Siemens S7-1200 avec contact écran. Contrôle entièrement automatique de la température de l'huile et de la neige carbonique processus de neige garantissant une production continue de neige carbonique sans aucune surveillance dès le début du bouton-poussoir.

Pour maximiser le rapport de conversion du CO2 en neige carbonique, Le granulater de glace peut être connecté à un ASCO Revert Gas Système de récupération.[11]



**Écran tactile pour un bon aperçu et
opération facile.**

Figure IV.15 : Images d'écran de le pelletiseur ASCO P28

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

IV.7.1.6 Caractéristiques :

- **Capacité de production :**

80 kg / h (617.3lb / h) à 15-20 bar (217.6-290psi) CO2 pression d'entrée

- **Tension**

400 V / 50 Hz / 3 Ph + PE (autres tensions sur demande)

- **Max. consommation d'énergie :**

KW (7.51 HP)

- **Dimensions (L x l x h):** 1'560 x 800 x 1 '450 mm (61,42 x 31,50 x 57,09 pouces)

- **Poids net :**

Env : 490kg (1'080.26lb) (avec huile hydraulique)

Environ : 440 kg (970,03 lb) (sans huile hydraulique)

- **Poids emballé :**

Env : 550 kg (1'212.54lb) (sans huile hydraulique)

- **Raccord d'entrée de CO2 :**

1 "femelle BSP.

- **Source de CO2 :**

Réservoir de stockage de CO2, phase liquide (15-20 bars) (217,56-290,08 psi)

4.7.1.7 Fonction et applications :

Le pelletiseur à glace carbonique P28 ASCO nécessite une alimentation en CO2 liquide (pression 15-20 bars) (217,6-290.psi) et une alimentation électrique alimentation 400 V /50Hz/3 Ph +PE (autres tensions disponibles sur demande).

La machine dispose d'un bouton instantané démarrer et toutes les fonctions sont contrôlées par un automate intégré. La neige carbonique est produite dans la chambre de neige, pressée et puis extrudé par une puissante unité hydraulique. Des pellets de glace carbonique denses et denses sont produits peu de temps après le démarrage du bouton-poussoir.

Pour assurer un fonctionnement continu et fiable du pelletiseur, température de l'huile, niveau d'huile, temps de cycle, temps d'injection, fonctionnement heures, date de mise en service, surcharge du moteur, quantité de neige carbonique produite depuis le dernier démarrage, pression d'entrée de CO2 et la pression hydraulique est surveillée et affichée sur l'écran tactile du PLC du P28.

Les options :

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

Le pelletiseur à glace carbonique P28 ASCO est équipé en standard d'une plaque d'extrusion pour la production de pellets diamètre de 3 mm (1/8 po). De tels granulés sont utilisés notamment pour la projection de glace carbonique. Plaques d'extrudeuse en option pour la production de pellets de 10 mm (3/8 po) et 16 mm (5/8 po) (pour le refroidissement) sont également disponibles. Le P28, cependant, peut également être livré en standard équipé d'une telle plaque d'extrudeuse.




Pellet size	 3 mm (1/8 in)	 10 mm (3/8 in)	 16 mm (5/8 in)
Operating range	Dry ice blasting	Cooling purposes	Cooling purposes

Figure IV.16 : Images des tailles de pellet

IV.7.1.8 Pelleteuse à glace carbonique ASCO P28-D3 :

Caractéristiques principales :

- **Le PLC SIEMENS-S7-1200 contrôle l'ensemble du processus, l'injection et l'hydraulique**

- Écran tactile 7 "de Siemens avec différents niveaux d'accès et des informations sur le début de la production

- Performances indépendantes - production très constante, indépendante de la pression et de la température dans la plage

De 15-20 bars (217,56-290,1 psi).

- Système de contrôle de production intégré - définition et supervision de la quantité produite

- La surveillance des processus optimisée et optimisée pour la fiabilité des processus fournit des performances optimales et augmente les processus fiabilité.

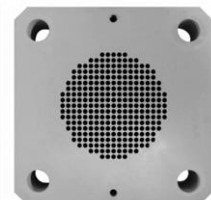
- Maintenance facile / planification optimale des services - historique complet des erreurs, indication sur l'écran tactile quand le prochain service est dû.

- Surface au sol minimale pour des performances de production élevées.

Pelleteuse à glace carbonique ASCO P28-D3 : Livraison standard :

- Plaque d'extrudeuse pour pellets de 3 mm (1/8po)

Les granulateurs de glace carbonique



CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

Pelleteuse à glace carbonique ASCO P28-D3: Options :

- Plaque d'extrudeuse pour granulés de 10 mm (3/8po)
Pellets pour le refroidissement.



- Kit de pièces de rechange.

Contenant une sélection de pièces de rechange recommandées pour Les granulateurs de glace carbonique

IV.8 CRYOGEINIE DES MACHINES :

Les consommables utilisés par l'installation sont l'air comprimé et les pellets de glace. Les conditions d'utilisation sont :

- Air comprimé :
 - Pression de projection : 6 à 13 bars
 - Débit d'air : 60 à 900 m³/h
 - Point de rosée : -40°C + déshuilage
- Pellets :
 - Débit : 30 à 80 Kg/h

IV.8.1 Matériaux compatibles et /ou incompatibles :

La glace carbonique est compatible avec la plupart des matériaux (métaux, bois, plastiques...). Certaines pièces peuvent être endommagées du fait des contraintes d'utilisation de l'unité de projection (projection de billes de glaces sous 6 à 13 bars a un débit de 3000 à 600 Nm³/h).Ainsi les petites pièces (projection des pièces sous la pression et débit), les surfaces fragiles (détérioration des surfaces peu résistantes) et les matériaux thermosensibles sont à exclure.

IV.8.2 Impact environnemental :

- Eau : Il n'y a pas d'utilisation d'eau directe. Il n'y a donc pas de consommation d'eau ni rejet
- Air : Hormis le CO₂ rejeté lors de la projection, il n'y a d'émissions atmosphériques

CHPITRE IV : ETUDE THEORIQUE DE LA TRANSFORMATION DE CO2 EN GLACE CARBONIQUE

- **Déchets** : Le seul déchet généré est constitué par les salissures présentes sur la pièce à nettoyer .La quantité est donc variable en fonction de la quantité de salissures présentes.

Les déchets sont prélevés le plus souvent dans une rétention située sous la zone de nettoyage, stockés (futs, container...) puis éliminés en centre de traitement agréé, les déchets étant dans la plupart des cas classés comme dangereux.

- **Energie** : L'énergie utilisée est de type électrique. La quantité d'énergie consommée correspond à nécessaire pour le fonctionnement de l'automate de l'installation de projection : 1 à 4 KW/h selon les équipements et production d'air comprimé

IV.8.2.1 SANITAIRE :

Le nettoyage cryogénique nécessite l'utilisation d'une installation présentant certains dangers :

- Utilisation de CO₂ : pour éviter toute accumulation de ce gaz, une ventilation suffisante doit être mise en œuvre

- Utilisation de la glace carbonique ; la glace est conditionnée à une température de -78°C. pour éviter tout risque de brûlure par le froid, des gantes sont obligatoires pour la manipulation de la buse

- Utilisation de l'aire comprimée : aux conditions d'utilisation, le niveau sonore émis par la buse est proche de 10 dB. Le port d'une protection auditive est impératif .La glace étant projetée, des vêtements adéquats doivent être utilisés.

➤ **Conclusion générale**

En conclusion, la transformation du CO₂ des gaz brûlés en neige carbonique présente un potentiel prometteur dans la lutte contre le réchauffement climatique et l'effet de serre. Cette approche novatrice vise à capturer et à stocker de manière permanente le CO₂ atmosphérique en le convertissant en une forme solide et stable, telle que la neige carbonique ou les carbonates.

De nos jours l'Algérie a besoin d'une puissance importante en énergie électrique. On dispose de nombreuses unités de production électrique qui consomment des quantités de combustible et évacuent des quantités de fumées chaudes qui représentent des pertes de chaleur à la centrale qui augmentent la quantité de gaz (CO₂) à effet de serre pour l'atmosphère (réchauffement climatique).

Le travail que nous avons effectué dans la centrale de CAP-DJINET, consistait à étudier la récupération de dioxyde de carbone CO₂ et la fabrication de la glace carbonique. D'après l'étude, l'émission totale de dioxyde de carbone est de 21 120 ton / an pour un groupe de 176 MW de charge, c'est la constatation de la quantité très importante des fumées sortantes des cheminées de la centrale dans l'air avec un taux de 10,45 % ce qui nous a permis d'appliquer la méthode de séparation en post-combustion, pour enrichir la valorisation du CO₂.

Le stockage de CO₂ dans un réservoir en acier au carbone à haute pression et la production de la glace carbonique doit être effectuée en utilisant le pelletiseur ASCO P28 ayant une capacité de production de 280 kg par heure.

Le travail que nous avons réalisé, il consiste justement à faire de l'étude de la transformation de CO₂ en neige carbonique.

En fin de compte, la transformation de CO₂ en neige carbonique peut contribuer à atténuer l'impact de l'effet de serre, mais elle doit être complétée par une action globale et coordonnée pour réduire les émissions de CO₂ et promouvoir une utilisation responsable des ressources naturelles.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

[2] : The Sixth Extinction: An Unnatural History , Elizabeth Kolbert,2014 (livre)

[3] : Climate Change: A Very Short Introduction, Mark Maslin,2014 (livre)

[4] : The Economics of climate change: The Stern Review (Nicholas Stern) .(2007).Cambridge Universty press

[5] : Gérard Borvon, Histoire du carbone et du CO₂. De l'origine de la vie jusqu'au dérèglement climatique, Vuibert, 2013

[6] : "Carbon Capture, Storage, and Utilization: A Comprehensive Guide to Carbon Capture and Storage Technologies" . Stephen A. Rackley.2018 (livre)

[7] : Transport of CO₂ via Pipeline and Ship: A Review Parham Azimi, Ali Elkamel, Dominique Guillot.2018

[8] : A.Rojey, B.Durand, C.Jaffret, S.Jullian, M.Valais, « Le gaz naturel production traitement transport». « Editions Tec hnip 1994 ».

[9] : F.Guilhamasse. « Etude du captage post-combustion du CO₂ grâce à un procedevsa (vacuum swingadsorption) avec de nouveaux adsorbants ». Thèse de doctorat d'Ecole doctorale Ed Abbe Gregoire, 2013.

[10] : Amman J-M. (2007), Etude de procédés de captage de CO₂ dans les centrales thermiques,

Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris

[11]:Site web :<https://www.gbcryogenie.fr/production-glace.html>