

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université a. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie  
Département de Génie des procédés

## Mémoire EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés  
Spécialité : Génie des Procédés de l'environnement

Présenté par

**BENMEZIANE Thabet & DAHMANI El Djida**

*Thème*

**Procédés de récupération de CO<sub>2</sub> des fumées chaudes**

**Cas de CEVITAL Béjaia**

Soutenue le 13/07/2022

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
BRINIS Naima		Université de Béjaia	Président
TIGHIDET Hassiba		Université de Béjaia	Examineur
Mme IKKOUR Kahina		Université de Béjaia	Encadrant
Mlle MELLAHI Dyhia		Université de Béjaia	Co- Encadrant

Année Universitaire : 2021/2022

## *Remerciement*

*Avant tous nous remercions le bon dieu qui m'a aidé et guidé mes pas au bon sens et vers la voie du savoir*

*En premier lieu, nous tenons à remercier particulièrement notre promotrice Madame IKKOUR Kahina pour sa patience, ses précieux conseils durant le déroulement de ce travail. D'avoir accepté d'encadrer ce travail, de nous avoir soutenu, encouragé et avec qu'on a pu achever ce projet de fin d'études.*

*En deuxième lieu, je remercie Monsieur TIARJ Smail pour son aide, ses bonnes explications et sa gentillesse tout au long du stage.*

*Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux membres examinateurs d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail*

*Nos parents, cette dernière page est un souffle finalement trop court qui ne traduira jamais suffisamment ce que vous avez sacrifié pour faire de nos vies ce qu'elles sont devenues et l'amour que nous avons pour vous. Nous sommes heureux de pouvoir vous rendre un tout petit peu de ce que vous avez consacré. Grâce à vous, nous sommes épanoui et heureux. On vous doit tout.*

*C'est avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie,  
je dédie ce modeste travail,*

*A mes très chers parents, Pour leurs soutiens, leurs  
encouragements, leurs sacrifices, Eux qui m'ont guidé durant  
toutes mes années d'étude vers le chemin de la réussite « Papa,  
Maman, merci pour tout».*

*A mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements durant  
toute cette année.*

*A mes chers amis, collègues et a tous ceux qui sont proches de  
mon cœur et dont je n'ai pas cité leurs noms.*

*Thabet Benmeziane*

*À la mémoire de mes deux grands-pères*

*À mes grands-mères*

*À mes chers parents*

*À mes frères*

*À mes cousins et cousines*

*À mes amis*

*À tous ceux qui me sont chers*

*El Djida DAHMANI*

## *Abréviations et Notations*

---

<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de Carbone.
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de Soufre.
<b>COV</b>	Composé Organique Volatil.
<b>NO<sub>x</sub></b>	Oxydes d'Azote.
<b>PM</b>	Les particules en suspension.
<b>CO<sub>x</sub></b>	Oxydes de Carbone.
<b>CO</b>	Monoxyde de Carbone.
<b>PAN</b>	PeroxyAcyl Nitrate.
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dioxyde d'Azote.
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozone.
<b>TMB</b>	Tri Méthyl Benzène.
<b>OH<sup>•</sup></b>	Le radical hydroxyle.
<b>NO<sub>3</sub><sup>•</sup></b>	Le radical nitrate.
<b>RO<sub>2</sub><sup>•</sup></b>	Radicaux peroxyles.
<b>AFNOR</b>	Association Française de NORmalisation.
<b>IR</b>	Infrarouge.
<b>UV</b>	Ultra-Violet.
<b>2008/5/CE</b>	Directive de Parlement Européen et du Conseil.
<b>PPM</b>	Partie Par Million.
<b>PPB</b>	Partie Par Billion.
<b>HAP</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<b>µg/l</b>	Microgrammes par litres.
<b>CFC</b>	ChloroFluoroCarbures.
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramme par mètre cubes.
<b>KPa</b>	Kilos pascal.
<b>GIEC</b>	Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre.
<b>PRG</b>	Pouvoir de Réchauffement Global.
<b>CSC</b>	Capture et Séquestration du Carbone
<b>Gt</b>	Giga tonnes.
<b>PH</b>	Potentiel d'Hydrogène.
<b>AIE</b>	Agence International de l'Energie.
<b>CCS</b>	techniques de captage et stockage.
<b>E.O.R</b>	
<b>EGS</b>	EnhancedGeothermal System
<b>ΔH<sup>0</sup>298K</b>	Enthalpie standard à 298 degré Kelvin.
<b>ΔG</b>	Enthalpie libre (énergie de Gibbs).
<b>DAC</b>	Direct Air Capture

## Liste des figures

---

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b> : Différentes couches de l'atmosphère.	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b> : Variation de la concentration de l'ozone.	<b>4</b>
<b>Figure I.3</b> : Schéma simplifié d'oxydation des COV induit par le radical OH <sup>*</sup> et impact sur la formation d'ozone troposphérique.	<b>8</b>
<b>Figure II.1</b> : Cycle du carbone. [4]	<b>13</b>
<b>Figure II.2</b> : Evolution de l'utilisation des terres entre 1900 et 2000. [9]	<b>14</b>
<b>Figure II.3</b> : Sources humaines de CO <sub>2</sub> . [5]	<b>15</b>
<b>Figure II.4</b> : Evolution des concentrations en CO <sub>2</sub> depuis 1700, projection 2100. [11]	<b>16</b>
<b>Figure II.5</b> : Répartition des émissions humaines de gaz à effet de serre par gaz en 2004, en milliards de tonnes équivalent carbone. [12]	<b>17</b>
<b>Figure II.6</b> : Répartition des émissions humaines de gaz à effet de serre par gaz en 2004, en pourcentage. [12]	<b>18</b>
<b>Figure II.7</b> : Différents systèmes de captage du CO <sub>2</sub> . [16]	<b>19</b>
<b>Figure II.8</b> : Différentes méthodes de stockage de CO <sub>2</sub> .	<b>21</b>
<b>Figure II.9</b> : Classification des applications du CO <sub>2</sub> selon ses propriétés. [21]	<b>22</b>
<b>Figure II.10</b> : Classification des applications du CO <sub>2</sub> selon ses propriétés.	<b>23</b>
<b>Figure II.11</b> : Schéma simplifié de la conversion du CO <sub>2</sub> par biocatalyse. [21]	<b>23</b>
<b>Figure II.12</b> : Principales transformations du CO <sub>2</sub> par synthèse organique. [21]	<b>24</b>
<b>Figure II.13</b> : Hydrogénation du CO <sub>2</sub> . [21]	<b>24</b>
<b>Figure II.14</b> : Représentation des différentes voies de reformage du méthane. [21]	<b>25</b>
<b>Figure II.15</b> : Schéma de principe de l'électrolyse du CO <sub>2</sub> . [21]	<b>25</b>
<b>Figure II.16</b> : Présentation de différentes installations solaires à concentration. [21]	<b>26</b>
<b>Figure II.17</b> : Installation de captage direct de CO <sub>2</sub> dans l'air à Hinwil dans le canton de Zurich. (©Climeworks). [29]	<b>27</b>
<b>Figure II.18</b> : Evolution des capacités de captage direct de CO <sub>2</sub> dans le monde.	<b>27</b>
<b>Figure III.1</b> : Situation géographique de complexe Cevital.	<b>31</b>

## ***Liste des figures***

---

<b>Figure III.2</b> : Organigramme de groupe Cevital.	<b>32</b>
<b>Figure III.3</b> : Vue générale de la cogénération Cevital.	<b>34</b>
<b>Figure III.4</b> : Acheminement du gaz carbonique vers la raffinerie.	<b>37</b>
<b>Figure III.5</b> : Schéma synoptique de processus de la raffinerie de sucre.	<b>38</b>
<b>Figure III.6</b> : Schéma général de la section carbonatation.	<b>41</b>
<b>Figure III.7</b> : Schéma synoptique de la section carbonatation.	<b>43</b>
<b>Figure III.8</b> : Schéma général de refroidissement.	<b>45</b>
<b>Figure IV.1</b> : Circuit eau et vapeur dans la chaufferie. [1]	<b>49</b>
<b>Figure IV.2</b> : Circuit air gaz dans la chaudière. [1]	<b>50</b>
<b>Figure IV.3</b> : Procédé de captage de CO <sub>2</sub> par absorption chimique. [8]	<b>57</b>
<b>Figure IV.4</b> : Procédé contre-courant de l'absorption. [5]	<b>59</b>

---

## ***Liste des tableaux***

---

<b>Tableau</b>	<b>page</b>
<b>Tableau I.1</b> : Les différentes méthodes normalisées pour les gaz réglementés.	<b>9</b>
<b>Tableau I.2</b> : Récapitulatif des méthodes d'analyses de gaz.	<b>9</b>
<b>Tableau I.3</b> : Valeurs de l'indice ATMO et qualificatif correspondant.	<b>11</b>
<b>Tableau II.1</b> : Propriété du CO <sub>2</sub> . [3]	<b>12</b>
<b>Tableau II.2</b> : PRG des GES. [12]	<b>17</b>
<b>Tableau II.3</b> : Capacité mondiale de stockage des différents réservoirs.	<b>21</b>
<b>Tableau IV.1</b> : Composition volumique du gaz naturel. [3]	<b>51</b>
<b>Tableau IV.2</b> : Composition de l'air [4]	<b>51</b>
<b>Tableau IV.3</b> : Composition de la fumée. [6]	<b>53</b>
<b>Tableau IV.4</b> : Caractéristique de la fumée. [6]	<b>53</b>

---



Remerciement	
Dédicaces	
Abréviation et notations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1

## Chapitre 1

Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.1 L'air .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2 L'atmosphère.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3 Pollution atmosphérique.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.1 Définition.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2 Catégories de pollution de l'air.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2.1 Pollution planétaire .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2.2 Pollution régionale .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.3 Sources des polluants atmosphériques.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.3.1 Sources naturelles .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.3.2 Les sources anthropiques .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.4 Les familles de polluants .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.4.1 Les polluants primaires .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.4.2 Polluants secondaires .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.4.3 Autres polluants de l'atmosphère.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.4 Réactions chimiques dans l'atmosphère .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.5 Mesures et méthodes normalisées .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.5.1 Différentes méthodes de mesures spécifiques aux polluants.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.5.2 Réseaux de surveillance de la qualité d'air .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.6 Impacts des polluants atmosphériques sur l'homme et la nature.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Chapitre 2

II.1 Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2 Propriétés du dioxyde de carbone.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3 Principales sources d'émissions du dioxyde de carbone .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.4 Concentrations atmosphériques en CO <sub>2</sub> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

II.5	Contribution du CO <sub>2</sub> à l'effet de serre additionnel : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.6	Le PRG (Pouvoir de réchauffement global) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7	Comment lutter contre les émissions de CO <sub>2</sub> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.1.1	Une meilleure gestion des terres .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.1.2	Changement dans l'approvisionnement énergétique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.2	CSC (capture et séquestration du carbone) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.3	Valorisation du CO <sub>2</sub> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.3.1	La valorisation sans transformation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.3.3	Applications et valorisation chimique de CO <sub>2</sub> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.7.4	Captage direct du CO <sub>2</sub> dans l'air .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.8	Chaudières à combustible .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.9	Conclusion .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Chapitre 3

Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
III.1	Présentation de l'entreprise d'accueil .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.1	Le groupe CEVITAL .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1.2	Organigramme de CEVITAL .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2	Présentation de l'unité d'affectation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1	Unité Energie et utilités .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1.1	La Nécessité du Réseau de cogénération .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1.2	Etude de la cogénération CEVITAL .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1.3	Le département chaufferie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1.4	Constitution de la chaufferie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1.5	Exploitation de la vapeur et du CO <sub>2</sub> issues des chaudières ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.2	La Raffinerie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.2.1	Description du processus de la raffinerie de sucre ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3	La carbonatation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.4	L'atelier refroidissement des pompes CO <sub>2</sub> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Chapitre 4

IV.1	Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2	Description des chaudières .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.1	Circuit eau-vapeur .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.2	Circuit air-gaz : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3	La combustion dans les chaudières .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

IV.3.1	Caractéristiques du gaz naturel utilisé .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3.2	Quantité d'air nécessaire à la combustion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3.3	Produits de combustion (fumées).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3.4	Quantité de CO <sub>2</sub> générée.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4	Etude expérimental de l'extraction chimique de CO <sub>2</sub> par une solution de MEA	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4.1	Généralité sur l'extraction.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4.2	Le solvant utilisé MEA .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4.3	Mécanismes réactionnels .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4.4	Hypothèses et exposé du problème .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.5	Impact environnemental du procédé : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.6	Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
	Conclusion générale .....	60
	Références bibliographiques	
	Résumé	

# *Introduction Générale*

---

La pollution de l'air est la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par tout agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère.

Identifier dès le XVII<sup>e</sup> siècle, caractérisé chimiquement en 1756, le dioxyde de carbone ou le gaz carbonique est le constituant naturel de l'atmosphère terrestre ou il est présent à une concentration variant entre 0.027% à 0.036%. Il provient des combustions, des émanations volcaniques et des processus de fermentation/putréfaction, par exemple celle des eaux résiduelles (égouts, puits). Le dioxyde de carbone est aussi un produit terminal du métabolisme cellulaire aérobie, chez l'homme ainsi que chez la plupart des espèces animales.

Pour l'ensemble des industries, le CO<sub>2</sub> fait partie des éjections les plus importantes dans l'atmosphère. En effet, une fois dans l'atmosphère le CO<sub>2</sub> constitue un véritable gaz à effet de serre ; ayant de nombreuses conséquences sur les êtres vivants et l'environnement. Alors contrôler et réduire l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère restent donc un important défi.

À CEVITAL, les chaudières utilisées pour la production de vapeur d'eau dégagent dans l'atmosphère une importante quantité de fumée contenant du CO<sub>2</sub>. Le traitement de ces gaz de combustion représente un bénéfice autant sur le plan économique que sur le plan environnemental. À cet effet, il nous a été confié pendant notre stage de fin de cycle à CEVITAL, un sujet qui traite de la récupération des gaz de combustion pour la production du CO<sub>2</sub> et son application dans les procédés de carbonatations pour le raffinage du sucre. Ce procédé consiste à additionner du lait de chaux au sirop et à le faire barboter en lui injectant du CO<sub>2</sub>. Ce dernier permet de transformer la chaux en carbonate (CaCO<sub>3</sub>) insoluble qui piège les impuretés dans le sirop.

Par ailleurs la quantité de CO<sub>2</sub> utilisé pour la carbonatation est très faible par rapport à la quantité rejeté dans l'atmosphère, il est donc intéressant de trouver des procédés de récupération et de valorisation de ce dernier.

Il existe aujourd'hui des possibilités considérables pour l'utilisation du CO<sub>2</sub> dans un large éventail d'applications industrielles. Le procédé le plus cité à ce jour pour la capture du CO<sub>2</sub> en postcombustion consiste à absorber chimiquement le CO<sub>2</sub> par un solvant chimique au sein d'une colonne à garnissage. L'énergie nécessaire à la régénération de l'absorbant représente 60% du coût total de l'étape de captage et la recherche de solvants permettant de minimiser cette dépense est fondamentale.

# *Introduction Générale*

---

Dans la majorité des études traitant de la capture du CO<sub>2</sub> en postcombustion, la monoéthanolamine (MEA) est considérée comme solvant de référence. Néanmoins, l'énergie de régénération élevée de ce solvant et sa capacité importante à se dégrader sous l'effet de la température et d'oxydants présents dans les fumées de combustion pénalisent fortement son utilisation à grande échelle au sein d'une filière CCS.

C'est dans cette optique que se situe notre présent projet de fin d'étude. En effet, on a effectué un stage pratique au sein de l'entreprise CEVITAL Béjaia, leader en Afrique et dans le bassin méditerranéen dans l'industrie du sucre et de l'huile végétale.

Ce présent travail s'articulera autour de quatre axes principaux :

- Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur la pollution atmosphérique, ainsi sa classification et ces impacts sur l'homme et la nature.
- Le deuxième chapitre quant à lui présentera en première partie les généralités à propos du dioxyde du carbone, ces principales sources d'émission et comment lutté contre ces dernières. En outre, les méthodes du captage et la valorisation de CO<sub>2</sub>.
- Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de l'entreprise CEVITAL-BEJAIA ainsi que l'unité de cogénération et la raffinerie du sucre. Et description de processus du raffinage du sucre et le rôle d'utilisation du CO<sub>2</sub> au niveau de la raffinerie.
- Le quatrième chapitre sera quant à lui consacré aux principaux résultats obtenus ainsi que les estimations de la quantité du CO<sub>2</sub> produite, utilisée et rejetée dans l'atmosphère par le complexe CEVITAL.

Ce chapitre est un modeste aperçu sur la problématique de la pollution atmosphérique vue d'un angle chimique.

## I.1 L'air

D'après l'encyclopédie Encarta l'air est défini comme : « un fluide gazeux qui constitue l'atmosphère, indispensable à la vie car il participe au processus de la respiration et à la photosynthèse des végétaux ». Il est constitué d'un mélange de plusieurs gaz, dont les deux principaux sont l'oxygène à 21% et l'azote à 78%. Le 1% qui reste est un mélange d'argon, de gaz carbonique, d'ozone, d'hydrogène, d'hélium, auquel il faut rajouter une fraction marginale de vapeur d'eau et de particules solides en suspension. [1]

## I.2 L'atmosphère

L'atmosphère est composée de six couches distinctes qui diffèrent par leur composition et leur température. Elles sont classées par ordre croissant de leur altitude comme suit : Troposphère, Stratosphère, Mésosphère, Thermosphère, Ionosphère et exosphère (**figure I.1**). C'est dans les couches les plus basses (Troposphère et Stratosphère) que l'on observe les phénomènes météorologiques, les activités aéronautiques ainsi que la concentration maximale de polluants atmosphérique [2]-[3].

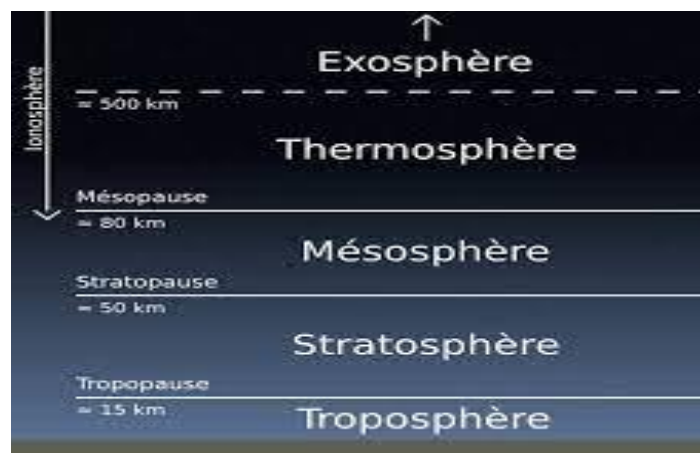


Figure I.1 : Différentes couches de l'atmosphère. [2]

## I.3 Pollution atmosphérique

### I.3.1 Définition

La pollution atmosphérique est clairement définie par la loi (article 2 de la loi N° 96-1236 du 30 décembre 1996) : « La pollution atmosphérique constitue l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les

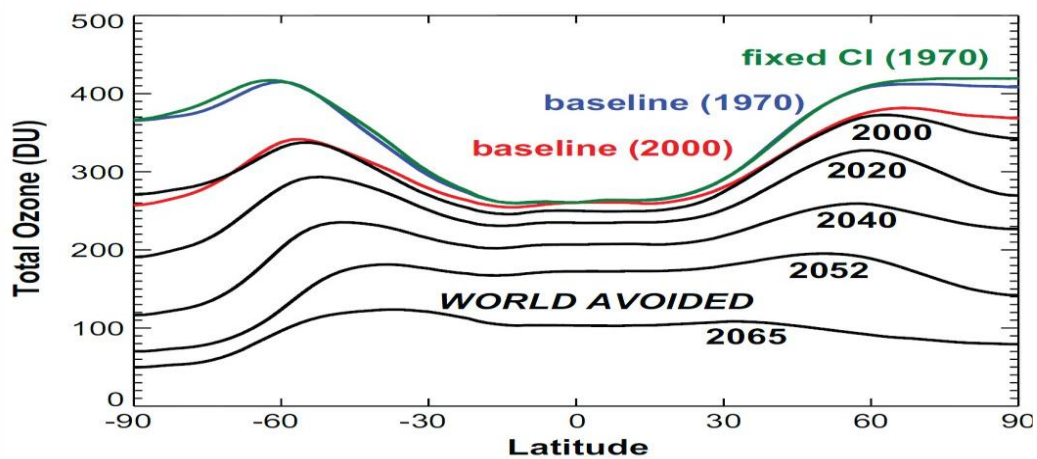
changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives excessives ». Bien que cette définition fasse référence aux polluants introduits par l'être humain, il faut considérer que certains polluants atmosphériques peuvent provenir de sources naturelles comme par exemple le radon, gaz radioactif émis notamment par les roches granitiques. [1]

### I.3.2 Catégories de pollution de l'air

On distingue trois types de pollutions : planétaire, régionale et locale.

#### I.3.2.1 Pollution planétaire

On distingue deux phénomènes, la dégradation de la couche d'ozone, observée depuis quelques années déjà (**Figure I.2**), et l'accroissement de l'effet de serre, dû à l'accumulation de certains gaz (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote...) qui sont responsable du réchauffement climatique.

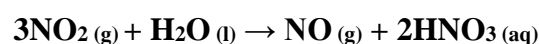


**Figure I.2** : Variation de la concentration de l'ozone. [3]

#### I.3.2.2 Pollution régionale

Elle peut être constatée jusqu'à plus de 1000Km autour de sa source d'émission. Elle prend principalement trois formes : l'acidification, la pollution photochimique et l'eutrophisation :

**a. Pollution acide** : Elle est provoquée par la transformation dans l'atmosphère des oxydes de soufre et d'azote en acides sulfurique et nitrique. Elle se dépose sous forme de retombées sèches ou humides (pluies acides) selon les deux réactions ci-dessous et provoque une altération des écosystèmes et la corrosion des matériaux. [4]



**b. Pollution photochimique** : Elle se manifeste principalement sous forme de brouillard photochimique dit « smog ». Ce dernier se compose principalement d'ozone

troposphérique (résultat d'une réaction photochimique entre des composés organiques volatils et des oxydes d'azote) et de substances particulaires primaires (pollen et poussière) et secondaires (oxydes de soufre, ammoniac et composés organiques volatils). Le smog est à l'origine de plusieurs maladies respiratoires, des irritations des yeux et de la peau, de la destruction de l'écosystème végétal, de la dégradation des statuts et musés. [5]

**c. Eutrophisation :** Est un phénomène de dégradation de la qualité des eaux qui se manifeste par la prolifération d'un nombre illimité d'espèces végétales dans des eaux trop chargées en nutriments (azote, phosphore, oligo-éléments). Les algues en se décomposant consomment d'énormes quantités d'oxygène dissous dans l'eau et appauvrissent le milieu aquatique. Les polluants atmosphériques peuvent participer à la contamination des eaux par le phénomène d'eutrophisation. [6]

**I.3.2.3 Pollution locale (urbaine) :** Elle est rencontrée au voisinage direct des sources d'émissions comme les foyers industriels de combustion, les axes de circulation, le chauffage domestique, l'incinération de déchets, etc. Elle engendre des pollutions de proximité et des nuisances olfactives à des distances inférieures à quelques kilomètres. Son impact sur la santé dépend de la durée d'exposition, de l'état général et de l'âge des personnes concernées. [7]-[8]

### **I.3.3 Sources des polluants atmosphériques**

Les polluants atmosphériques peuvent être d'origine naturelle ou anthropique :

#### **I.3.3.1 Sources naturelles**

A côté des éléments de base, l'atmosphère renferme, une quantité variable de substances naturelles qui, dépassent un seuil, crée une source de pollution à savoir :

- Les feux de forêts, de cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes de noyaux de condensation, d'imbrûlés et de gaz.
- Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre, de l'hydrogène sulfureux et des particules de cendres en grande quantité.
- Les embruns marins sont constitués par des aérosols (des cristaux de sels)
- Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.
- L'ozone formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air. [9]



### I.3.3.2 Les sources anthropiques

On appelle émissions atmosphériques anthropiques les émissions d'origine humaine. Ainsi, la majorité des activités humaines sont à l'origine, directe ou indirecte, d'émissions de grandes quantités de polluants.

- L'industrie est l'un des secteurs majeur des émissions atmosphériques en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et soufre (SO<sub>2</sub>), poussières, métaux lourds, composés organiques volatils (COV), les pm (NO<sub>x</sub>), ...
- Le transport, qu'il soit aérien, maritime ou terrestre, il émet des quantités considérables de NO<sub>x</sub>, des particules (PM) dans les gaz d'échappement, du monoxyde de carbone (les imbrulés), des COV, ...
- Les combustions et les incinérations sont aussi à l'origine de l'émission des métaux, des dioxines, des COV, des CO<sub>x</sub>, des aérosols, ... .
- Le secteur agricole est un responsable majeur des émissions de poussières et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) à cause du recours aux produits phytosanitaires et aux épandages.
- Les activités domestiques, en utilisant des produits phytosanitaires, des peintures, des produits ménagers, en cuisinant... nous émettons tous des polluants atmosphériques (COV).
- Le chauffage est aussi à l'origine d'une grande partie des émissions du SO<sub>2</sub>, du CO, des NO<sub>x</sub> et des PM. Même la climatisation génère indirectement des émissions du fait de sa grande consommation d'électricité mais également si le gaz réfrigérant n'est pas récupéré. [10]

### I.3.4 Les familles de polluants

Les principaux polluants atmosphériques se classent en deux grandes familles bien distinctes : les polluants primaires et les polluants secondaires.

#### I.3.4.1 Les polluants primaires

Ils sont directement issus des sources de pollution, on y trouve : des CO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, des NO<sub>x</sub>, des hydrocarbures légers, des (COV), des particules contenant ou non des composés métalliques (plomb, mercure cadmium...) ou organiques (PM 10 et PM 2,5). Ces polluants primaires peuvent se transformer dans la basse atmosphère, sous l'action des rayons solaires et de la chaleur, en polluants dits secondaires tels que l'ozone et autres polluants photochimiques (les PAN ou nitrates de peroxyacétyle, aldéhydes, cétones, etc.). [11]

### I.3.4.2 Polluants secondaires

Ils sont formés par transformation chimique de certains polluants primaires. La formation de ces derniers nécessite un certain temps durant lequel les masses d'air se déplacent. On y trouve :

- **L'ozone (O<sub>3</sub>)** : troposphérique formé à partir de la réaction d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et des composés organiques volatils (COV) en présence de chaleur et des rayons ultraviolets ( $\text{COV} + \text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{O}_3$ ).
- **Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)** : tels que : le NO<sub>2</sub> qui se forme à partir de l'oxydation du NO par d'autres polluants atmosphériques tel qu'O<sub>3</sub> et le PAN (peroxyacetylnitrate) qui résulte de l'action des peroxyacycles sur les oxydes d'azote.
- **Le monoxyde de carbone** : résultat de la combustion incomplète et rapide des combustibles et carburants.
- **Les particules en suspension (PM)** : Ce sont de toutes petites particules solides ou liquides en suspension, appelées aérosols, insédimentables car elles ne peuvent pas se déposer sur le sol sous l'effet de la gravitation. Leur taille varie de quelques nanomètres à presque 100 microns.
- **Les dérivés soufrés en particulier le SO<sub>2</sub>** : Proviennent principalement des centrales thermiques, des grosses installations de combustion de l'industrie et du secteur tertiaire et résidentiel (chauffage individuel ou collectif). Ainsi, SO<sub>2</sub> peut se transformer en trioxyde de soufre (SO<sub>3</sub>) et acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en association avec les particules, à l'origine des fameuses pluies acides.
- **Les composés organiques volatils (COV)** : Sont des gaz émis par la combustion de carburants ou l'évaporation de solvants contenus dans certains matériaux et produits. Ils participent à des réactions photochimiques dans l'atmosphère donnant ainsi naissance à une multitude de substances de différentes familles chimiques. [12]

### I.3.4.3 Autres polluants de l'atmosphère

En plus des polluants primaires et secondaires, il existe d'autres polluants tels que :

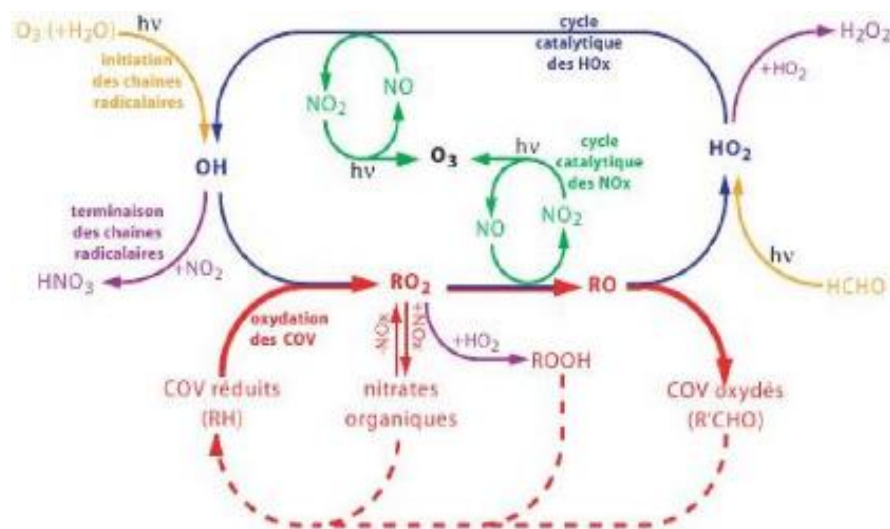
- **Le CO<sub>2</sub>** : avec une très faible teneur dans l'air (environ 0,03%) naturellement, mais qui ne cesse d'augmenter au rythme de 0,5% par an avec l'augmentation de la consommation d'énergie fossile dans le monde et la diminution importante des couverts forestiers. Participant ainsi activement à l'effet de serre. [7]
- **Le méthane** : qui participe directement au phénomène d'accroissement de l'effet de serre et sa concentration dans l'air ambiant augmente encore plus vite que celle du CO<sub>2</sub>. Les principales sources émettrices sont : l'exploitation des mines de

charbon, les décharges d'ordures ménagères, l'élevage, la distribution du gaz, etc. [7]

- **Les CFC – Chlorofluorocarbures** : Ils sont totalement artificiels (à l'exception du chlorure de méthyle d'origine marine). Ils sont utilisés dans les biens de consommation courante (aérosols propulseurs, mousses, extincteurs, réfrigérants, etc.). Ce sont des gaz à effet de serre et surtout les premiers perturbateurs de l'équilibre de Chapman. [7]

#### I.4 Réactions chimiques dans l'atmosphère

Conséquence des réactions de transformation des polluants ou de celles de leur dégradation, notre atmosphère (la troposphère) est assimilée à un réacteur chimique en pleine effervescence. Ainsi, divers types de réactions se déroulent simultanément à chaque instant. On peut citer : Les réactions photochimiques, Les réactions radicalaires, La formation de l'ozone (**Figure I.3**).



**Figure I.3** : Schéma simplifié d'oxydation des COV induit par le radical OH et impact sur la formation d'ozone troposphérique. [13]

Pour pouvoir identifier, évaluer et estimer les quantités des différents polluants dans l'atmosphère plusieurs méthodes physico-chimiques sont utilisées.

#### I.5 Mesures et méthodes normalisées

La Directive 2008/5/CE et l'AFNOR ont préconisé des méthodes spécifiques de mesure pour chaque polluant. Ces méthodes normalisées permettent d'accéder aux niveaux de concentration des gaz ciblés avec une grande précision correspondant aux objectifs de qualité spécifiques dans la directive. Le **tableau I.1** présente les différentes méthodes de mesure spécifiques à chaque polluant avec la référence de la norme associée. [14]

**Tableau. I.1 :** Les différentes méthodes normalisées pour les gaz réglementés. [15]

GAZ	METHODE DE MESURE	NORME
NO <sub>x</sub>	Chimiluminescence	EN 14211 (2005)
CO	Rayonnement infrarouge non dispersif	EN 14626 (2005)
O <sub>3</sub>	Photométrie UV	EN 14625 (2005)
SO <sub>2</sub>	Fluorescence UV	EN 14212 (2005)
BENZENE +	Prélèvement actif et chromatographie	EN 14662-1 (2005)
		EN 14662-2
		EN 14662-3

Des analyseurs automatiques d'air ont été développés spécifiquement pour effectuer des mesures selon les méthodes normalisées. Ils peuvent être utilisés dans des stations de mesures de la qualité de l'air pour assurer le suivi au quotidien de la pollution atmosphérique. [16]

### I.5.1 Différentes méthodes de mesures spécifiques aux polluants

Les méthodes normalisées listées dans le **Tableau I.1** pour la mesure des gaz réglementés nécessitent l'utilisation d'analyseurs intégrant des composants complexes pour assurer des mesures répondant aux exigences de qualité requises dans les directives et normes (source de radiation UV ou IR, filtre, four...) ce qui rend ces analyseurs assez complexes et coûteuses. Le **tableau I.2** répertorie les principales méthodes de mesures utilisées par ces analyseurs en précisant leurs atouts et leurs faiblesses. [17-18]

**Tableau I.2 :** Récapitulatif des méthodes d'analyses de gaz. [19]

Technique utilisée	Gaz détecté	Minimum détectable	Temps de réponse	Avantages	Inconvénients
Chromatographie en phase gazeuse	COV (selon détecteur et colonnes)	<<1ppm	5 à 40 min	Sensible, spécifique	Etalonnage nécessaire, peu portable, méthode destructive
Spectrométrie de masse	Tout composé sous	ppb à ppm	≈ 1 min	Sélective, sensible,	Matériel lourd, interprétation de

	forme gazeuse			quantification	spectres	
Absorption infrarouge	CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HC	≈ ppm	≈ 1 min	Sélective, Sensible	Interférence vapeur d'eau	avec
Chimiluminescence	NO, NO <sub>2</sub>	1 ppb	≈ 1 min	Très spécifique	Maintenance étalonnage délicat, méthode destructive	et
Fluorescence	SO <sub>2</sub>	<0.1 ppm	≈ 1 min	Peu d'interférence	Spécifique SO <sub>2</sub>	

Ces méthodes assurent généralement des mesures sélectives avec une grande précision en un temps de réponse relativement court. Leurs points négatifs majeurs résident dans leur non portabilité et leur complexité d'utilisation. Ces outils ont besoin d'être étalonnés régulièrement et leur maintenance peut s'avérer coûteuse. [17]

### I.5.2. Réseaux de surveillance de la qualité d'air

La surveillance de la qualité de l'air situé près du sol est d'une importance capitale car, en tout lieu, c'est « l'air public », respiré par l'ensemble de la population, c'est-à-dire y compris par les personnes sensibles : jeunes enfants, personnes âgées, personnes allergiques, personnes ayant des problèmes respiratoires, oculaires, cardiaques et autres. Parmi les objectifs de ces réseaux :

- Établir des statistiques sur les niveaux des polluants (Polluants réglementés).
- Vérifier les normes de pollution et effectuer des mesures ponctuelles des autres polluants.
- Déclencher des alertes (arrêt momentané d'une centrale thermique, des normes sur la circulation des véhicules ....
- Informer le public de l'état de l'air à travers les médias (indice ATMO). [2]-[14]
- La qualité de l'air est concrétisée par un indicateur journalier appelé « Indice ATMO » qui est calculé par rapport au taux des quatre polluants réglementaires. Sont ainsi pris en compte les taux d'ozone (O<sub>3</sub>), de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), de dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et celui de particules fines (PM<sub>10</sub>). Leur valeur est exprimée en µg/m<sup>3</sup>.

**Tableau I.3** : valeurs de l'indice ATMO et qualificatif correspondant.

Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Qualificatif	Très bon	Très bon	bon	bon	Moyen	médiocre	médiocre	mauvais	mauvais	Très mauvais

Il est à noter qu'à chaque type de polluant réglementé correspond une valeur d'indice Atmo. L'indice ATMO ainsi retenu pour définir la qualité de l'air est celui correspondant au plus élevé. [20]

## I.6 Impacts des polluants atmosphériques sur l'homme et la nature

Les polluants atmosphériques ont un impact négatif et destructeur aussi bien sur la santé humaine que sur l'environnement.

Les effets de la pollution de l'air sur la santé observés suite à une exposition de quelques heures à quelques jours (exposition aiguë, dite à court terme) sont les suivants : irritations oculaires ou des voies respiratoires, crises d'asthme, exacerbation de troubles cardio-vasculaires et respiratoires pouvant conduire à une hospitalisation, et dans les cas les plus graves au décès. Selon l'OMS, la pollution de l'air est le principal risque environnemental pour la santé dans le monde. Ainsi, l'exposition à la pollution de l'air extérieur conduit chaque année au décès d'environ 4,2 millions de personnes dans le monde.

## II.1 Introduction

Le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> est présent dans l'atmosphère depuis que l'apparition de la terre il y a environ cinq milliards d'années. Il se trouve à l'état naturel dans l'atmosphère. Il joue un rôle primordial dans le cycle du carbone sur Terre et subit en permanence des transferts entre les différents milieux. Une très large proportion du CO<sub>2</sub> est ainsi dissoute et stockée dans les océans qui font office de puits de carbone. [1]

Le dioxyde de carbone, également appelé gaz carbonique **ou** anhydride carbonique, de formule moléculaire CO<sub>2</sub>, est un gaz incolore, inerte et non toxique. Il se compose de deux atomes d'oxygène et d'un atome de carbone. [2]

## II.2 Propriétés du dioxyde de carbone

Il y a plusieurs propriétés physico-chimiques qui sont caractéristiques du dioxyde de carbone. En voici un résumé dans le **Tableau II.1** :

**Tableau II.1:** Propriété du CO<sub>2</sub>. [3]

<i>Propriété</i>	<i>Valeur</i>
<i>Poids moléculaire</i>	44.01
<i>Gravité spécifique</i>	1.53 à 21 °C
<i>Densité critique</i>	468 kg/m <sup>3</sup>
<i>Concentration dans l'air</i>	420 * 10 <sup>7</sup> ppm
<i>Stabilité</i>	Elevée
<i>Liquide</i>	Pression < 415.8 kPa
<i>Solide</i>	Température < -78 °C
<i>Constante d'Henry de solubilité</i>	298.15 mol/ kg * bar
<i>Solubilité dans l'eau</i>	0.9 vol/vol à 20 °C

## II.3 Principal sources d'émissions du dioxyde carbone

### II.3.1 Sources naturelles

#### A. Échange air océan

Les océans contiennent du dioxyde de carbone dissous, qui est libéré dans l'air à la surface de la mer. Chaque année, ce processus crée environ 330 milliards de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone. [4]

#### B. Respiration végétal et animal

Les plantes et les animaux utilisent la respiration pour produire de l'énergie, celle-ci étant utilisée comme carburant pour les activités de base, comme le mouvement et la croissance. [4]

#### C. Éruptions volcanique

Lors de leurs éruptions notamment, les volcans éjectent toutes sortes de poussières et de gaz. Les trois principaux gaz émis par les volcans sont toutefois la vapeur d'eau, l'anhydride sulfureux et... le dioxyde de carbone. [5]

#### D. Décomposition de la matière organique

La décomposition de la matière organique est une réaction d'oxydation par les micro-organismes du sol qui produit du CO<sub>2</sub>, de l'eau, et de l'énergie. Les vapeurs qui s'échappent d'un tas de fumier en hiver témoignent de l'eau et de la montée en température du tas de fumier grâce à l'énergie dégagée par la réaction. [6]

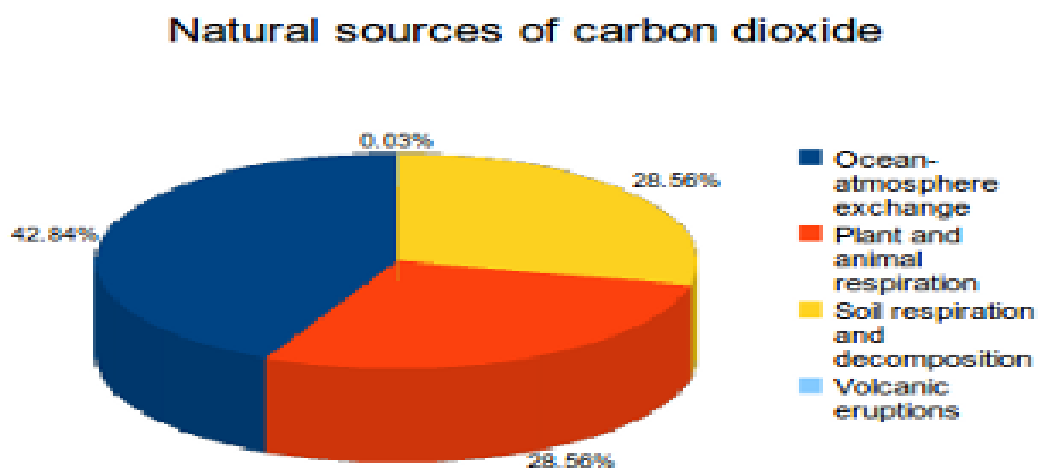


Figure II.1 : Source naturelle du CO<sub>2</sub>. [4]



II.3.2 Sources humaines

II.3.2.1 Modification de l'utilisation des terres

Les arbres agissent comme un puits de carbone. Ils retirent le dioxyde de carbone de l'atmosphère grâce à la photosynthèse. Lorsque les forêts sont défrichées pour créer des fermes ou des pâturages, les arbres sont abattus et sont soit brûlés, soit décomposés, ce qui ajoute du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. [4]

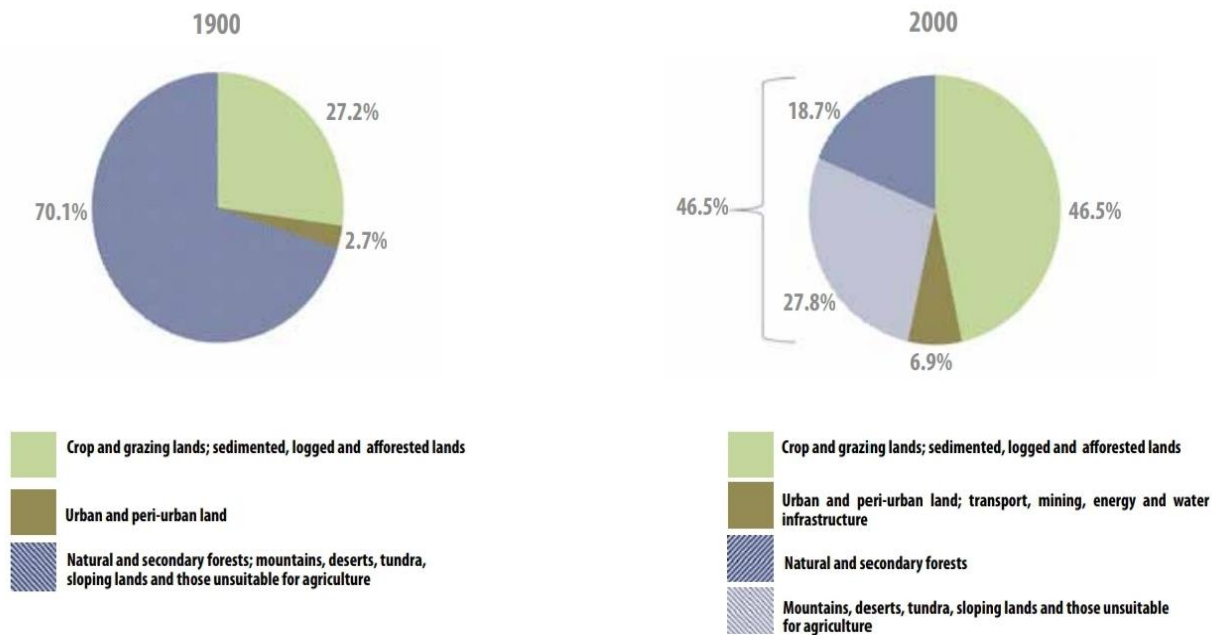


Figure II.2 : Evolution de l'utilisation des terres entre 1900 et 2000. [7]

II.3.2.2 Utilisation de combustibles fossiles

Les 3 types de combustibles fossiles qui sont les plus utilisés sont le charbon, le gaz naturel et le pétrole.

La combustion de ces combustibles libère de l'énergie, une énergie pour la plupart transformée en chaleur, en électricité ou en carburant utilisé dans le secteur des transports. Parmi quelques exemples d'usage de ces combustibles, citons les centrales électriques, les voitures, les avions et les installations industrielles.

➤ La production d'électricité et de chaleur

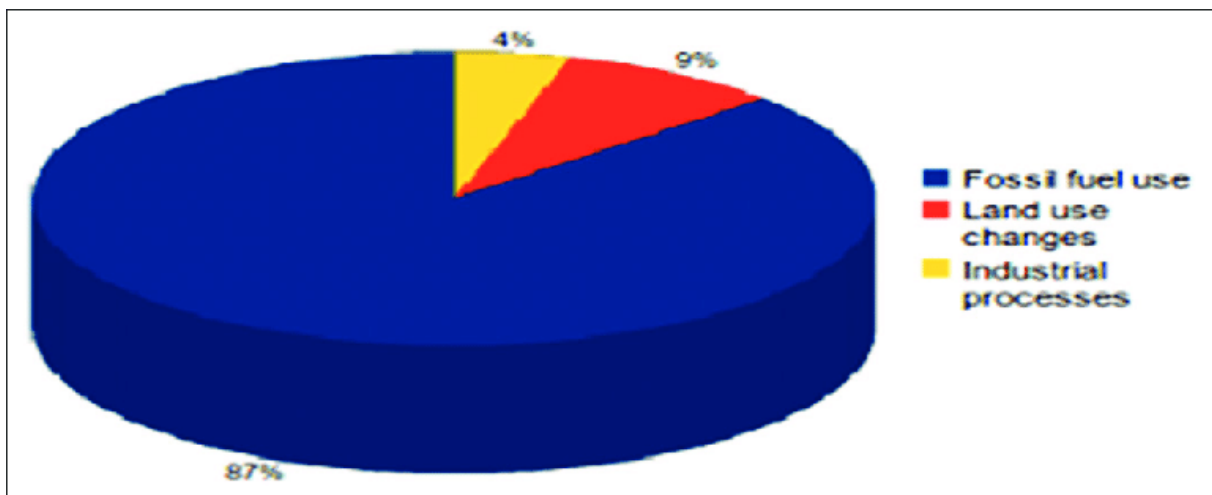
Est définie comme étant le secteur économique qui produit la plus grande quantité d'émissions de dioxyde de carbone attribuables à l'homme, Presque tous les pays industrialisés obtiennent la majorité de leur électricité à partir de la combustion de combustibles fossiles (environ 60-90%).

➤ **Le secteur des transports**

Constitue la deuxième source majeure d'émissions de dioxyde de carbone attribuable à l'homme. Le transport routier représente 74% des émissions de dioxyde de carbone du secteur des transports, 14% pour le transport maritime et 11% pour l'aviation mondiale. [4]

➤ **Procédés industriels**

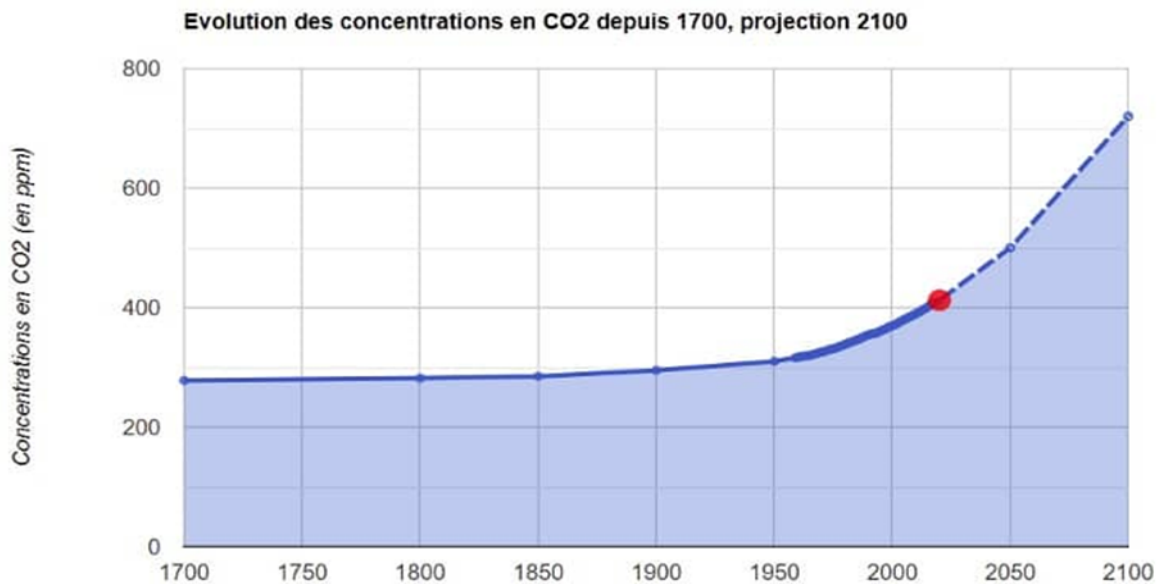
De nombreux procédés industriels émettent du dioxyde de carbone de façon directe, par le biais de la combustion des combustibles fossiles, mais aussi de façon indirecte, par l'intermédiaire de l'utilisation de l'électricité générée par les combustibles fossiles. [4]



**Figure II.3 :** Sources humaines de CO<sub>2</sub>. [4]

#### II.4 Concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub>

Les concentrations en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont comprises entre 190 ppm (ères glaciaires) et 260 ppm (périodes chaudes). Les mesures effectuées à l'observatoire de Mauna Loa et l'étude des bulles d'air emprisonnées dans les calottes polaires, montrent que la concentration est passée d'environ 280 ppm dans les années 1850 (début de la civilisation industrielle) à 400 ppm en 2014 et ne cesse d'augmenter. La courbe d'évolution des concentrations en CO<sub>2</sub> est représentée dans la **figure II.5**. [8]



**Figure II.4 :** Evolution des concentrations en CO<sub>2</sub> depuis 1700, projection 2100. [8]

### II.5 Contribution du CO<sub>2</sub> à l'effet de serre additionnel :

Depuis le début de l'ère industrielle, c'est à dire depuis l'année 1750 environ, ce que nous avons mis dans l'atmosphère a pour effet d'introduire un « forçage radiatif » de l'ordre de 1% du rayonnement reçu. [9]

Le gaz carbonique d'origine humaine est responsable d'un peu moins de 65% de l'effet de serre additionnel dû à l'homme. [10]

### II.5 Le PRG (Pouvoir de réchauffement global)

Le pouvoir de réchauffement global d'un gaz se définit comme le « forçage radiatif » (c'est à dire la puissance radiative que le gaz à effet de serre renvoie vers le sol), cumulé sur une durée qui est généralement fixée à 100 ans, d'une quantité de gaz donnée. Cette valeur se mesure relativement au CO<sub>2</sub>. [9]

La détermination de poids équivalent carbone afin de comparée les gaz à effet de serre, qui se déterminée comme suit :

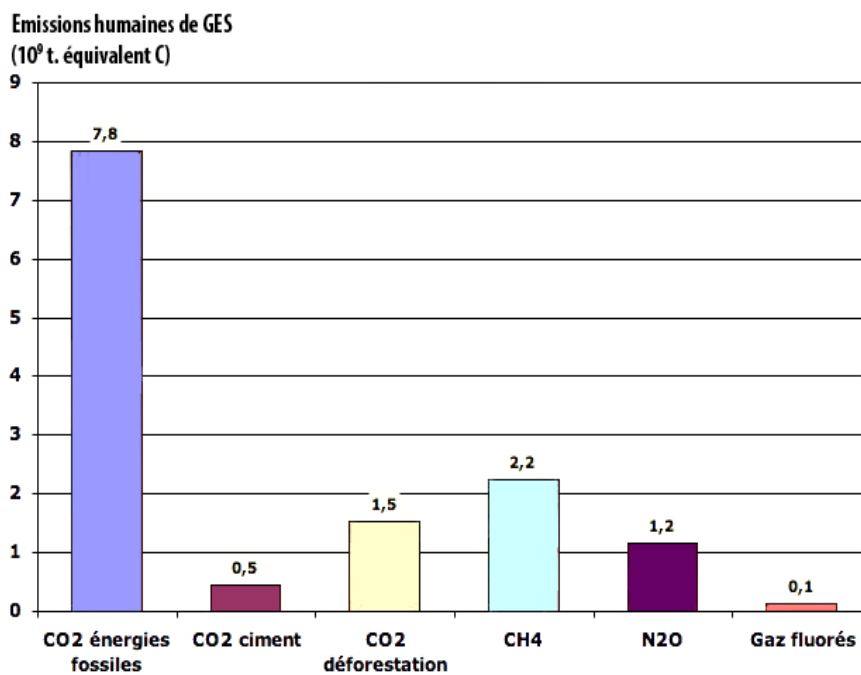
Par définition, un kg de CO<sub>2</sub> vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est à dire le poids du carbone seul dans le composé « gaz carbonique ». Pour les autres gaz, l'équivalent carbone vaut :

Équivalent carbone = PRG relatif x 0,2727 [9]

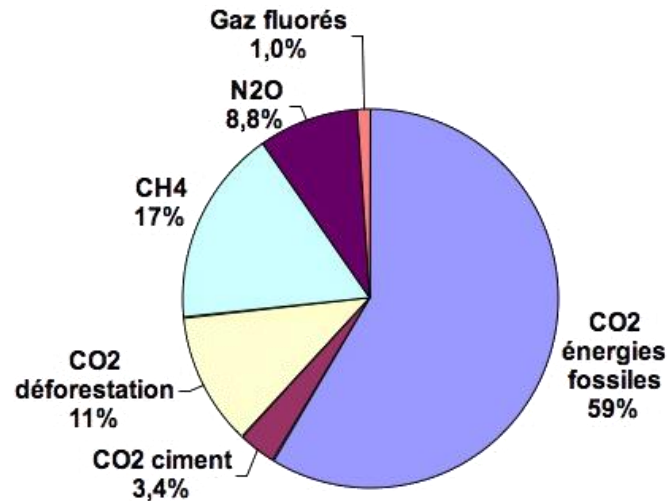
La répartition des gaz des émissions humaines, qui se présente comme suit

Tableau II.2 : PRG des GES. [9]

Gaz	Temps de séjour dans l'atmosphère (ans)	PRG relatif / CO <sub>2</sub> (à 100 ans)
Gaz carbonique CO <sub>2</sub>	100	1
Méthane CH <sub>4</sub>	12	25
Protoxyde d'azote N <sub>2</sub> O	120	298



**Figure II.5 :** Répartition des émissions humaines de gaz à effet de serre par gaz en 2004, en milliards de tonnes équivalent carbone. [9]



**Figure II.6 :** Répartition des émissions humaines de gaz à effet de serre par gaz en 2004, en pourcentage. [9]

## II.6 Comment lutter contre les émissions de CO<sub>2</sub>

### II.6.1 Réduction des émissions

Pour cela il existe deux axes prioritaires :

#### II.6.1.1 Une meilleure gestion des terres

La dégradation des terres est à la fois la cause et la conséquence des changements climatiques. L'adoption et la diffusion de pratiques de gestion durable des terres auraient des impacts positifs considérables en termes de stabilité climatique ainsi que pour les agriculteurs, les consommateurs et l'environnement. [7]

#### II.6.1.2 Changement dans l'approvisionnement énergétique

L'efficacité énergétique peut être améliorée au niveau des modes de production centralisés et dans les choix énergétiques des différents pays :

- en augmentant le rendement énergétique des installations et en limitant les pertes lors de la production, du transport et de la distribution, grâce à des technologies plus performantes.
- en utilisant les énergies non émettrices de CO<sub>2</sub> comme moyen de production d'énergie non renouvelables, comme le nucléaire, et renouvelables, comme hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque, géothermie, biomasse, énergies marines.

[12]

- Ainsi les technologies telles que le « fuel switching » ou les « clean coal technologies » conduisent déjà à une réduction de l'intensité carbone. [11]

La capture et la séquestration du carbone est un ensemble de techniques permettant de récupérer le dioxyde de carbone dans de grandes installations pour permettre sa valorisation.

**II.6.2 CSC (capture et séquestration du carbone)**

Marchetti, un chercheur en géophysique, est le premier à imaginer la possibilité de capter le CO<sub>2</sub> issu des industries pour le stocker. [13]

La CSC pourrait permettre de réduire les émissions sans renoncer à la consommation d'énergies fossiles et donc sans bouleverser nos modes de consommation ou la structure de nos économies. [14]

La CSC comprend trois grandes étapes :

**A. La Capture**

La première étape de la CSC consiste à capturer le dioxyde de carbone en sortie des centrales thermiques ou des installations industrielles. Il existe pour cela trois familles de technologies : [14, 15, 16]

- Postcombustion.
- Oxycombustion.
- Précombustion.

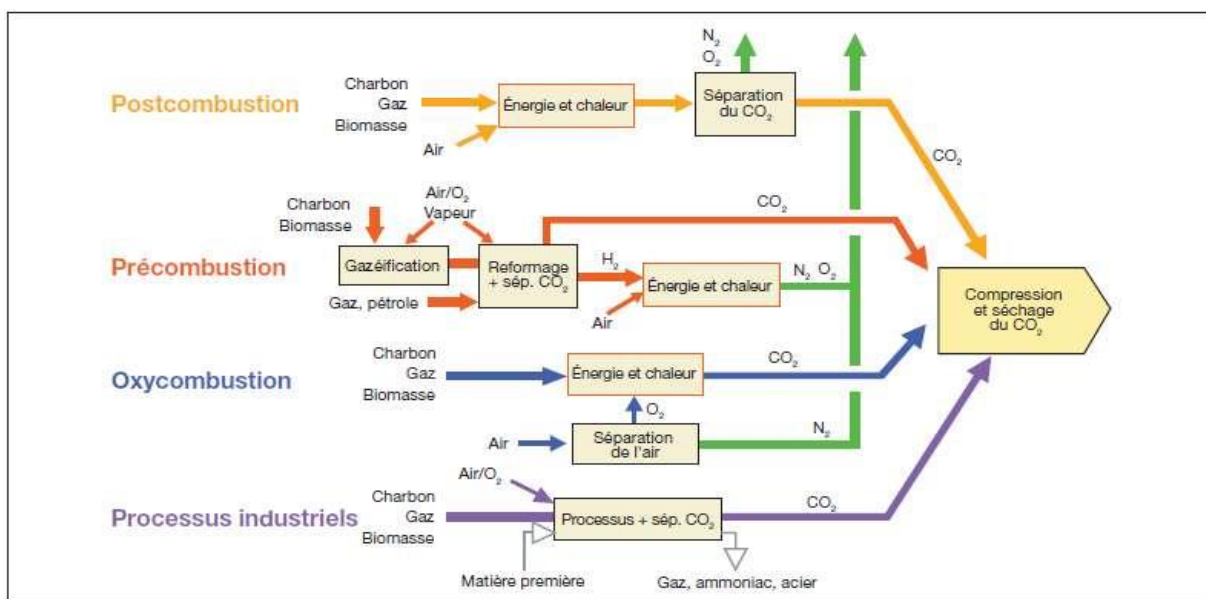


Figure II.7 : Différents systèmes de captage du CO<sub>2</sub>. [13]

**B. Le Transport**

Après la phase du captage, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> doit être transporté jusqu'à un site de stockage permanent puis injecté dans le sous-sol. Certaines précautions doivent être prises, deux solutions existent : [17]

- **le transport par canalisation.**
- **le transport par camions ou navires.**

**C. La Séquestration**

Le principe de base du stockage à long terme du CO<sub>2</sub> consiste à se débarrasser au meilleur coût d'un déchet encombrant (par les volumes mis en jeu), tout en assurant aux générations futures des conséquences environnementales nulles ou négligeables. [15]

Mais pour atteindre de tels objectifs il faut relever deux défis majeurs celui de la technologie et celui de l'économie. [16]

- Enfouissement géologique du CO<sub>2</sub>.
- Enfouissement océanique de CO<sub>2</sub>.

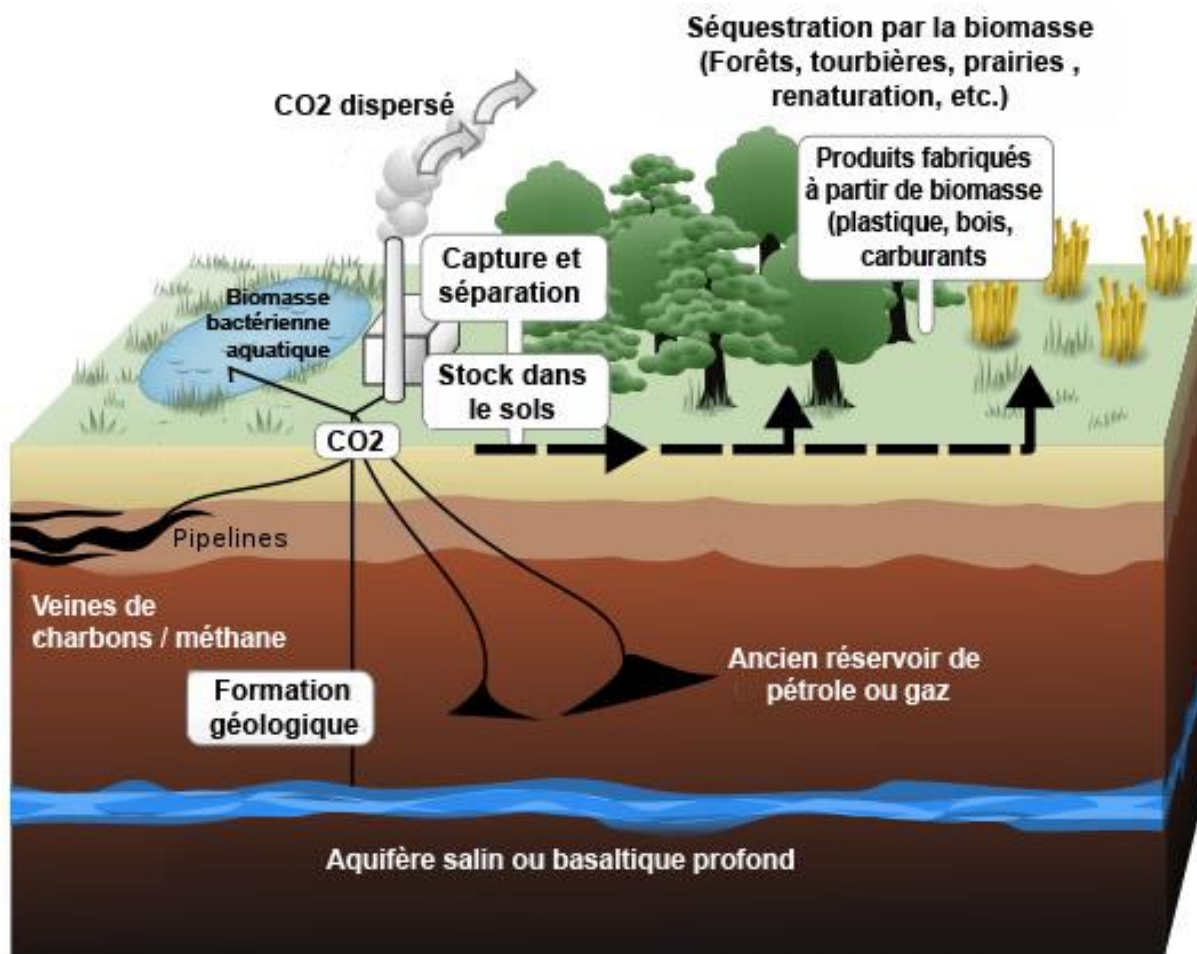


Figure II.8 : Différentes méthodes de stockage de CO<sub>2</sub>.

Tableau II.3 : Capacité mondiale de stockage des différents réservoirs.

Réservoir	Capacités mondiales (Gt CO <sub>2</sub> )	Nombre d'années* d'émission Correspondantes
Empty Cell		
Aquifères salins profonds	500–10000	25–500
Gisements gaziers et pétroliers	500–3000	25–150
Océan profond	>5000	>250

### II.6.3 Valorisation du CO<sub>2</sub>

Le principe de la valorisation du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> consiste à le considérer comme une matière première, que l'on capte à la sortie des fumées industrielles et que l'on exploite pour réaliser un certain nombre de produits ou d'opérations commercialement rentables. Il s'agit donc d'une voie différente de celle du simple stockage en sous-sol du CO<sub>2</sub>.

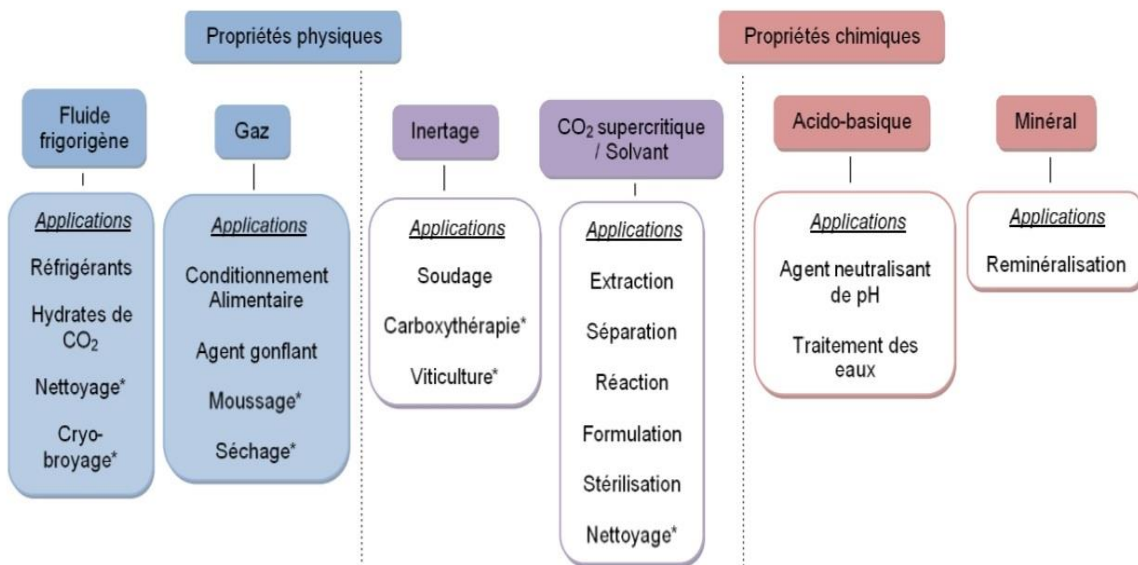


On parle quelquefois du triptyque captage-stockage-valorisation. Trois grands groupes de valorisation ont été identifiés : [17]

**II.6.3.1 La valorisation sans transformation**

Où le CO<sub>2</sub> est utilisé pour ses propriétés physiques tel que. [17]

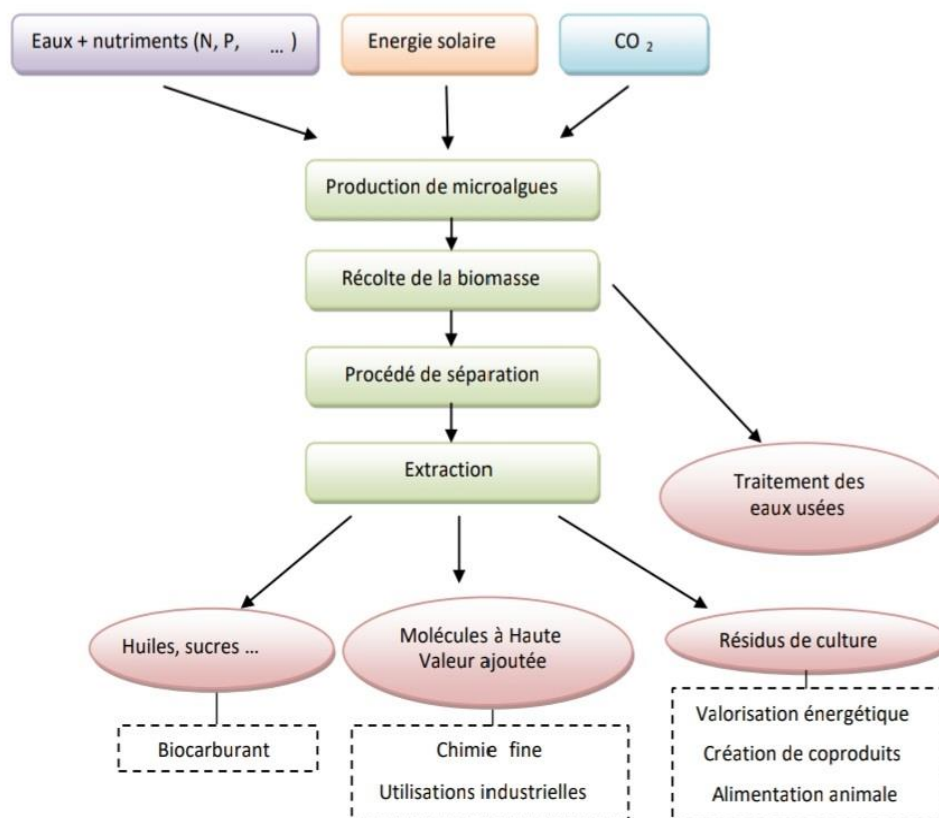
- La récupération assistée aux hydrocarbures par CO<sub>2</sub>. [18]
- Récupération en géothermie profonde par CO<sub>2</sub>. [19]
- Applications et utilisations industrielles de CO<sub>2</sub>. [18]



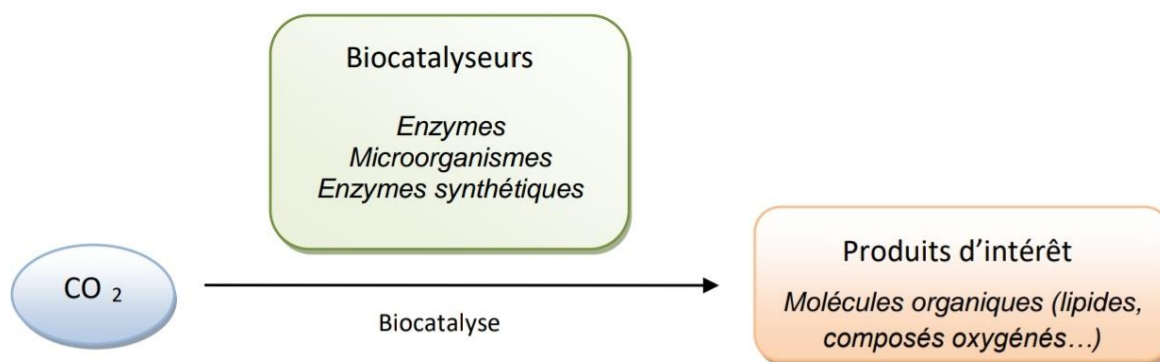
**Figure II.9** : Classification des applications du CO<sub>2</sub> selon ses propriétés. [18]

**II.6.3.2 Les application biologique de CO<sub>2</sub>** : Plusieurs application microbiologiques du CO<sub>2</sub> ont été mise en œuvre tel que :

- La culture de micro algues. [20, 21]
- La biocatalyse. [21]



**Figure II.10 :** Procédé de valorisation des micro-algues. [18]



**Figure II.11 :** Schéma simplifié de la conversion du CO<sub>2</sub> par biocatalyse. [18]

### II.6.3.3 Applications et valorisation chimique de CO<sub>2</sub>

Le carbone est un élément essentiel de la plupart des produits nécessaires à la société, et le carbone fait partie de la structure de la plupart des produits chimiques, le recyclage du carbone à partir du CO<sub>2</sub> est l'une des options qui peuvent être envisagées par l'industrie chimique pour réduire l'empreinte environnementale des produits chimiques et des polymères, développer l'utilisation de matières premières alternatives de carbone et améliorer la circularité du carbone. [22]

Pendant que la valorisation sans transformation du CO<sub>2</sub> (valorisation physique) a une portée beaucoup plus large, la valorisation chimique quant à elle, fait sujet d'intenses recherche et d'activité d'innovation à savoir : [22]

- La synthèse organique « carboxylation » (la figure II.12).
- La minéralisation ex-situ.
- L'hydrogénation.

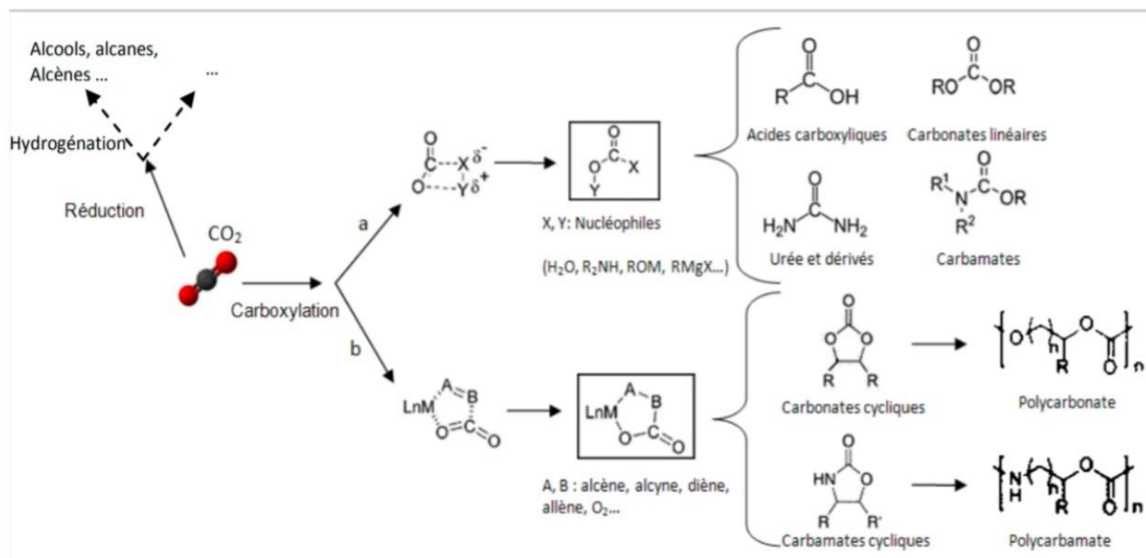


Figure II.12 : Principales transformations du CO<sub>2</sub> par synthèse organique. [18]

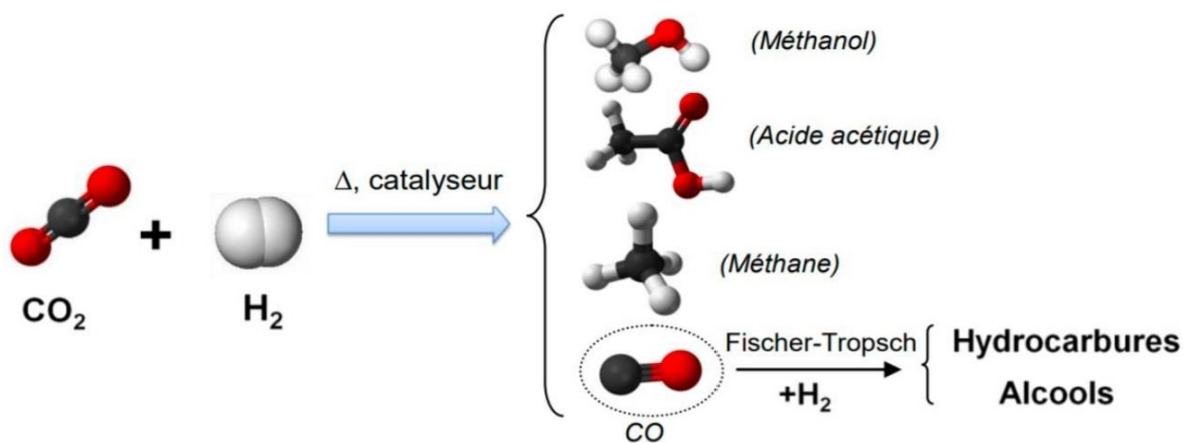


Figure II.13 : Hydrogénation du CO<sub>2</sub>. [18]

- Méthanation
- Reformage sec

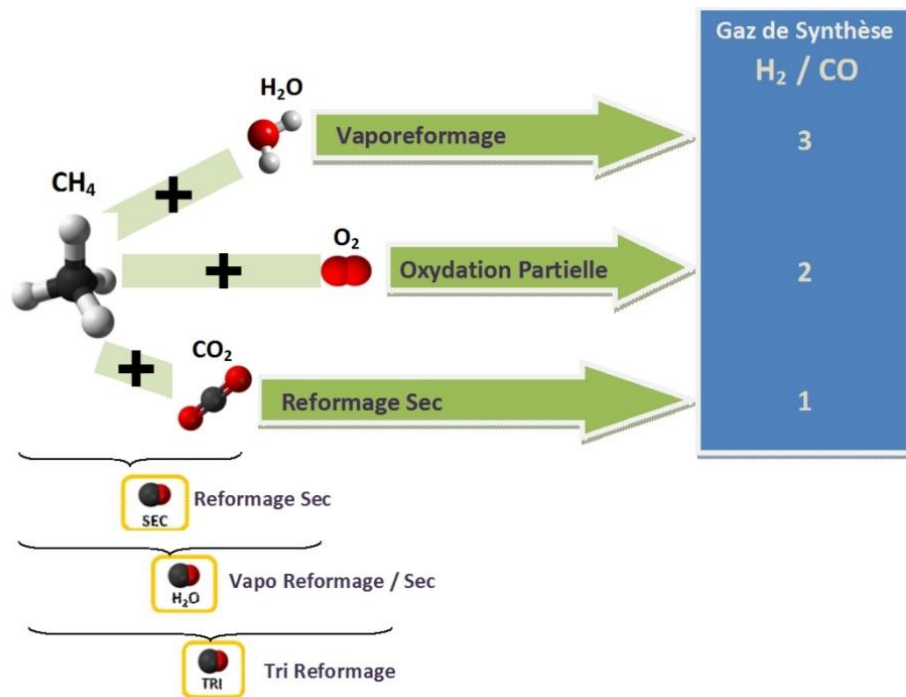


Figure II.14 : Représentation des différentes voies de reformage du méthane. [18]

➤ **Electrolyse**

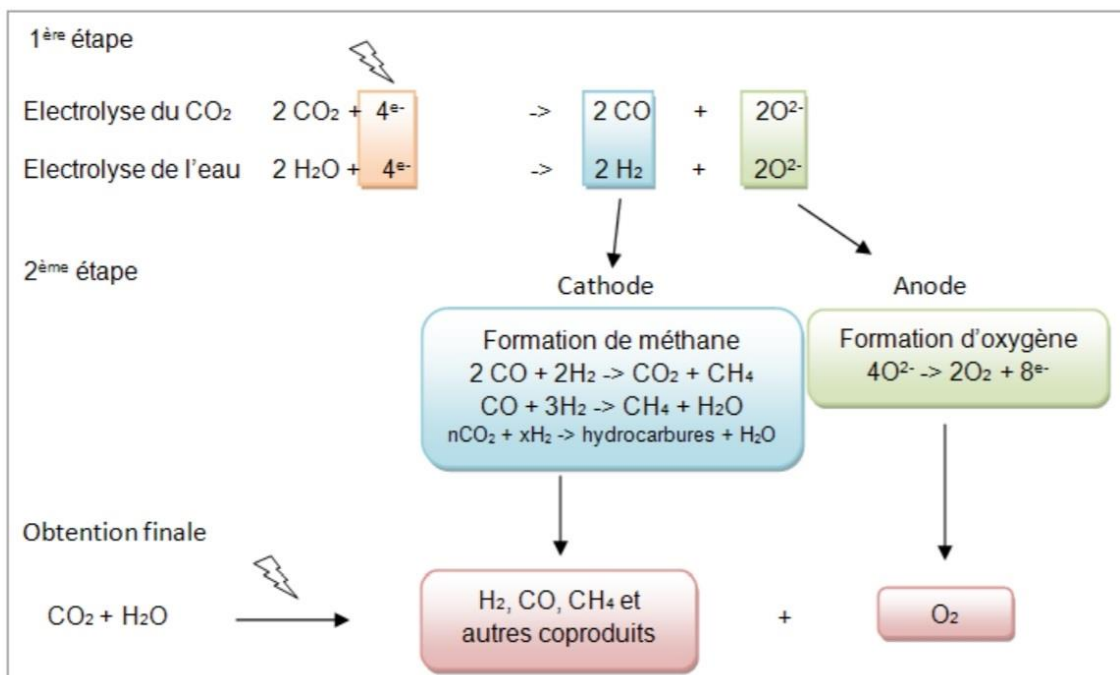
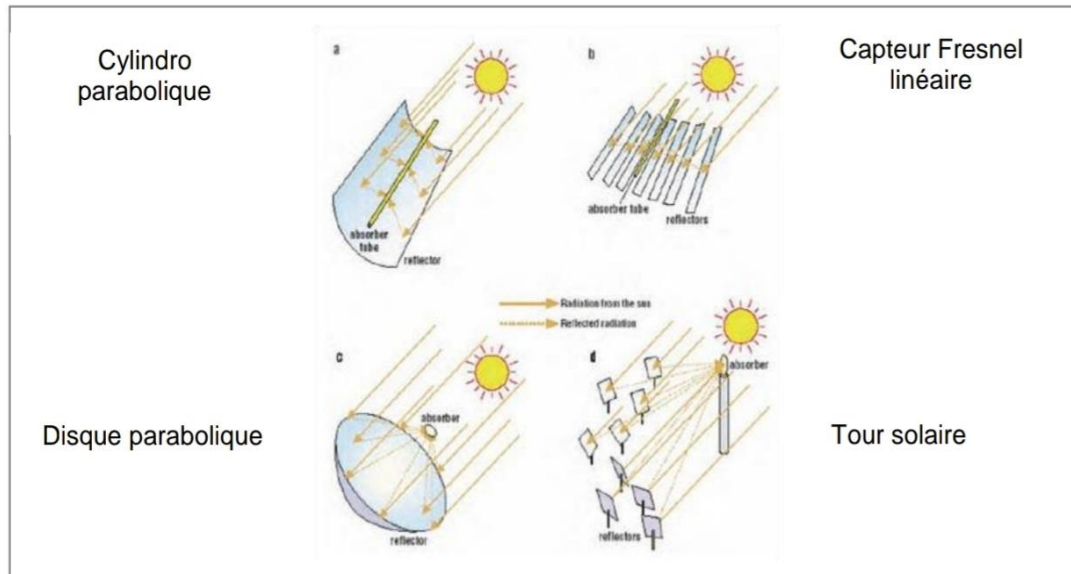


Figure II.15 : Schéma de principe de l'électrolyse du CO<sub>2</sub>. [18]

➤ **Thermochimie**



**Figure II.16 :** Présentation de différentes installations solaires à concentration. [18]

#### II.6.4 Captage direct du CO<sub>2</sub> dans l'air

La capture de dioxyde de carbone n'est pas nouvelle, mais elle se fait habituellement sur les sites industriels (sidérurgies, cimenteries, centrales à charbon...), à la sortie des cheminées fortement émettrices. Cette technique permet de réduire leurs émissions. En revanche, le captage direct du CO<sub>2</sub> ne va pas réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, mais va retirer le CO<sub>2</sub> qui est présent dans l'air.

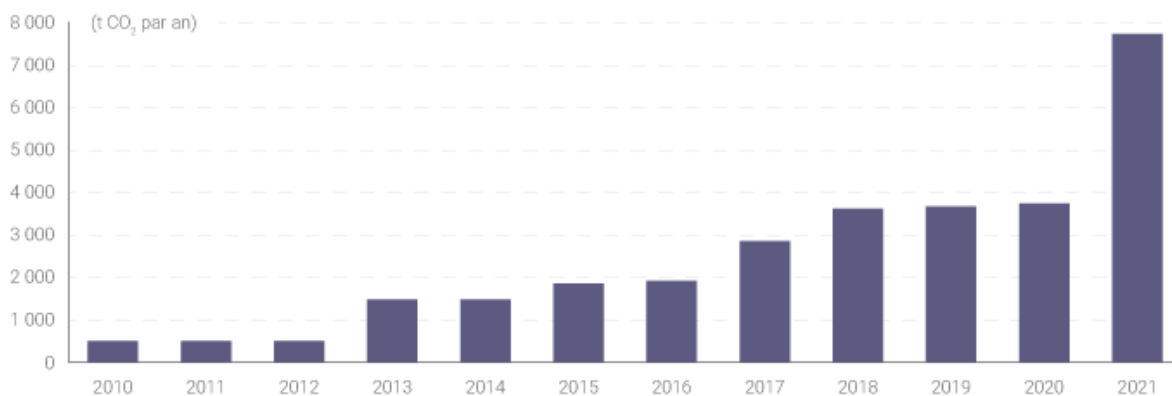
Cette technologie, appelée « Direct Air Capture » (DAC), pourrait permettre de compenser les émissions de certains secteurs comme l'aérien ou l'agriculture, qui sont difficiles à décarbonner. [23]

Bien que toute technologie de capture d'air individuelle soit confrontée à une foule de défis techniques, il existe deux facteurs fondamentaux qui rendent la capture directe plus difficile que le processus de capture de CO<sub>2</sub> postcombustion conventionnel : premièrement, le coût de l'énergie et des matériaux pour déplacer l'air à travers un absorbeur, et deuxièmement la barrière thermodynamique due à la faible concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air (0.04% dans l'air comparé à 30% environ dans les fumées).[24]



**Figure II.17 :** Installation de captage direct de CO<sub>2</sub> dans l'air à Hinwil dans le canton de Zurich. (©Climeworks). [25]

### Captage direct du CO<sub>2</sub> dans l'air Évolution des capacités dans le monde



Connaissance des Énergies | Source : Direct Air Capture – A key technology for net zero, AIE, avril 2022.

**Figure II.18 :** Evolution des capacités de captage direct de CO<sub>2</sub> dans le monde.

#### II.7 Chaudières à combustible

L'industrie a fait de nombreux usages de la vapeur d'eau ; principalement comme fluide caloporteur ou pour le fonctionnement de machines à vapeur. Ses propriétés de transfert de chaleur sont utilisées pour les procédés de stérilisation. Ainsi l'utilisation de la vapeur dans les procédés industriels est très répandue, car elle présente de grands avantages : une faible toxicité, une facilité de transport, un rendement élevé...

La production de vapeur nécessite l'utilisation d'un combustible et une quantité de chaleur suffisante pour transformer l'eau d'alimentation en vapeur. Le dispositif permettant



de chauffer l'eau et de produire de la vapeur au-delà de la pression atmosphérique est la chaudière.

En effet, la combustion est la plus importante des sources industrielles de chaleur et d'énergie interne (foyers de chaudières, fours industriels, moteur à combustion interne, turbines à gaz, fusées etc...). Elle représente 75 à 80 % de l'énergie produite au monde (ZINSALO J. M, 2002). Les chaudières à combustible sont considérées comme source de production et d'émission du CO<sub>2</sub>. Il est donc intéressant pour les industriels de trouver des moyens de récupération et de valorisation de ce gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte que nous avons orienté notre thème et avons étudié l'utilisation de CO<sub>2</sub> des fumés chauds issus des chaudières de CEVITAL pour la carbonatation lors du raffinage du sucre. Cependant, la quantité utilisée pour la carbonatation est faible comparée à celle dégagée par les chaudières. L'excès de CO<sub>2</sub> est donc dégagé dans l'atmosphère, pour cela des mesures doivent être prises par l'entreprise afin de récupérer l'excès de CO<sub>2</sub> dégagé dans l'atmosphère. Dans ce travail nous avons proposé quelques solutions pour résoudre ce problème.

### **II.8 Conclusion :**

Il y a plusieurs approches interdépendantes visant à limiter l'émission dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub> : mesures politiques, mécanismes économiques et ruptures technologiques. Le CO<sub>2</sub> représente un gaz d'intérêt industriel et/ou une nouvelle source de carbone pour l'élaboration de composés minéraux ou organiques, d'intérêt commercial.

En le valorisant le CO<sub>2</sub> répond ainsi à une logique d'économie circulaire. [20]

Les défis sont encore plus grands pour le captage direct dans l'air, tant pour la consommation d'énergie que par le coût. Atteindre la neutralité carbone nécessitera de réduire drastiquement nos émissions, Mais ça ne suffira pas. Une part – entre 10 et 20 % – est inévitable, du moins aujourd'hui. Nous aurons alors besoin de la capture directe dans l'air, à la fois pour retirer le CO<sub>2</sub> que nous avons déjà émis, et cette part que nous allons continuer d'émettre. » [26]

## Introduction

Dans cette partie nous allons présenter l'entreprise qui nous a accueillis pour la réalisation de notre stage (Cevital). C'est le premier complexe agroalimentaire en Algérie et dans ce présent chapitre nous allons parler de son évolution historique et ses multiples activités industrielles. Par la suite nous présenteront les deux unités : « énergie et utilité » qui est responsable de la production du CO<sub>2</sub> ainsi que la « raffinerie » en se basant sur la section carbonatation ou est consommé le CO<sub>2</sub>.

### III.1 Présentation de l'entreprise d'accueil

#### III.1.1 Le groupe Cevital

Groupe Cevital est un conglomérat algérien de l'industrie agroalimentaire, a grande distribution, l'industrie et les services. Créé par l'entrepreneur Issad Rebrab en 1998, Cevital est le premier groupe privé algérien, présent également à l'international 1 et la troisième entreprise algérienne par le chiffre d'affaires. Il emploie 18 000 collaborateurs répartis sur 26 filiales. Le groupe Cevital est le leader de l'agroalimentaire en Afrique.



**Figure III.1 :** Situation géographique de complexe Cevital.



III.1.2 Organigramme de Cevital

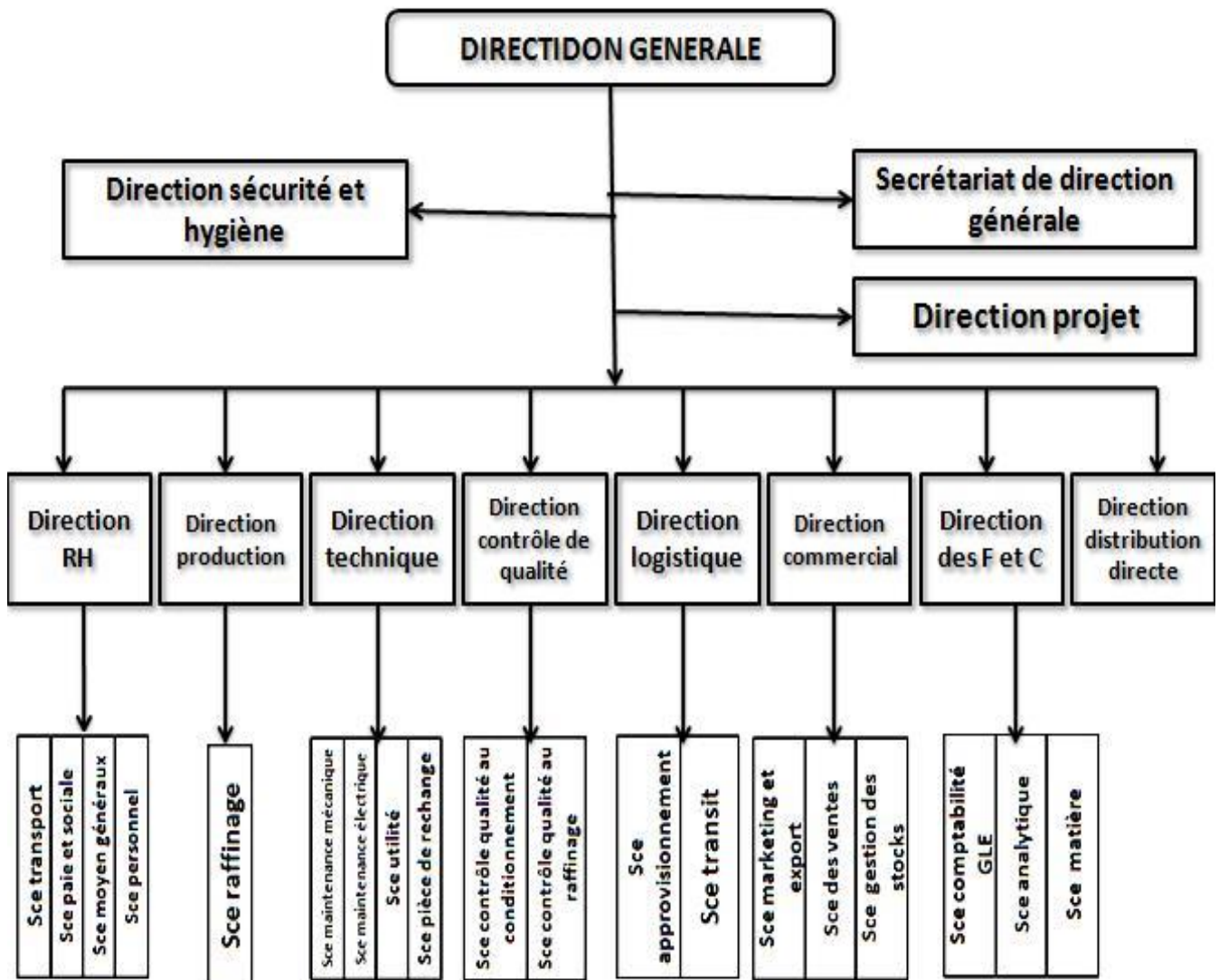


Figure III.2 : Organigramme de groupe Cevital.

III.2 Présentation de l'unité d'affectation

III.2.1 Unité Energie et utilités

- Service cogénération dit énergie

La direction d'énergie est constituée de deux départements, qui sont, le département électricité (production et distribution de l'énergie électrique) et le département chaufferie (production et distribution de la vapeur).

**III.2.1.1 La Nécessité du Réseau de cogénération**

La demande de puissance supplémentaire exigé par l'extension du complexe (l'installation d'une nouvelle raffinerie de sucre 3000T/J) ne pouvant être satisfaite par le réseau SONELGAZ. Cevital a opté pour une production autonome par des turbogénérateurs à vapeur, avec des turbines à contre pression utilisant la vapeur du procès. [1]

Il a été procédé donc à l'achat et à l'installation de deux groupes blocs (turbine, alternateur, transformateur) de 32MV de puissance unitaire.

Cette puissance installée étant largement supérieur au besoin du complexe (25MVA), Cevital envisage de rétrocéder l'excédent au réseau Sonelgaz.

**III.2.1.2 Etude de la cogénération cevital****a) Généralités**

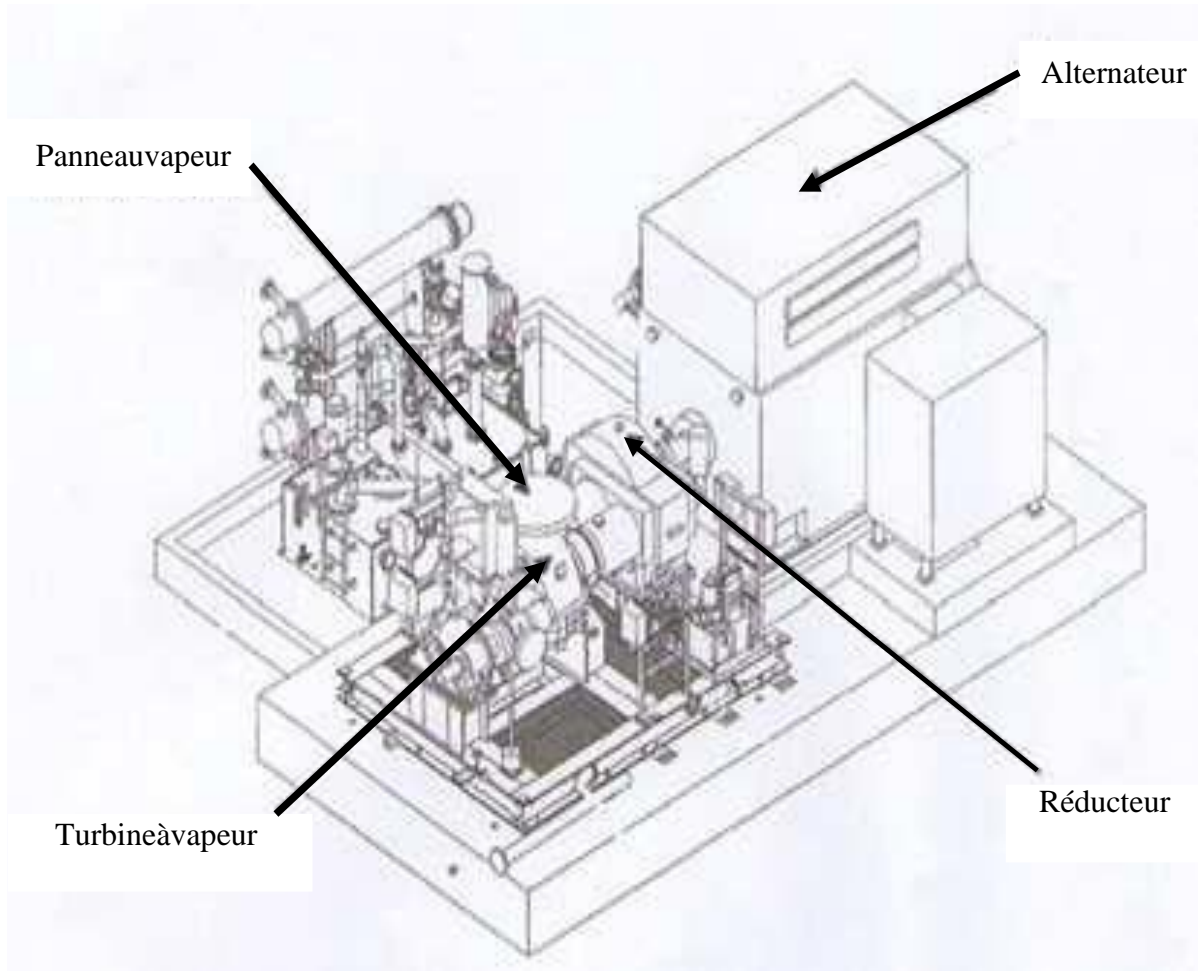
Pour satisfaire les besoins du complexe en énergie électrique, en vapeur et en CO<sub>2</sub>, Cevital a décidé d'opter pour le principe de cogénération, soit :

- ✓ Production de vapeur à 40-50 bars dans deux chaudières à écran de fumée.
- ✓ Détente de cette vapeur à 2.5 bars dans des turbines à contre pression.
- ✓ Refroidissement de cette vapeur dans des échangeurs tubulaires pour fournir la chaleur nécessaire au processus, avant sa condensation dans les aérocondenseurs.
- ✓ Récupération des gaz de cheminée des chaudières pour valorisation du CO<sub>2</sub>. [1]

**b) Principe de la cogénération**

La cogénération production combinée chaleur/force recouvre un ensemble de techniques de production délivrant de façon simultanée de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique, cette dernière étant le plus souvent utilisée pour produire de l'électricité par couplage à un alternateur.

Elle est constituée d'une turbine à vapeur couplée à une chaudière, cette dernière est alimentée par le gaz naturel pour générer de la vapeur à partir d'eau liquide. La vapeur est ensuite utilisée pour actionner la turbine, qui entraîne un alternateur électrique. [1]



**Figure III.3 :** Vue générale de la cogénération Cevital.

### c) Avantages de la cogénération

Investir dans un système de cogénération représente une étape intelligente d'un point de vue économique et écologique pour de nombreuses organisations, nous allons citer quelques avantages : [1]

#### ✓ Une économie d'énergie significative

Grâce à cette production combinée, les pertes d'énergie se réduisent de manière significative. Ainsi, la cogénération permet d'économiser entre 15 et 20 % d'énergie primaire par rapport à la production séparée de ces mêmes quantités de chaleur et d'électricité.

**✓ Réduction des émissions CO<sub>2</sub>**

Les émissions polluantes, dont le CO<sub>2</sub>, sont généralement directement proportionnelles à la consommation d'énergie. Qui dit économie d'énergie primaire pour assurer les mêmes besoins (électriques et thermiques), dit réduction des émissions en CO<sub>2</sub>.

**✓ Un gain économique attrayant**

La cogénération permet de produire 1 kWh d'électricité avec un peu plus de 1 kWh de gaz naturel. L'intérêt économique est immédiat, car les coûts sont totalement différents. Alors qu'1 kWh de gaz naturel coûte environ 5 c€, l'électricité vaut entre 9 à 17 c€ par kWh.

**III.2.1.3 Le département chaufferie**

Les chaudières à vapeur sont des échangeurs à chaleur destinés à produire de la vapeur à une pression et une température déterminée en fonction de son usage. Elles sont en générales alimentées en eau osmosée préalablement traitée ; et en combustibles (tels que le fuel, le gaz ou le charbon). En brûlant ces combustibles, la chaleur produite est transférée à l'eau. [2]

**III.2.1.4 Constitution de la chaufferie****A. Échangeur de chaleur**

Une partie de l'eau alimentant la bache passe par un échangeur thermique à plaque qui permet d'élever la température de cette eau à 45°C.

**B. Bache alimentaire**

La bache alimentaire est un réservoir d'eau de 50m<sup>3</sup> qui sert à équilibrer le débit d'eau et permet de préparer l'eau de la chaudière. Elle est située au minimum à 2 mètres au-dessus des chaudières. La bache est alimentée en eau déminéralisée en passant par un dégazeur thermique et sera préchauffée par la vapeur collectée sur le réseau. Le traitement thermique permet de laisser la bache de dégazage sous une pression de 0,25 bar ce qui nous assure une température de 105°C. [2]

**C. Dégazeur thermique**

Le dégazeur thermique est conçu pour enlever à l'eau d'appoint l'oxygène et le gaz carbonique qu'elle contient. L'élimination physique des gaz est réalisée par un brassage et une ébullition importante. Dans la tête du dégazeur, l'eau est pulvérisée en un maximum de gouttelettes et en entourant celles-ci d'une atmosphère de vapeur, cela donne un rapport

surface/masse suffisamment important pour permettre un transfert thermique rapide vers l'eau qui atteint rapidement la température de saturation. De cette façon, les gaz dissous sont libérés et entraînés vers l'atmosphère. [2]

#### **D. Post-traitement de l'eau alimentaire**

Pour éviter la corrosion, les traces d'oxygène encore présentes après le dégazage (0,02mg/l) sont éliminées par l'ajout du sulfite de sodium ou le NALCO77216. Pour alcaliniser le milieu à un pH avoisinant 9, du phosphate trisodique ou NALCO77225 est dosé. [2]

#### **E. L'économiseur**

Les gaz d'échappement des chaudières contiennent une énergie potentielle considérable à un niveau de température élevée. L'économiseur avec surfaces additionnelles à grande efficacité utilise cette énergie potentielle en préchauffant l'eau d'alimentation augmentant les performances de la chaudière de 5 à 7 % et en réduisant la consommation d'énergie.

L'économiseur est directement intégré à la conduite de fumées située derrière la chaudière et est raccordé à la conduite de refoulement de l'eau d'alimentation afin de préchauffer l'eau d'alimentation pour réduire les pertes de fumées et obtenir une rentabilité maximale. [2]

#### **F. Chaudière à vapeur**

La chaufferie est composée de quatre chaudières de marque LOOS d'une capacité de 40 tonne/heure chacune à une pression de service de 14 bars. Chaque chaudière est équipée de deux brûleurs utilisant comme combustible le gaz naturel. [2]

Les chaudières sont du type « à tube de fumée », les gaz circulent à l'intérieur des tubes entourés par l'eau de la chaudière. Chaque chaudière est équipée de :

- **Brûleurs** : Le brûleur a pour rôle de créer un mélange air – gaz aussi homogène que possible et dans les proportions exigées pour avoir un rendement thermique meilleur.
- **Instruments de contrôle de niveau** : Le contrôle de niveau agit directement sur l'arrivée de combustible afin de l'arrêter au cas où l'eau atteindrait un niveau critique au-dessus des surfaces de chauffes, en cas d'arrêt d'alimentation en eau.

- **Pot d'éclatement** : La réglementation interdit le jeter de l'eau à une température élevée dans les égouts. Le rôle du pot est de refroidir l'eau des purges grâce à un serpentin d'eau froide.
- **Les purges** : Les purges permettent de maintenir en permanence la teneur en sel de l'eau de la chaudière dans les limites admissibles. On distingue deux types de purges : les purges de surfaces et les purges de fond

### III.2.1.5 Exploitation de la vapeur et du CO<sub>2</sub> issues des chaudières

L'eau transformée en vapeur est acheminée dans les conduites de départ. La vapeur est collectée dans un collecteur de vapeur et acheminée vers les deux raffineries de sucre et de l'huile.

Les produits de combustion, contenant le gaz carbonique, sont acheminés vers la section carbonatation de la raffinerie de sucres via les pompes de CO<sub>2</sub>. [2]

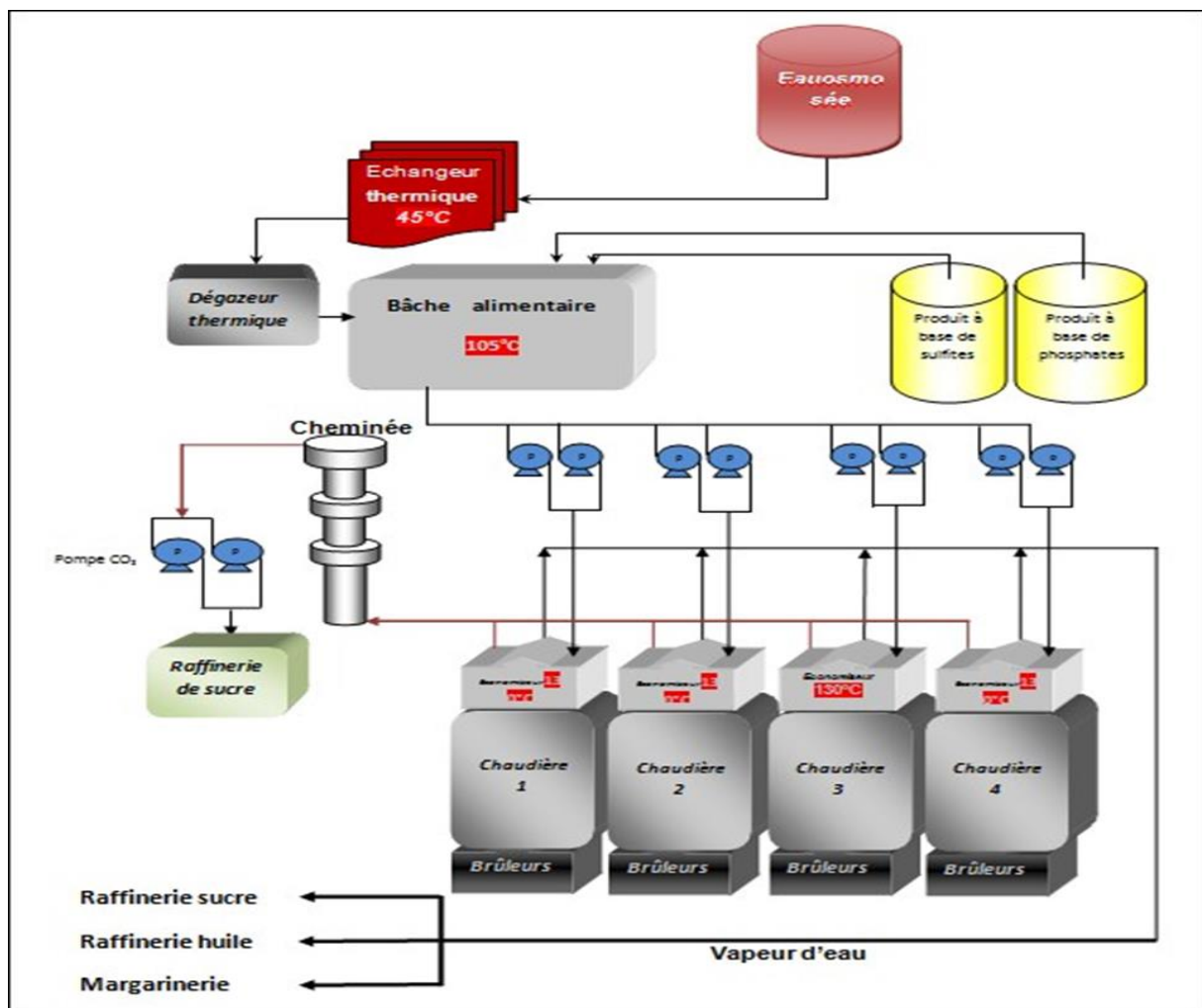


Figure III.4 : Acheminement du gaz carbonique vers la raffinerie.

### III.2.2 La Raffinerie

La raffinerie de sucre a pour mission le traitement et la transformation du sucre roux de canne afin de fabriquer du sucre blanc. Elle est composée de plusieurs ateliers appelés sections. Dans ce chapitre nous allons décrire le procédé industriel de la raffinerie, donc la mission, équipements et principe de fonctionnement de chacune de ses sections. [3]

#### III.2.2.1 Description du processus de la raffinerie de sucre

Le processus de fabrication de la raffinerie de sucre de CEVITAL est représenté sur la Figure III.5 suivante :

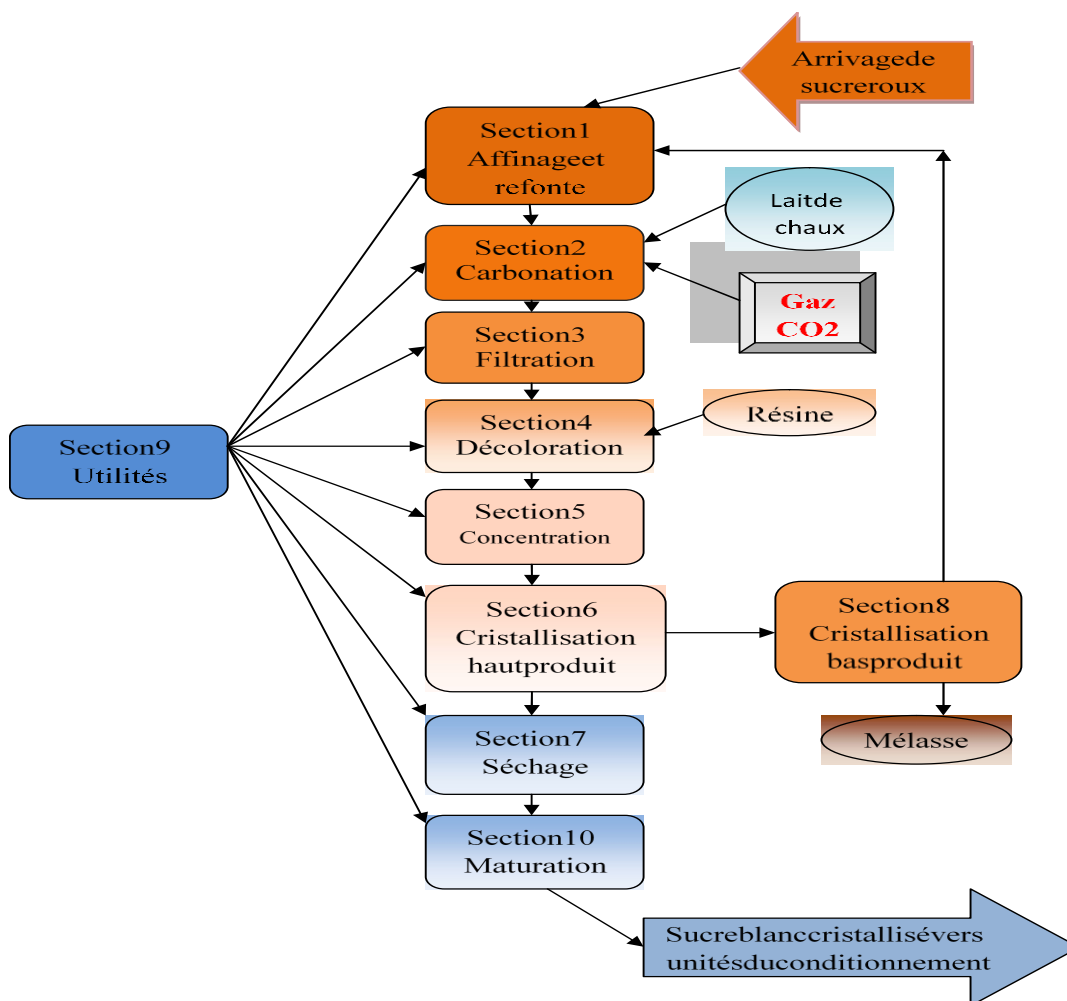


Figure III.5 : Schéma synoptique de processus de la raffinerie de sucre

#### 1. Section affinage et refonte

- Affinage

Le sucre roux est pesé et mélangé à une quantité de liqueur d'affinage saturé en sucre. Puis malaxé pour permettre la diffusion des impuretés superficielles sans provoquer la refonte



des cristaux. Ensuite l'égout, est séparé à l'aide de centrifugeuse discontinue pour extraire le maximum de sucre.

- **Refonte**

Le sucre affiné obtenu est ensuite refondu à l'eau dans un refondoir de façon à obtenir un sirop.

Le but de l'affinage permet d'éliminer les impuretés de la surface des cristaux par contre la refonte consiste à obtenir un sirop de sucre.

## **2. Section carbonatation**

La carbonatation a pour but d'éliminer un maximum d'impuretés et colorants par carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) consiste à additionner du lait de chaux au sirop et à le faire barboter en lui injectant du  $\text{CO}_2$ . Ce dernier permet de transformer la chaux en carbonate insoluble qui piège les impuretés dans le sirop. Ce procédé permet l'utilisation de  $\text{CO}_2$  dégagé par les chaudières et permet ainsi la valorisation et l'exploitation de ce gaz à effet de serre.

## **3. Section filtration**

Le sirop issu de la carbonatation contient une suspension de carbonate de calcium. Cette dernière est séparée par une filtration sur des filtres Auto-nettoyants à bougies en toile, Le sirop filtré est envoyé vers la section décoloration, la boue résultante passera par un filtre presse pour récupérer le sucre résiduel, sous forme de petit jus. Les boues (ou écumes) sont évacuées et utilisées pour l'amendement du sol (engrais). [3]

## **4. Section décoloration**

La décoloration consiste à pousser la décoloration de sucre au maximum à l'aide des résines échangeuses d'ions décolorantes. Ces derniers sont régénérés après saturation par le passage de saumure. Cette section se divise en deux sous-sections :

- ✓ **La première** : concerne la décoloration de sirop filtre à l'aide des résines échangeuses d'ions.
- ✓ **La deuxième** : concerne à préparer et le retrait des saumures de régénération en utilisant la nano-filtration.

But : Emprisonnement des pigments colorants dans la résine.



### **5. Section concentration**

Cette opération consiste à ramener la concentration du sirop décoloré à un brix de 70% par l'évaporation d'une certaine quantité d'eau introduite par les opérations précédentes. Cette opération facilitera la cristallisation du sucre. Elle est la partie la plus délicate du processus de fabrication. [3]

### **6. Sections de Cristallisation HP (haut-produit)**

La cristallisation est une opération qui a une forte incidence sur l'ensemble de l'équilibre énergétique de l'usine. Le sirop est concentré dans des bacs spéciaux appelés « cuites ».

Elle est réalisée en faisant l'opération de grainage en introduisant une semence de telle sorte que les particules du sirop se fixent autour. Quand les cristaux atteignent la taille voulue et que les cuites arrivent à leur volume maximal, le produit est déchargé dans un malaxeur qui sera ensuite centrifugé par desessoreuses séparant les cristaux et le sirop. [3]

### **7. Sections Séchage**

Le sucre ainsi obtenu après centrifugation sera humide, alors un séchage pour éliminer cette humidité est nécessaire. On utilise un tube sécheur et un refroidisseur, en sortant de la cristallisation, le sucre est humide à 0.05%. Pour une bonne conservation, il est séché dans un cylindre à air chaud qui provoque l'évaporation de l'humidité, puis refroidie dans un sécheur à lit fluidisant et enfin envoyé vers les silos de maturation pour finaliser la déshumidification et assurer son stockage en vrac. [3]

### **8. Sections de Cristallisation BP (bas-produit)**

Cette section nous permet de récupérer le sucre encore contenu dans les égouts provenant des cuites Haute Pureté, cela se fait en trois étapes (jets) dans des cuites puis des centrifuges.

Lors de l'affinage, la séparation du sucre et du sirop de lavage (liqueur d'affinage) nous donne un sirop appelé égout d'affinage. Celui-ci est séparé en deux. L'égout riche est réutilisé comme liqueur d'affinage. L'égout pauvre est envoyé vers cette section pour son épuisement en sucre. [3]

### 9. Sections de Maturation et conditionnement

Cette section consiste à stocker le sucre parvenant du séchage dans des silos pendant 48 heures et à assurer sa maturation à l'aide de l'air conditionné qui élimine l'humidité résiduelle dans les cristaux de sucre. Ainsi, le sucre produit sera conditionné en sacs.

**But :** L'élimination de l'humidité résiduelle et le conditionnement dans des différents sacs.

### III.3 La carbonatation

#### III.3.1 Principe de la Carbonatation

La carbonatation est un procédé chimique permettant de décolorer le sirop résultant de la refonte de sucre brute affiné.

Ce procédé consiste à additionner au sirop de la chaux préparée sous forme de lait de chaux dosé à 16° baumé, et à faire barboter dans ce mélange, et introduire dans des chaudières à carbonater, du gaz CO<sub>2</sub> provenant des chaudières à vapeur. Sous l'action du CO<sub>2</sub> la chaux se transforme en carbonate insoluble qui piège les impuretés contenues dans le sirop de refonte.

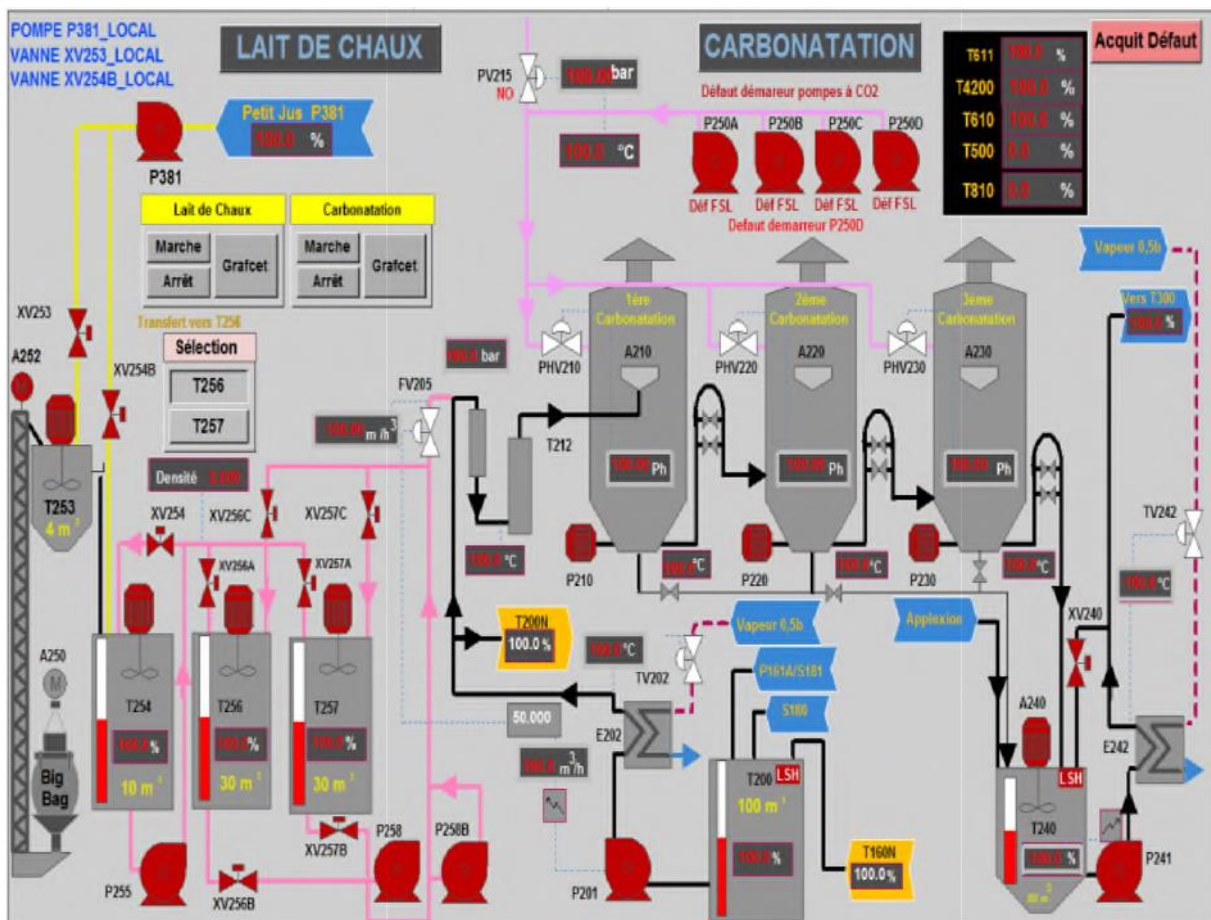


Figure III.6 : Schéma général de la section carbonatation.

### **III.3.2 Utilisation du CO<sub>2</sub> issue des gaz de combustion dans les chaudières**

Les chaudières à vapeur sont des échangeurs à chaleur destinés à produire de la vapeur à une pression et une température déterminée en fonction de son usage. Elles sont en générales alimentées en eau osmosée préalablement traitée ; et en combustibles (tels que le fuel, le gaz ou le charbon). En brûlant ces combustibles, la chaleur produite est transférée à l'eau. Les produits de combustion, contenant le gaz carbonique, sont acheminés vers la section carbonatation de la raffinerie de sucres via les pompes de CO<sub>2</sub>. [2]

C'est dans ce contexte et à fin de valoriser le CO<sub>2</sub> issue des gaz de combustion dans les chaudières un procédé de récupération et de valorisation de ce gaz est mis en place par Cevital. Ce procédé consiste en la récupération de CO<sub>2</sub> issue des fumées de chaudière et son utilisation dans le procédé de carbonatation utilisé pour le raffinage du sucre.

### **III.3.3 Généralité de la section carbonatation :**

#### **➤ Description du procédé**

Le sirop de refonte tamisé arrive au bac T200 de capacité 120m<sup>3</sup> avec un débit d'environ 140 m<sup>3</sup>/h, la pompe P201.1 ou P201.2 (selon le choix) pompe le sirop dans la conduite vers l'échangeurs E202 pour élever sa température à environ 85°C (régulation de température par la vanne TV202), pour le mélanger avec de lait de chaux (pompé par la pompe P258.1 ou P258.2) dans le mélangeur statique M203, le débit de lait de chaux est régulé par la vanne de régulation de débit FV205.

La solution ainsi et conduite vers le A210 où subit la première carbonatation par le gaz carbonique qui proviens de la station Cogénération. Il entre avec un débit régulé par la vanne PHV210 jusqu'à avoir un PH = 11. Grâce aux vases communiquant on effectue la deuxième carbonatation dans le carbonateur A210, et grâce aux vases communiquant en achemine le sirop carbonaté qui sort avec un PH d'environ 8 et à une température T = 90°C vers le bac T240 et pompé par la pompe P241.1 ou P241.2 à travers l'échangeur E242 pour être conduit vers la section de filtration.

#### **➤ Lait de chaux**

Il est constitué d'un mélange de la chaux avec le petit jus extrait de la boue de sucre par des filtres presse dans la section de filtration (03). Le petit jus est utilisé pour la solution car la

chaux se dissous plus facilement dans l'eau sucrée afin d'augmenter la solubilité de la chaux et de minimiser la quantité d'eau dans le procès.

La chaux qui contenue dans le big-bag à chaux A250 est dosée par un élévateur A252 dans le bac T253 menu d'un agitateur, qui est le mélange avec le petit jus, la quantité de petit jus est réglée par la vanne DV254 contrôlée par le brixmètre DT255. Le mélange est acheminée vers le bac T254 muni d'un agitateur pour améliorer l'homogénéité de lait de chaux, puis on pompe le lait de chaux à l'aide d'une pompe P255 vers deux bacs T256/257 pour stockage et maturation, les deux bacs sont muni d'agitateurs pour éviter la décantation de la chaux.

- **Sirop** : c'est le sirop de sucre obtenu dans la section affinage et refonte, qui est la section précédant la section carbonatation.
- **CO<sub>2</sub>** : issue des gaz de combustion dans les chaudières.

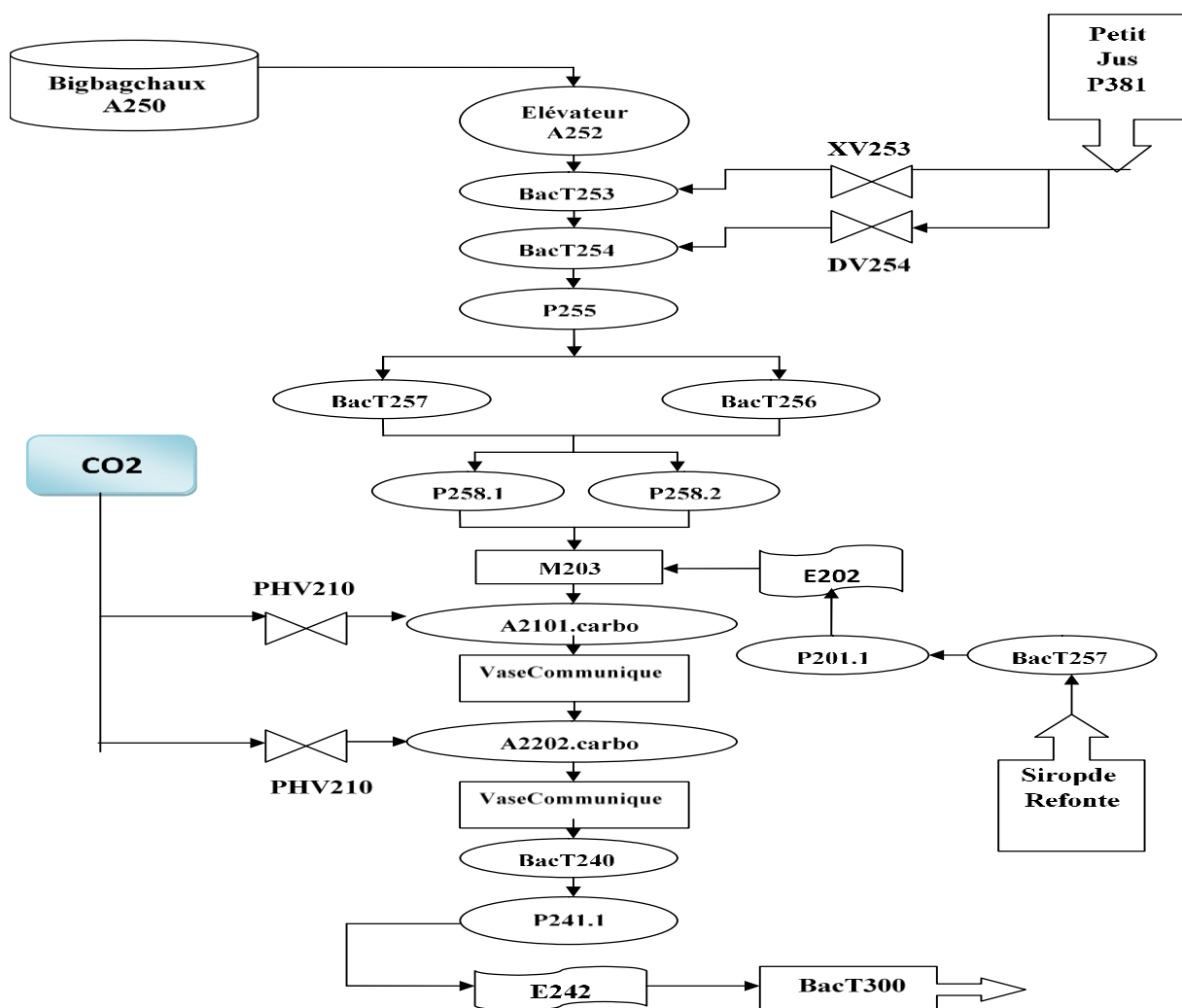
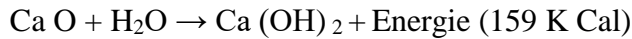


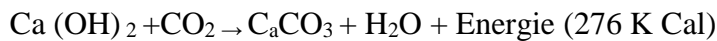
Figure III.7 : Schéma synoptique de la section carbonatation

### III.3.4 Réactions chimiques mettant en jeu le CO<sub>2</sub> issue des chaudières dans le procédé de carbonatations

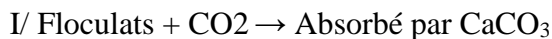
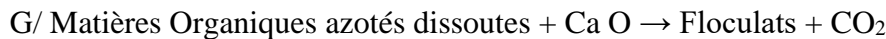
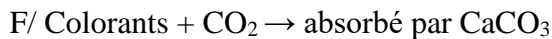
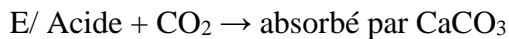
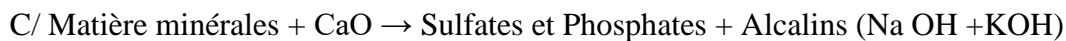
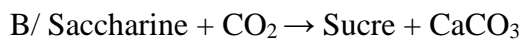
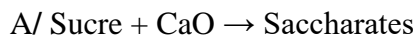
#### a) Atelier lait de chaux



#### b) Carbonatation



#### c) Les réactions principales de l'épuration



### III.3.5 Avantage de la carbonatation

La carbonatation présente plusieurs avantages sur les autres procédés de clarification, notamment :

- ✓ Le prix de la chaux relativement faible comparé aux produits qui utilisent les autres procédés.
- ✓ La haute densité opérationnelle de sirop (65 à 68 Brix) réduit la consommation de vapeur dans la partie aval de processus.
- ✓ C'est un procédé qui requiert le moins de personnel pour contrôlé du processus.

- ✓ C'est le seul procédé qui supprime spécifiquement les cendres inorganiques, jusqu'à 40% d'élimination pour certains sirop la diminution de la couleur peut atteindre 25 à 50%.
- ✓ C'est un procédé qui permet l'utilisation et la valorisation de CO<sub>2</sub> issue des chaudières et contribue ainsi à la réduction de CO<sub>2</sub> gaz à effet de serre.

#### III.4 L'atelier refroidissement des pompes CO<sub>2</sub>

L'atelier refroidissement des pompes CO<sub>2</sub>, fait partie de la section de carbonations, elle permet d'assurer la présence de gaz CO<sub>2</sub> refroidi dans la section 2. La transformation de sirop de la chaux préparée sous forme de lait de chaux dosé à 16° baumé, en carbonate insoluble, exige l'arrivée de gaz CO<sub>2</sub> provenant des chaudières à vapeur, à une température précise, à fin d'avoir une réaction chimique dans le but de piéger les impuretés contenues dans le sirop de refonte. [4]

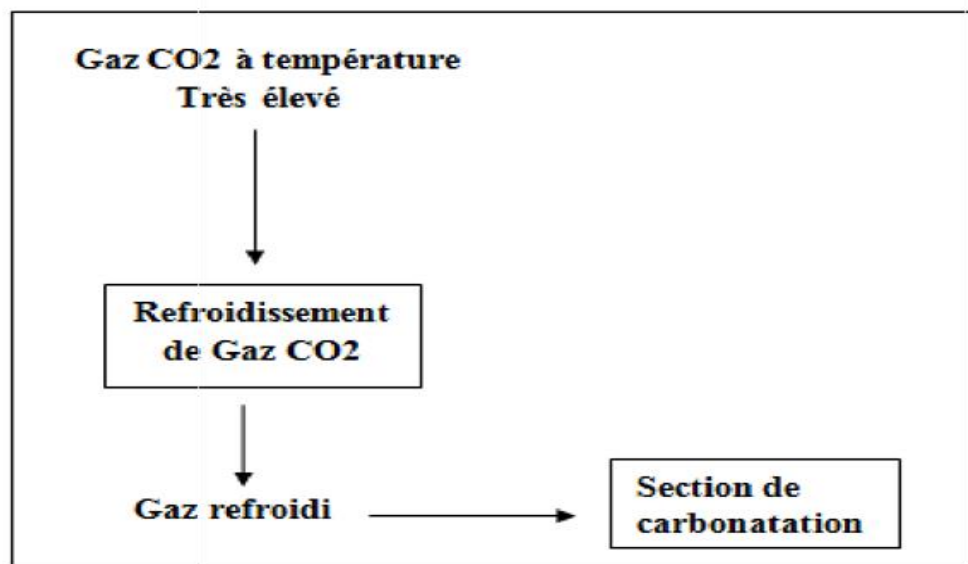


Figure III.8 : Schéma général de refroidissement.

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le procédé de combustion dans les chaudières ainsi que les réactions chimiques et les calculs mis en jeu afin de réaliser notre projet de fin d'étude équipements industriels étudiés ainsi que les réactions et les calculs chimiques mis en jeu afin de construire notre projet de fin d'étude. Après avoir calculé le taux de CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère, nous allons proposer une méthode pour la récupération de ce gaz, afin de préserver l'environnement du taux de dioxyde de carbone provenant des chaudières de CEVITAL. La méthode choisie est l'adsorption chimique en postcombustion.

## IV.2 Description des chaudières

### IV.2.1 Circuit eau-vapeur

L'eau osmosé, traitée préalablement dans l'unité d'osmose inverse, est envoyée vers l'unité de chaufferie via les pompes P106 et P107 avec un débit de 200 m<sup>3</sup>/h à une température allant de 19°C à 30°C. Une partie de l'eau est préchauffée à 45°C par l'échangeur thermique à plaques. Ce dernier récupère la chaleur de l'eau des purges des chaudières. L'eau est ensuite envoyée vers la bêche alimentaire via un dégazeur thermique. La surface de l'eau est considérablement agrandie dans le dégazeur à ruissellement au moyen de cascades. Cela entraîne une sortie spontanée de gaz inertes de l'eau. En même temps, l'eau ruisselant vers le bas via les cascades est échauffée par la vapeur remontante, libérant ainsi de l'oxygène libre et du gaz carbonique. La température de l'eau dans la bêche est ainsi élevée à 105 °C. Après le dégazage partiel, l'eau présente encore une teneur en oxygène d'environ 0.02mg/l. Pour cela, on injecte dans la bêche, avec des pompes doseuses M316/M317, le sulfite de sodium pour lier ces teneurs en oxygène résiduel et le phosphate tri-sodique pour alcaliniser l'eau à PH=9[1]. Un schéma général de circulation eau et vapeur dans la chaudière est représenté dans la **Figure IV.1** :



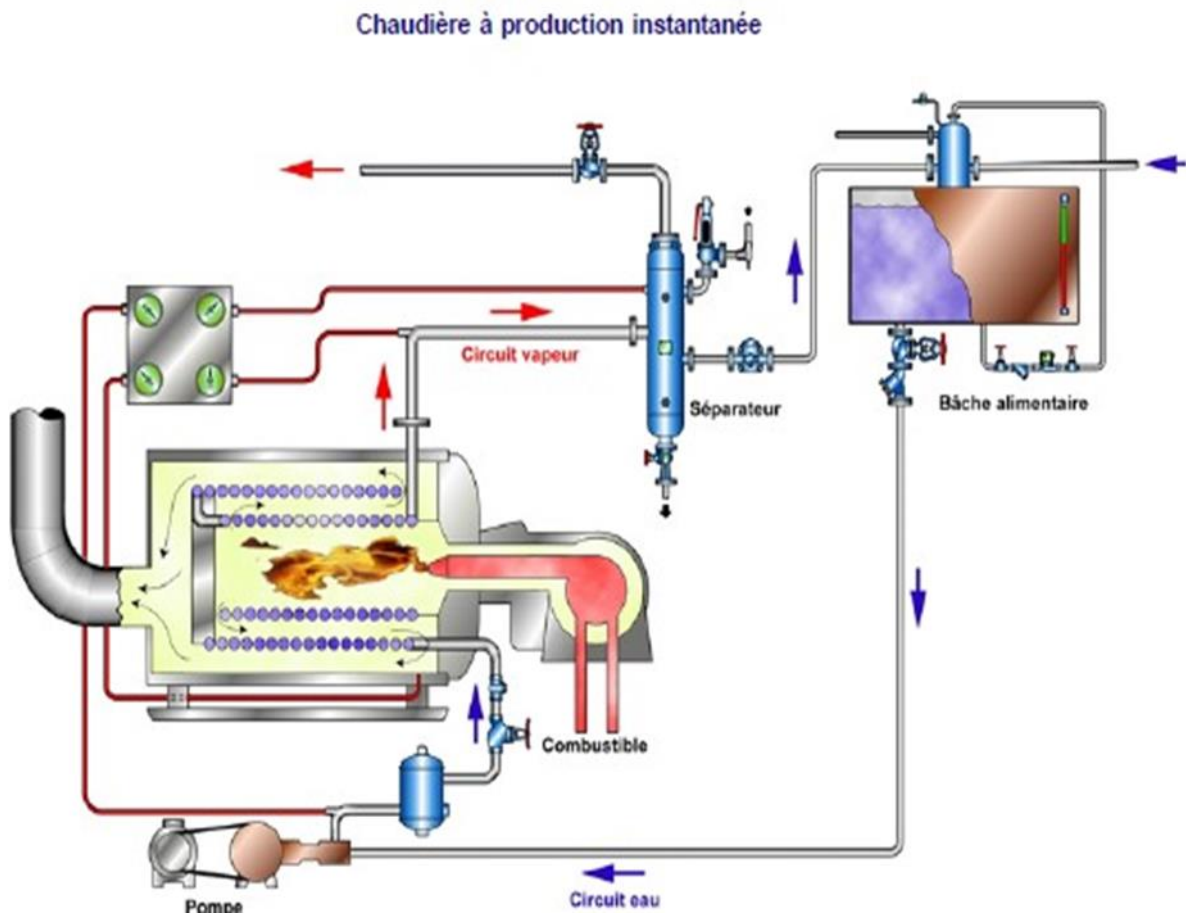


Figure IV.1 : Circuit eau et vapeur dans la chaufferie. [1]

#### IV.2.2 Circuit air-gaz :

L'air destiné à la combustion est poussé par le ventilateur de soufflage, il traverse d'abord un réchauffeur où il récupère la chaleur encore contenue dans les gaz de sortie de la combustion ; ce qui a pour effet d'élever sa température (voir **Figure IV.2** ci-dessous). Puis l'air est envoyé aux brûleurs et participe à la production de la chaleur. Les gaz de combustion produits dans cette chambre de combustion cèdent une partie de la chaleur aux tubes vaporisateurs, ces gaz sont ensuite véhiculés au niveau des surchauffeurs où ils cèdent encore de la chaleur à la vapeur, enfin au niveau d'un économiseur, ils chauffent l'eau d'alimentation. [1]



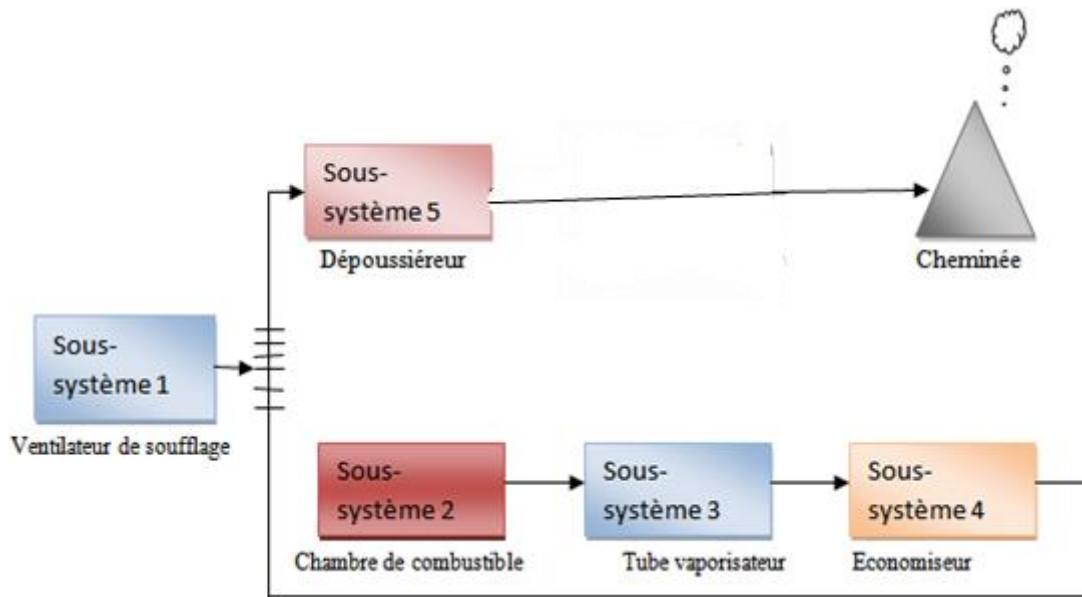


Figure IV2 : Circuit air gaz dans la chaudière. [1]

### IV.3 La combustion dans les chaudières

La réaction de combustion est une réaction chimique exothermique entre un combustible qui est le gaz naturel dans ce cas, un comburant qui s'agit de l'air et une énergie d'activation qui est fournie par le bruleur de la chaudière.

Le gaz à brûler passe dans l'anneau de distribution du gaz du brûleur par un raccord avec une quantité de pression maximale. Le gaz se répand vers les 6 ou 8 lances à gaz réparties uniformément sur la périphérie. Les tuyères à gaz sont vissées sur les lances à gaz qui sont obliquées sous un angle. Sur ce biseau, il y a les trous des tuyères dont les dimensions dépendent de la quantité de gaz qui doit être brûlée et de la pression de gaz qui est à disposition. Le gaz émergent à grande vitesse rencontre l'air de combustion déplacé par l'écran d'allumage en rotation. De cette façon, un mélange facile à allumer est créé. Ce dernier est allumé par un allumeur électrique à gaz. [1]

#### IV.3.1 Caractéristiques du gaz naturel utilisé

Le gaz naturel est, comme le pétrole, une énergie fossile. Il résulte d'un mélange d'hydrocarbures. Il possède des qualités intrinsèques, Elles sont principalement liées à son bon rendement énergétique et à ses avantages environnementaux : sa combustion n'émet pas de poussières, peu de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), peu d'oxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) et moins de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) que d'autres énergies fossiles. De plus, on peut réduire le volume qu'il occupe en le liquéfiant. [2]

## ❖ Composition du gaz naturel

Tableau IV.1 : Composition volumique du gaz naturel. [3]

CONSTITUANT	FORMULE CHIMIQUE	% VOLUMIQUE
METHANE	CH <sub>4</sub>	89.3
ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6.2
PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.6
BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1
AZOTE	N <sub>2</sub>	3.8

## IV.3.2 Quantité d'air nécessaire à la combustion

En combustion, pour déterminer les quantités d'air théoriques, on utilise les pourcentages suivants :

Tableau IV.2 : Composition de l'air. [4]

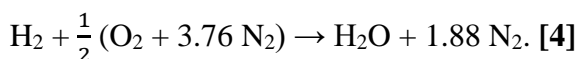
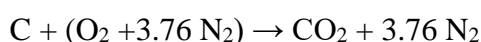
	<i>% En masse</i>	<i>% En volume</i>
<i>O<sub>2</sub></i>	24	21
<i>N<sub>2</sub></i>	76	79

Nous savons que la combustion d'un hydrocarbure (combustible) s'obtient en le faisant réagir avec de l'oxygène (comburant). Par commodité et économie, plutôt que d'employer de l'oxygène pur, on utilise l'air qui en contient près de 21%. L'azote contenu dans l'air ne participe pas à la combustion (sauf la formation de quelques ppm d'oxydes d'azote : les "NO<sub>x</sub>"). [4]

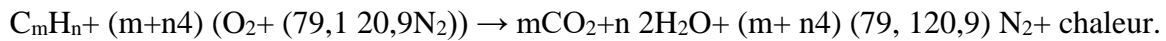
Carbone + oxygène → gaz carbonique

Hydrogène + oxygène → eau

Que l'on écrit chimiquement :



### ❖ Réaction de combustion stœchiométrique du gaz naturel

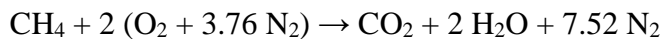


Cependant, cette réaction ne représente qu'un bilan global de la combustion. Des espèces intermédiaires de réaction sont formées à partir du combustible initial et contribuent à la production de ces produits (CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O) ainsi qu'à celle de composés plus lourds lors d'une combustion incomplète. [3]

Nous commencerons l'étude détaillée de la combustion du gaz naturel par celle de son principal constituant c'est-à-dire : le méthane.

### ❖ Combustion neutre (stœchiométrique) du méthane

Nous avons l'équation bilan de la combustion complète du méthane (CH<sub>4</sub>).



### ❖ Le pouvoir comburivore

Il désigne la quantité d'air strictement nécessaire et suffisante qu'il faut fournir pour assurer la combustion neutre de l'unité de combustible.

Notation :  $V_a$

Unités : [ $m^3(n)$  d'air /  $m^3(n)$  de combustible] [ $m^3(n)$  d'air / kg(n) de combustible]

Relation :  $V_a = V_{O_2} + V_{N_2}$

Pour le méthane :  $V_a = 2 + (2 \times 3.76) = 9.52 m^3(n)$  d'air /  $m^3(n)$  de méthane.

### ❖ Combustion réelle Dans les chaudières

En pratique, c'est l'analyse des fumées sur site qui donnera les renseignements techniques nécessaires à la définition de la combustion réelle, dont le rapport volumique donné par l'industrie est estimé entre 11 à 12.

$$\text{Rapport air/gaz : } R = \frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{gaz}}} = \frac{85680 \text{ m}^3/h}{7010 \text{ m}^3/h} = 12.22 m^3(n) \text{ d'air} / m^3(n) \text{ de gaz.}$$

Donc le coefficient d'excès d'air est de :

$$n = \frac{R}{V_a} = \frac{12.22}{9.52} = 1.28$$

Dans ce cas, l'équation précédente devient :



#### ❖ Intérêt de l'excès d'air

Si la quantité d'oxygène fournie lors de la combustion est inférieure à la quantité stœchiométrique, on se place en défaut d'air et les réactions de combustion seront incomplètes et formeront, des poussières et des suies dues aux imbrûlés, à partir du carbone, ce qui est très nuisible.

Afin de favoriser la combustion complète du combustible, on se place en général en excès d'air. On s'assure ainsi que le maximum de molécules de combustible sont en contact avec l'oxygène. On introduit dans la chambre de combustion jusqu'à 30% d'air en plus de la quantité stœchiométrique. Ainsi un volume d'air  $V_A$  supérieur à la quantité d'air sec  $V_a$  est admis dans la chambre de combustion. On parle alors de combustion oxydante ou de combustion avec excès d'air. [5]

#### IV.3.3 Produits de combustion (fumées)

La composition des fumées dégagée par la combustion est résumée dans le **Tableau IV.3** suivant :

**Tableau IV.3** : Composition de la fumée. [6]

	$N_2$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$
Composition de fumés (%)	71.1	2.01	8.5	18.4

Les caractéristiques des fumées générées par la combustion du gaz naturel sont résumées dans le **Tableau IV.4** suivant :

**Tableau IV.4** : Caractéristique de la fumée.

Débit (Nm <sup>3</sup> /h)	Température d'entrée (°C)	Température de sortie (°C)	Perte de charge (MmCE)	Pression (bar)	Débit récupérée (m <sup>3</sup> )
24000	200	80	35	0.77	210

➤ **Masse molaire moyenne des fumées**

$$M_{\text{moy}} = \frac{\sum M_{ixi}}{\sum x_i} = 27.60 \text{ g/mol.}$$

#### IV.3.4 Quantité de CO<sub>2</sub> générée

➤ **Quantité total produite**

Le débit volumique des fumées dans les conditions standard (1 atm et 0°C).

$$Q_v = 24000 \text{ m}^3/\text{h.}$$

$$n = PV/RT = \frac{101325 \times 24000}{8.31 \times 273.15}$$

$$n = 1072 \text{ kmol/h}$$

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{fumées}} \times X_{\text{CO}_2}$$

$$n_{\text{CO}_2} = 1070 \times 0.085$$

$$n_{\text{CO}_2} = \mathbf{90.9 \text{ kmol/h}}$$

➤ **Le débit massique de CO<sub>2</sub> est donc :**

$$Q_{m\text{CO}_2} = 90.9 * 44$$

$$Q_{m\text{CO}_2} = \mathbf{4001.7 \text{ kg/h}}$$

➤ **Quantité de CO<sub>2</sub> récupérée**

Calcul de la pression partielle du CO<sub>2</sub> :

Les fumées de combustion sont constituées de 8.5% en volume de CO<sub>2</sub>, on a aussi la pression des gaz est égale à 0.77 bar. [6]

D'après la loi de dalton :

$$P_{\text{CO}_2} = P_{\text{tot}} \times \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{tot}}}$$

$$P_{\text{CO}_2} = 0.77 \times \frac{8.5}{100}$$

$$P_{\text{CO}_2} = \mathbf{0.065 \text{ bar}}$$

On a le débit de CO<sub>2</sub> récupéré pour la carbonatation est égale à 210 m<sup>3</sup>/h [6]

$$Q_{mCO_2}(\text{récupérée}) = \frac{P_{CO_2} \times Q_v \times M_{CO_2}}{R \times T}$$

Avec :

$Q_{mCO_2}$  : Débit massique du dioxyde de carbone [kg/h].

$P_{CO_2}$  : Pression partielle du  $CO_2$  dans les fumées [pascal].

$Q_v$  : Débit volumique de la fumée [ $m^3/h$ ].

$M_{CO_2}$  : Masse molaire du  $CO_2$  [g/mol].

$R$  : Constante des gaz parfait [j/mol.k].

$T$  : Température des gaz en kelvin.

Application numérique :

$$Q_{mCO_2}(\text{récupérée}) = \frac{0.065 \times 210 \times 44}{8.314 \times 353} \times 10^2$$

$$Q_{mCO_2}(\text{récupérée}) = \mathbf{20.46 \text{ kg/h}}$$

#### ➤ Quantité de $CO_2$ rejetée dans l'atmosphère

$$Q_{mCO_2}(\text{rejetée}) = Q_{mCO_2}(\text{totale}) - Q_{mCO_2}(\text{récupérée})$$

Application numérique :

$$Q_{mCO_2}(\text{rejetée}) = 4001.7 - 20.46 = \mathbf{3981 \text{ kg de } CO_2 \text{ par heure.}}$$

#### ➤ Discussion

On constate que la quantité de  $CO_2$  récupéré est relativement très faible par rapport à la quantité rejeté dans l'atmosphère, vue le pouvoir de réchauffement global élevé de ce gaz et vue les besoins industriels en  $CO_2$ , il serait intéressant de récupérer l'intégralité du  $CO_2$  et de le séparer des autres gaz de combustion pour le commercialiser.

## IV.4 Etude expérimental de l'absorption chimique de $CO_2$ par une solution de MEA

### IV.4.1 Généralité sur l'absorption

Pour une concentration en  $CO_2$  donnée dans le solvant, la thermodynamique associe une pression partielle du  $CO_2$  à l'équilibre via la loi de Henry. [9]

$P_{CO_2} = H_{CO_2} * C_{CO_2}$ . Avec :

$P_{CO_2}$  la pression partielle en  $CO_2$ .

$H_{CO_2}$  la constante de la loi de Henry associée au  $CO_2$ .

$C_{CO_2}$  la concentration de  $CO_2$  dans le solvant.

Il y a absorption du  $CO_2$  tant que la pression partielle en  $CO_2$  à l'interface est supérieure à la pression partielle à l'équilibre. La technique de récupération de  $CO_2$  par absorption chimique repose sur le principe de transfert de masse et utilise deux colonnes : une colonne d'absorption permettant de séparer le  $CO_2$  des autres constituants gazeux à l'aide d'un solvant et une colonne de régénération permettant de récupérer le  $CO_2$  sous forme gazeuse et de régénérer le solvant. Les fumées à traiter sont introduites en pied de colonne d'absorption et le solvant pauvre en tête de colonne. Tout le long de la colonne, les solvants vont réagir avec le  $CO_2$ . Le gaz récupéré en tête de colonne d'absorption est épuré en  $CO_2$ . Le solvant enrichi en  $CO_2$  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 pour inverser la réaction entre le solvant et le  $CO_2$ . 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. 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  $CO_2$  et de vapeur d'eau. [5]

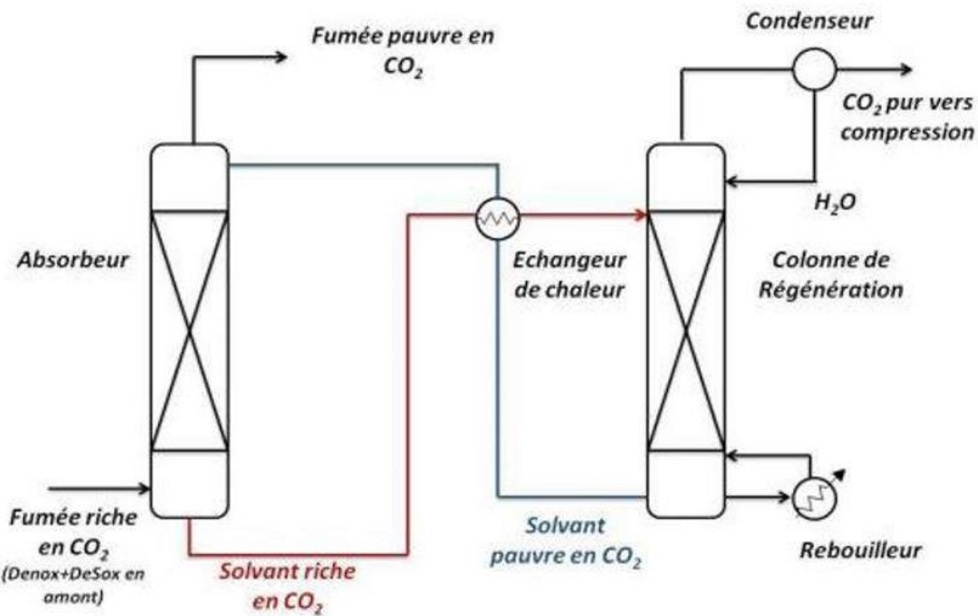


Figure IV.3 : Procédé de captage de CO<sub>2</sub> par absorption chimique. [8]

#### IV.4.2 Le solvant utilisé MEA

Parmi les solvants chimiques, les solutions d'alcanolamines sont les plus couramment utilisées dans les procédés d'absorption des gaz acides. Le gaz réagit chimiquement avec l'absorbant liquide pour former des complexes plus ou moins faiblement liés.

La structure moléculaire des alcanolamines contient au moins un groupement hydroxyle (-OH) et un groupement amine (-NH<sub>2</sub>) ; le groupement hydroxyle augmente la solubilité dans l'eau et diminue la pression de vapeur de la solution aqueuse et le groupement amine fournit l'alcalinité nécessaire en solution aqueuse pour assurer l'absorption des gaz acides H<sub>2</sub>S et de CO<sub>2</sub>.

La Mono Ethanol Amine MEA et la DiGlycolAmine DGA, amines primaires, la DiEthanolAmine DEA, amine secondaire, et la Méthyle Diéthanolamine MDEA, amine tertiaire sont les amines les plus utilisées.

La MEA est l'amine la plus réactive avec un groupe éthanol lié à l'atome d'azote, elle réagit rapidement avec les gaz acides, et permet des séparations de grande qualité en terme de puretés de produits séparés. Cependant sa capacité d'absorption du dioxyde de carbone est relativement faible. Elle réagit irréversiblement avec le sulfure de carbone et le disulfure de carbone, CS et CS<sub>2</sub>, en produits de dégradation. [10]



La MonoEthanolAmine (MEA) constitue le solvant de référence pour le captage de CO<sub>2</sub> des fumées à pression atmosphérique. Cette amine primaire possède une cinétique réactionnelle rapide facilitant l'absorption, mais sa régénération thermique est gourmande en énergie. [7]

#### IV.4.3 Mécanismes réactionnels

Dans ce qui suit nous noterons les amines primaires (MEA) sous la forme R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>NH, où R<sub>1</sub>=H et R<sub>2</sub>=C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OH pour la MEA. Le mécanisme réactionnel d'absorption du CO<sub>2</sub> comprend la formation d'un zwitterion par la réaction (I), R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>NH<sup>+</sup>COO<sup>-</sup>, suivi d'une déportation par une base ou une molécule d'eau pour produire un ion carbamate stable R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>NCOO<sup>-</sup> et une base ou une molécule d'eau pour produire un ion carbamate stable R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>NCOO<sup>-</sup> et une base protonée. La réaction (I) est rapide mais de vitesse finie, la réaction d'échange de proton (II) est considérée comme étant instantanée. Les réactions dans les amines primaires entraînent donc une dégradation par formation de sels stables, les carbamates. [7]



La réaction globale est :



La réaction (IV) permet l'hydrolyse du carbamate et libère du bicarbonate. Cette réaction est lente.



#### IV.4.4 Hypothèses et exposé du problème

Pour le dimensionnement du système, nous faisons les considérations suivantes basées sur des données disponibles dans la bibliographie : [5]

La teneur en masse de la MEA dans la solution aqueuse est W<sub>MEA</sub>=30% avec une injection d'inhibiteurs de corrosion.

Les gaz de combustion sont considérés étant à la pression atmosphérique et seront refroidis jusqu'à 40°C.

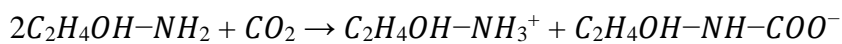
Le taux de charge en  $\text{CO}_2$  de la MEA pauvre est 25% (provient de la colonne de régénération).

Le taux d'absorption requis est de 96%.

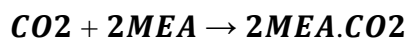
### ➤ Procédé de l'absorption

L'absorption du  $\text{CO}_2$  par la solution aqueuse de monoéthanolamine met en jeu deux phases :

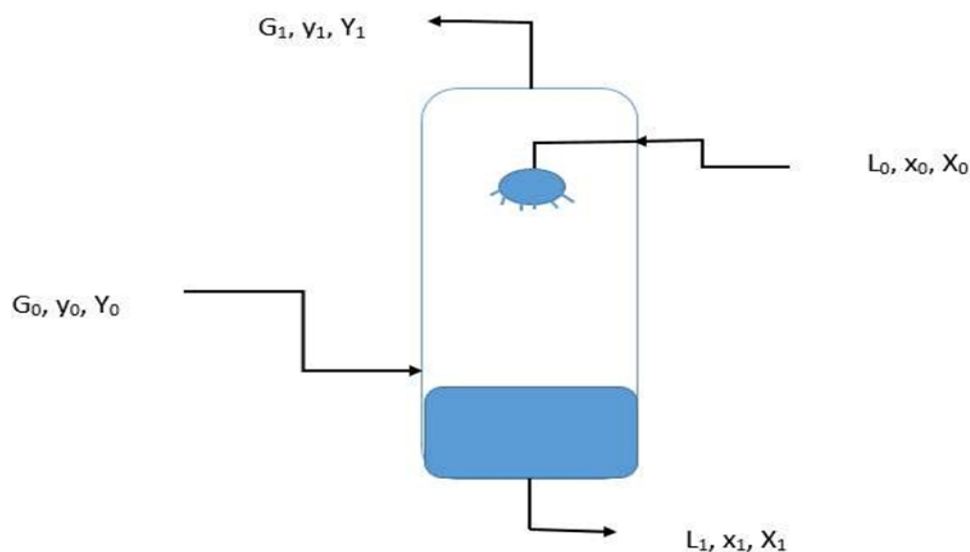
❖ **Une phase liquide :** (MEA + eau) et une phase gazeuse et est traduite par l'équation chimique suivante :



Ou encore :



La figure IV.4 illustre le schéma d'une colonne dans laquelle les deux phases, mélange gazeux et solvant liquide, circulent à contre-courant. [5]



**Figure IV.4 :** Procédé contre-courant de l'absorption. [5]

Le mélange gazeux  $G$  entre en bas de la colonne, abandonne une partie du  $\text{CO}_2$  (Absorbée par le solvant) et sort par l'extrémité supérieure. Introduite au sommet de l'appareil, la phase liquide  $L$  s'enrichit progressivement en  $\text{CO}_2$  et s'évacue en bas de la colonne.

➤ **Calculs et application du bilan molaire sur la colonne**

Pour le dioxyde de carbone, l'équation bilan de toute la colonne d'absorption s'exprime comme suit :

$$L_0 + G_0 = L_1 + G_1$$

$$x_0 L_0 + y_0 G_0 = x_1 L_1 + y_1 G_1$$

$$L' = L_0 (1 - x_0) = L_1 (1 - x_1)$$

$$G' = G_0 (1 - y_0) = G_1 (1 - y_1)$$

➤ **Débit du gaz entrant :**

$$G_0 = 1070 \text{ kmol/h}$$

➤ **le débit de CO<sub>2</sub> entrant :**

$$G_{0\text{CO}_2} = G_0 y_0 = 1070 * 0.085 = 90,95 \text{ kmol/h,}$$

$$\text{Soit encore } 90,95 * 44 * 10^{-3} = 4002 \text{ kg/h}$$

➤ **Le débit de gaz exempt de CO<sub>2</sub> est de :**

$$G' = G_0 (1 - y_0) = 1070 (1 - 0.085) = 979 \text{ kmol/h}$$

Le titre molaire de CO<sub>2</sub> contenu dans phase gazeuse est  $y_0 = 0.085$

Le rapport molaire de CO<sub>2</sub> contenu dans les gaz de combustion entrant dans la colonne est :

$$Y_0 = \frac{y_0}{(1 - y_0)} = 0.0928$$

La solution aqueuse de MEA pauvre vient dans la colonne  $x_0 = 0,25$  et le rapport molaire de CO<sub>2</sub> contenu dans la solution est :

$$X_0 = \frac{x_0}{(1 - x_0)} = 0,333$$

Le taux d'absorption de CO<sub>2</sub> requis est de 96% et :

$$Y_1 = (1 - 0.96) * Y_0 = 0.0037$$

➤ **Débit de gaz exempt de CO<sub>2</sub> : G'**

Le débit de gaz exempt de CO<sub>2</sub> est donc donnée d'après l'équation : [11]

$$G' = 979 * (1 - 0,085) = 895.785 \text{ kmol/h}$$

$$G' = 895.785 \text{ kmol/h}$$

➤ **Débit de solvant exempt de CO<sub>2</sub> : L'**

L'équation de la courbe d'équilibre liquide-vapeur s'écrit : [11]

$$y = m * x$$

En matière de ratio molaire Y, cette équation devient :

$$Y = \frac{m * X}{1 + (1 - m)X}$$

Les données bibliographiques recommandent que m=0,233 pour le CO<sub>2</sub> à 40°C soit :

$$Y = \frac{0,233 * X}{1 + 0,767 * X}$$

Le ratio liquide/gaz minimal  $\left(\frac{L'}{G'}\right)_{min}$  est donné par :

$$\left(\frac{L'}{G'}\right)_{min} = \frac{(Y_0 - Y_1)}{(X_{1min} - X_0)}$$

Pour déterminer X<sub>1min</sub>, on procède de la manière suivante :

- On trace la courbe d'équilibre représentée par l'équation ;
- On localise le point de coordonnées (X<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>) ; ce point représente le haut de la colonne d'absorption ;
- On trace la tangente à la courbe d'équilibre passant par le point de coordonnées (X<sub>0</sub>, Y<sub>1</sub>) ;
- On prolonge la tangente jusqu'à ce que Y=Y<sub>0</sub> ;
- On lit enfin la valeur correspondante à X=X<sub>1min</sub> ;

En procédant ainsi, on lit : X<sub>1min</sub> = 0,55

Par suite :

$$\left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min} = \frac{(0.0928-0.0037)}{(0.55-0.333)} = 0.41$$

Le ratio liquide/gaz de l'opération est calculé par :

$$\frac{L'}{G'} = \left(\frac{L'}{G'}\right)_{\min} * \left(\frac{L'}{L'_{\min}}\right)$$

En considérant que le débit de solution pauvre de MEA sera 1,5 fois le débit minimum requis, on a :

$$\frac{L'}{G'} = 0.41 * 1.5 = 0.61$$

Le débit de liquide exempt de CO<sub>2</sub> est calculé par :

$$L' = \left(\frac{L'}{G'}\right) * G'$$

$$L' = 0,61 * 979 = 597.19 \text{ kmol/h}$$

$$L' = \mathbf{597.19 \text{ kmol/h}}$$

➤ Débit des effluents gazeux sortant de la colonne :

Le débit des effluents gazeux rejetés dans l'atmosphère est donné par :

#### IV.5 Impact environnemental du procédé :

Les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale mettent en avant le rôle du captage du CO<sub>2</sub> dans le mix énergétique.

L'Agence internationale de l'énergie estime, dans le scénario Net Zero Emission by 2050 (NZE) rendu public en 2021, que pour atteindre la neutralité carbone en 2050, 7.6 Gt de CO<sub>2</sub> devront être captés par an à partir de 2050, soit 20 % des émissions actuelles. Un objectif intermédiaire fixe à 1.6 Gt la quantité de dioxyde de carbone qu'il sera nécessaire de capter dès 2030. Cette quantité passe à 4 Gt de CO<sub>2</sub> en 2035, soit un facteur 100 à atteindre en moins de 15 ans.

Le Captage adresse les sources industrielles pour lesquelles les émissions de CO<sub>2</sub> sont concentrées. [12]

Combien de pays d'Afrique, les conséquences d'un temps extrême ou qui n'est pas de saison n'ont pas épargnées l'Algérie.

L'Algérie a été l'un des premiers pays d'Afrique à ratifier toutes les sections des accords internationaux sur la protection de l'environnement (y compris le Protocole de Kyoto et la Convention de Barcelone). Toutefois, leur mise en application et leur surveillance sont inadaptées. [13]

Ainsi en absorbant environ 96 % du dioxyde de carbone contenue dans les fumées soit environ 32 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Le système permet alors de réduire considérablement les gaz à effet de serre, ainsi elle respecte les recommandations tout en préservant l'environnement.

#### **IV.6 Conclusion**

L'absorption chimique est une méthode très utilisée pour le traitement des effluents gazeux, l'application de cette méthode en postcombustion ne nécessite pas des équipements spécifiques qui doivent être conçus dès la conception du site industriel et elle permet de récupérer un taux important de CO<sub>2</sub>.

## ***Conclusion Générale***

---

### **Conclusion générale :**

Dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, les technologies du captage du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont étudiées avec beaucoup d'attention car elles représentent un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Mais il faudra surmonter de multiples problèmes techniques et financiers pour y parvenir.

Le CO<sub>2</sub> représente un gaz d'intérêt industriel et/ou une nouvelle source de carbone pour l'élaboration de composés minéraux ou organiques, d'intérêt commercial.

Utiliser le CO<sub>2</sub> en le valorisant répond ainsi à une logique d'économie circulaire.

Dans la présente étude la récupération est basée sur les émissions gazeuse de la chaufferie de CEVITAL, produisant en moyenne 24000 Nm<sup>3</sup>/h, le CO<sub>2</sub> récupéré est utilisé dans le processus de fabrication du sucre dans la section carbonatation, le type de valorisation du CO<sub>2</sub> est la minéralisation ex-situ. La principale application de la minéralisation ex-situ est la formation de calcaire obtenu par réaction entre le CO<sub>2</sub> et la chaux éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>). Ce dernier permet de transformer la chaux en carbonate insoluble qui piège les impuretés dans le sirop.

Les carbonates produits sont inertes et très stables. Leur formation permet donc le piégeage du CO<sub>2</sub> pendant de longues périodes de temps.

Néanmoins, la quantité de CO<sub>2</sub> récupéré est relativement très faible par rapport à la quantité rejetée dans l'atmosphère, La présente étude qui s'inscrit dans le cadre de la mise en place d'un système de séparation du CO<sub>2</sub> des gaz de combustion des chaudières pour la production du CO<sub>2</sub>, est une recherche d'alternative afin de venir en appoint au CO<sub>2</sub> produit lors de la combustion dans les chaudières.

Le principe de récupération est celui de l'absorption chimique du CO<sub>2</sub> par une solution aqueuse de 30% en masse de monoéthanolamine (MEA). En moyenne, 3845 kg de dioxyde de carbone seront absorbés par heure par la solution aqueuse.

Enfin, des études d'optimisation du système devront également concerner la colonne à garnissage utilisés dans le système.

## ***Références Bibliographiques***

---

### **❖ Chapitre I :**

[1] (en) Compressed Gas Association, Handbook of Compressed Gases, Springer, 1999, 4<sup>e</sup> éd., 702 p. (ISBN 0-412-78230-8, lire en ligne [archive]), p. 234.

[2] « Quelle est l'épaisseur de l'atmosphère ? - Choix d'une couche limite » [archive]

[3] Colin Baird, Michael Cann, Robert Perraud · 2016

[4] France Fredon · 1990

[5] Alain Cornille · 1992

[6] Gilles Pinay, Chantal Gascuel, Alain Ménesguen · 2018

[7] MAZARI T, Cours master 2, chimie de l'environnement : pollution atmosphérique, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[8] Anthony.Ung « Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multi sources » Thèse de doctorat en science de l'environnement d'Ile de France, université Paris 7- Denis Diderot, 2003.

[9] Mohammed MEHDI « expérience marocaine en matière de lutte contre la pollution atmosphérique » Atelier sous régional sur la qualité de l'air en Afrique du Nord Tunis du 23 au 25 novembre 2009.

[10] Didier Paugy, Christian Lévêque · 2018le lac victoria : un écosystème bouleversé par l'homme.

[11] Valérie Fèvre-Nollet · 2004

[12] Pierre Le Cloirec · 1998les composés organiques volatil dans l'environnement.

[13] CAPLAIN Isabelle. 2005. Mesure des émissions polluantes automobile. Application à la modélisation eulérienne 3D de la formation des oxydants photochimiques dans la troposphère : réactions chimique dans l'atmosphère.Doc : science et technologie : Lille.

[14] DIRECTIVE 2008/50/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. - [s.l.] : Conseil Européen, 2008. - pp. 152/1 - 152/44.



## ***Références Bibliographiques***

---

[15] Houdret J.L., Mace T. et Jean P. Réglementation et normalisation [Rapport]. - [s.l.] : LCSQA, 2008.

[16] Sivacoumar R. [et al.] Air pollution modeling for an industrial complex and model performance evaluation [Revue] // Environmental pollution. - 2001. - Vol. 111. - pp. 471-477.

[17] Toupance G. [et al.] Pollution atmosphérique gazeuse ; Mesure des gaz [Revue] // Techniques de l'Ingénieur. - 2004. - P4031.

[18] Skoog D.A. et Leary J.J. Principles of Instrumental Analysis [Ouvrage]. - International Edition : [s.n.], 1992.

[19] Ngo K.A. Etude d'un système multicapteur pour la détection sélective des gaz. (Thèse). - Marseille : Université Cezanne, 2006.

[20] Jean-Noël Salomon · 2003 danger pollution page 27.

### **❖ Chapitre II :**

[1] Prof Joanna Haigh, a brief history of the earths CO<sub>2</sub>, 2017, BBC news <https://www.bbc.com/news/science-environment-41671770>

[2] dioxyde de carbone, définitions et explications, techno-science <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Dioxyde-de-carbone.html>

[3] dioxyde de carbone, lenntech, <https://www.lenntech.fr/dioxyde-carbone.htm>

[4] Quelles sont les sources principales d'émissions de dioxyde de carbone?, votre impact, <https://votreimpact.org/gaz-a-effet-de-serre/sources-de-co2#:~:text=Les%20sources%20naturelles%20incluent%20la,p%C3%A9trole%20et%20le%20gaz%20naturel>

[5] les volcans émettent ils plus de CO<sub>2</sub> que l'homme ?, 2018, futura planète <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/gaz-effet-serre-volcans-emettent-ils-plus-CO2-homme-1382/>

[6] la dégradation de sols dans le monde, 2018, université nice

## ***Références Bibliographiques***

---

<https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degsol/matiere-organique.php#:~:text=Quand%20la%20mati%C3%A8re%20organique%20est,%2C%20et%20de%20l'%C3%A9nergie>

[7] Le rôle clé des terres dans les changements climatiques, unccd, [https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015Nov\\_Land\\_matters\\_For\\_Climate\\_FRE\\_0.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2015Nov_Land_matters_For_Climate_FRE_0.pdf)

[8] Concentrations en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère : statistiques ; 22/03/2022 - [www.notre-planete.info](http://www.notre-planete.info)

[https://www.notre-planete.info/indicateurs/CO<sub>2</sub>-dioxyde-carbone-concentration.php](https://www.notre-planete.info/indicateurs/CO2-dioxyde-carbone-concentration.php)

[9] jean marc jancovici, aout 2007, gaz à effet de serre

<https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/#:~:text=Le%20gaz%20carbonique%20d'origine,additionnel%20d%C3%BB%20%C3%A0%20l'homme>

[10] les différents gaz à effet de serres, ademe,

[https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?prg.htm](https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?prg.htm)

[11] N. Audilbert, juin 2003, limité les émissions de CO<sub>2</sub> pour lutter contre le réchauffement climatique

[12] réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, 2022, EDF FRANCE

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/reduire-les-emissions-de-co2-les-solutions>

[13] Jonas Pigeon. Les technologies de Captage, Transport et Stockage du CO<sub>2</sub> (CTSC) dans l'Axe-Seine : description des futurs possibles d'un dispositif technique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Architecture, aménagement de l'espace. Normandie Université, France, 2016. Français. fftel-01416486f

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01416486/file/These-PIGEONJ.pdf>

## ***Références Bibliographiques***

---

[14] THIBAUT LACOND, Capture et séquestration du carbone : une solution qui peine à se concrétiser

<https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2019/03/new-capture-et-sequestration-du-carbone-une-solution-qui-peine-a-se-concretiser.pdf>

[15] PhilippeJean-Baptiste, RenéDucroux, june 2003, The role of CO<sub>2</sub> capture and sequestration in mitigation of climate change

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071303000865#BIB045>

[16] Hamida Hakima, « émissions et valorisation du CO<sub>2</sub> : cas des rejets générées par les chaudières 400 T/H au niveau du complexe GLI/Z », mémoire de magister

[17] captage stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>, juin 2021, planète énergie

<https://www.planete-energies.com/fr/medias/dossiers/captage-stockage-et-valorisation-du-co2>

[18] L. DUMERGUES, B. FAVIER, R. ALVARO CLAVER, septembre 2014, « les filières de valorisation du CO<sub>2</sub> » état de l'art et avis d'expert cas des activités de traitement et de valorisation des déchets, Record N° 12-0237/1A

[https://record-net.org/storage/etudes/12-0237-1A/rapport/Rapport\\_record12-0237\\_1A.pdf](https://record-net.org/storage/etudes/12-0237-1A/rapport/Rapport_record12-0237_1A.pdf)

[19] mouloudjissarahind, 2020, « étude bibliographique sur la valorisation du CO<sub>2</sub> », mini mémoire de licence, université de Bejaia.

[20] techniques de l'ingénieur envoyé par mrazoug

[21] Deborah Chery, Virginie Lair and Michel Cassir, 2015, Overview on CO<sub>2</sub> Valorization: challenge of molten carbonates, research university, Paris, France

<file:///C:/Users/marjorie/Downloads/fenrg-03-00043.pdf>

[22] Chemical valorization of CO<sub>2</sub>, January 2020, CEFIC

<https://cefic.org/app/uploads/2020/01/Cefic-Position-Paper-on-Chemical-Valorisation-of-CO2.pdf>

[23] Anna Lippert, Islande : cette usine qui élimine le CO<sub>2</sub> dans l'air, en sept questions, les echos

## ***Références Bibliographiques***

---

[https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/islande-cette-usine-qui-elimine-le-CO<sub>2</sub>-dans-lair-en-sept-questions-1347202#:~:text=La%20capture%20de%20dioxyde%20de,permet%20de%20r%C3%A9duire%20leurs%20%C3%A9missions](https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/islande-cette-usine-qui-elimine-le-CO2-dans-lair-en-sept-questions-1347202#:~:text=La%20capture%20de%20dioxyde%20de,permet%20de%20r%C3%A9duire%20leurs%20%C3%A9missions)

[24] David W.Keith, Kenton Heidel, and Robert Cherry, Capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere: Rational and process design considerations

<https://keith.seas.harvard.edu/files/tkg/files/116.cherry.heidel.capco2fromatmosph.p.pdf?m=1528487860>

[25] Captage direct de CO<sub>2</sub> dans l'air : un « élan » nécessaire vers la neutralité carbone ?, avril 2022

[https://www.connaissancedesenergies.org/captage-direct-de-CO<sub>2</sub>-dans-lair-un-elan-necessaire-vers-la-neutralite-carbone-220419#:~:text=Le%20captage%20direct%20de%20CO2%20dans%20l'air%20\(%C2%AB,carbone%2C%20assure%20l'AIE](https://www.connaissancedesenergies.org/captage-direct-de-CO2-dans-lair-un-elan-necessaire-vers-la-neutralite-carbone-220419#:~:text=Le%20captage%20direct%20de%20CO2%20dans%20l'air%20(%C2%AB,carbone%2C%20assure%20l'AIE)

[26] Fabrice Pouliquen, septembre 2021, Capter le CO<sub>2</sub> dans l'air, une piste solide pour atteindre la neutralité carbone ?

[https://www.20minutes.fr/planete/3128491-20210929-climat-capter-CO<sub>2</sub>-air-piste-solide-atteindre-neutralite-carbone.](https://www.20minutes.fr/planete/3128491-20210929-climat-capter-CO2-air-piste-solide-atteindre-neutralite-carbone)

### **❖ Chapitre III :**

[1] DAIKHA NOURDINE et TIFAOUI NABIL.

«Etude et réglage du système de protection du MT de la cogénération Cevital-Béjaia ».

Projet de fin d'études (ingénieur). Université de Béjaia, année 2010.

[2] MN-PEG-03 Exploitation chaufferie « manuel opératoire unité chaufferie LOOS » fichier PDF Cevital.

[3] Documentation technique interne de l'unité « raffinerie du sucre 2000t/j de Cevital.

[4] Usines d'aujourd'hui - Numéros 86 à 89 - Page 125

## ***Références Bibliographiques***

---

### **❖ Chapitre IV :**

[1] Automatisation d'une chaudière loos CEVITAL.

[2] ALEXANDER ROJEY, gaz naturel : de la production aux marchés. Edition TECHNIP 25 rue Ginoux, 75015 PARIS, France.

[3] Henri Fauduet 2011. Mécanique des fluides et des solides appliquée à la chimie. Edition TEC et DOC 11, rue Lavoisier 75008 Paris.

[4] Énergie, pollution de l'air et développement durable De Claude Ronneau, presses universitaires de LOUVAIN.

[5] J. PETTI. «Notion sur la combustion». Université de Lylle, 2005, p 28.

[6] Document interne Cevital.

[7] HARICHA Wafa, Calcul d'une colonne d'absorption à garnissage par la méthode des hauteurs et unités de transfert, mémoire de master, biskra, 2016.

[8] J. Davison, « Performance and costs of power plants with capture and storage of CO<sub>2</sub> », Energy, vol. 32, no 7, p. 1163-1176.

[9] William Henry, « Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 93, 1803, p. 29–274

[10] R. Bottoms, « Process for separating acidic gases », 178390112-févr-1930.

[11] Deborah Adams. «Flue gas treatment for CO<sub>2</sub> capture». IEA Clean Coal Centre, 2010. 61 p. ISBN 978-92-9029-489-4.

[12] Captage et stockage du CO<sub>2</sub> : Enjeux techniques et sociaux en France

De Minh Ha-Duong, Naceur Chaabane Editions Quae c/o Irna, RD 10, 78026 Versailles.

## **Résumé**

Le travail a porté sur l'étude de procédé de production et valorisation de CO<sub>2</sub> au sein de du complexe agroalimentaire CEVITAL.

Le complexe CEVITAL produit du CO<sub>2</sub> à partir des fumées des chaudières pour l'utiliser à la carbonatation dans le processus de fabrication du sucre.

Cette étude révèle d'une grande importance sur le plan environnemental sachant que le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre, sa séquestration réduirait son impact dans l'atmosphère et améliorerait les conditions environnementales sur le site de l'usine

**Mots clés :** Gaz de combustion, récupération CO<sub>2</sub>, monoéthanolamine, carbonatation du sucre, gaz à effet de serre, chaudières.

## **Abstract**

The work focused on the study of the process of production and valorization of CO<sub>2</sub> within the CEVITAL agri-food complex.

The CEVITAL complex produces CO<sub>2</sub> from boiler fumes for use in carbonation in the sugar manufacturing process.

This study reveals a great environmental importance knowing that CO<sub>2</sub> is a greenhouse gas, its sequestration would reduce its impact in the atmosphere and would improve the environmental conditions on the factory site.

**Keywords :** Flue gas, CO<sub>2</sub> recovery, monoethanolamine, sugar carbonation, greenhouse gas, boilers.