

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

---



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et  
Environnement

---

# Amélioration de la station du dioxyde de carbone Fruital Coca-Cola

---

Réalisé par : **DOGHMANE Aya**

Encadré par :

**M.Mohamed Kherat (ENP)**

**M.Kamel BITAM (ECCBC)**

Présenté et soutenu le 11 Juillet 2024, auprès des membres du jury  
composé de :

<b>Président</b>	M. Yacine KERCHICH	Professeur, ENP
<b>Promoteur</b>	M. Kamel BITAM	MGR Utilités, ECCBC
<b>Co-Promoteur</b>	M. Mohamed KHERAT	Doctorant, ENP
<b>Examinatrice</b>	M. Naima DJELLOULI	MCB, ENP

ENP 2024



République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

---



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie des Procédés et  
Environnement

---

# Amélioration de la station du dioxyde de carbone Fruital Coca-Cola

---

Réalisé par : **DOGHMANE Aya**

Encadré par :

**M.Mohamed Kherat (ENP)**

**M.Kamel BITAM (ECCBC)**

Présenté et soutenu le 11 Juillet 2024, auprès des membres du jury  
composé de :

<b>Président</b>	M. Yacine KERCHICH	Professeur, ENP
<b>Promoteur</b>	M. Kamel BITAM	MGR Utilités, ECCBC
<b>Co-Promoteur</b>	M. Mohamed KHERAT	Doctorant, ENP
<b>Examinatrice</b>	M. Naima DJELLOULI	MCB, ENP

ENP 2024

---

## Dédicace

“ Ce mémoire est dédié à toutes les personnes qui m’ont soutenue et encouragée tout au long de cette année, dans les moments difficiles comme dans les plus heureux. Votre foi persistant en moi a été une source constante d’inspiration,

À mes parents, piliers de ma vie : Ma mère, pour son amour et sa patience infinie. Mon père, pour ses prières silencieuses mais puissantes, et son soutien discret mais essentiel. À mes frères et ma sœur, que j’espère inspirer et guider en tant qu’aînée. À ma famille élargie : Ma Mima, Maroua et mes tantes Amel et Nadjwa, source de réconfort et d’affection . À mes amies : Ness, Dalel, Boubou, Aya, Nejma, Miyou et Cyrine. Votre amitié est un trésor inestimable. À mon cher comité : Chinwi, Amel, Amine, Jug, Kouici, Dass et Hana, pour votre collaboration précieuse. À "El Habayeb" : Melissa, Imane, Inel, Salah, Louai, Houssam et Yanissou. Votre présence illumine ma vie. À mes camarades de Charity TRIP : Chayeb, Kellou et Nepnep pour votre soutien constant. À mes chers ITs et amis CAPistes, pour votre confiance et vos encouragements.

Votre soutien collectif a été tout ce dont j’avais besoin pour persévérer, aller jusqu’au bout et finalement réussir. Chacun d’entre vous a contribué, à sa manière, à l’aboutissement de ce travail. Je vous exprime ma plus profonde gratitude.

Du fond du cœur, merci.

”

**-Iya-**

---

## Remerciements

En préambule à ce projet, je tiens à remercier **ALLAH** qui m'a donné la patience et le courage tout au long de ces années d'études, et particulièrement durant cette période décisive.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à mon encadrant, **M. Kamel BITAM**, pour sa guidance, sa patience et son encouragement continus tout au long de mon stage. Sa bonne volonté, sa motivation et ses conseils précieux, ainsi que la pertinence de ses remarques, ont été d'une aide inestimable.

Je suis également reconnaissante à **M. Mohamed KHERAT** d'avoir accepté de superviser ce mémoire dans une période critique et de m'avoir offert des conseils si précieux. Votre expertise, votre enthousiasme et votre engagement envers mon projet sont grandement appréciés.

Un merci spécial à **Mme. Kaouther MAREF**, pour son accueil chaleureux, son aide et ses conseils avisés. Les qualités qu'elle m'a transmises et son engagement envers ma réussite ont été une source d'inspiration constante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **M. Yacine BELKACEMI**, chef du département de mécanique, ainsi qu'envers **M. Arezki SMAILLI**, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leur bienveillance ont grandement contribué à surmonter les obstacles qui se sont présentés. Je leur suis particulièrement reconnaissante pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour la patience dont ils ont fait preuve à mon égard.

Mes vifs remerciements vont également aux **membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon projet, en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs remarques.

À mes amis et à toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de cette aventure académique, votre soutien moral et vos discussions enrichissantes ont été d'une valeur inestimable pour moi. En particulier, je tiens à remercier **Mme. Amel BOUHA** et **M. Salah ADJABI**, sans lesquels je n'aurais pas pu aller jusqu'au bout.

Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude envers ma famille pour leur soutien constant et leur encouragement indéfectible tout au long de mes études. Sans l'aide et le soutien de chacun d'entre vous, l'achèvement de ce mémoire n'aurait pas été possible. Je suis reconnaissante pour toutes les opportunités d'apprentissage et de croissance que j'ai eues grâce à vous.

**Encore une fois, merci du fond du cœur pour votre soutien inestimable.**

---

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تحسين محطة تخزين ثاني أكسيد الكربون السائل في شركة فريوتال كوكا كولا ، من خلال استخدام الخزانات الحرارية وتركيب المبخرات الهوائية المحيطة لتحويل ثاني أكسيد الكربون السائل إلى غاز. تقدم هذه المقترحات ربح في التكاليف والطاقة، فضلاً عن الفوائد البيئية للشركة. علاوة على ذلك، تهدف إلى تقليل اعتماد الشركة على مورد ثاني أكسيد الكربون الوحيد، ليند غاز، من خلال تنويع مصادر التوريد وضمان إنتاج ذاتي لثاني أكسيد الكربون عبر تثبيت محطة إنتاج ثاني أكسيد الكربون خاصة بفريوتال كوكا كولا باستخدام تقنية الالتقاط بعد الاحتراق. تظهر دراسة الاقتصادية للمحطة أن الاستثمار سيتم استهلاكه في أقل من عامين، مع ربح سنوي قدره 18,972,160 دينار جزائري. كما تقدم الأطروحة اقتراحًا لثمين الغاز الحيوي الذي تنتجه الشركة، والذي يوفر أيضًا وفورات في التكاليف والطاقة بنسبة 17.42%

---

كلمات مفتاحية : الكربنة، الغاز الحيوي، إنتاج، استثمار، تخزين.

---

---

## Abstract

The objective of this thesis is to optimize the liquid CO<sub>2</sub> storage station of Fruitful Coca-Cola, through the use of cryogenic tanks and the integration of ambient air vaporizers to transform liquid CO<sub>2</sub> into gas. These proposals offer considerable cost and energy savings, as well as ecological benefits for Fruitful Coca-Cola. Furthermore, it aims to reduce the company's dependence on its sole CO<sub>2</sub> supplier, Linde Gas, by diversifying its supply sources and ensuring autonomous CO<sub>2</sub> production through the installation of Fruitful Coca-Cola's own production station using post-combustion capture. The economic feasibility study of the station demonstrates that the investment would be amortized in less than two years, with an annual gain of 18,972,160 DA. The thesis also presents a proposal for the valorization of biogas produced by the company, which also offers cost and energy savings of 17,43%.

---

**Keywords :** Carbonation, Biogas, Production, Investment, Storage.

---

---

## Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'optimiser la station de stockage de CO<sub>2</sub> liquide de Fruitful Coca-Cola, notamment par l'utilisation de réservoirs cryogéniques et l'intégration de vaporisateurs à air ambiant pour transformer le CO<sub>2</sub> liquide en gaz, ces propositions offrent un gain considérable en coûts et en énergie, ainsi que des avantages écologiques pour Fruitful Coca-Cola. De plus, il vise à réduire la dépendance de l'entreprise vis-à-vis de son fournisseur unique de CO<sub>2</sub>, Linde Gas, en diversifiant ses sources d'approvisionnement et en assurant une production autonome de CO<sub>2</sub> grâce à l'installation d'une station de production propre à Fruitful Coca-Cola par la capture en postcombustion. L'étude de faisabilité économique de station démontre que l'investissement serait amorti en moins de deux ans, avec un gain annuel de 18 972 160 DA. Le mémoire présente aussi une proposition de valorisation du biogaz produit par l'entreprise, qui présente également des gains en coûts et en énergie de 17,42%.

---

**Mots clés :** Carbonatation, Biogaz, Production, Investissement, Stockage.

---

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Nomenclature

<b>Introduction Générale</b>	<b>15</b>
<b>1 Contexte général et problématique</b>	<b>17</b>
1.1 Introduction	18
1.2 Aperçu général de l'industrie des boissons gazeuses	18
1.3 Processus de fabrication des boissons gazeuses	18
1.4 Rôle et importance du CO <sub>2</sub> dans l'industrie des boissons gazeuses	19
1.5 Défis liés à l'utilisation du CO <sub>2</sub>	19
1.6 Dioxyde de Carbone dans Fruital Coca-Cola	20
1.7 Station de stockage de dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	21
1.7.1 Réception et Gestion du CO <sub>2</sub> Liquide Provenant du Camion de Linde Gas	21
1.7.2 Techniques de Gazéification du Dioxyde de Carbone Liquide	22
1.7.3 Gestion des Problèmes de Pression	25
1.8 Problématique	25
1.9 Conclusion	26
<b>2 Partie théorique</b>	<b>27</b>
2.1 Introduction :	28
2.2 Partie théorique	28
Les bases théoriques pour l'amélioration de la station du stockage de CO <sub>2</sub> liquide	28
A. Les bases théoriques pour l'amélioration de la station du stockage de CO <sub>2</sub> liquide	28
A.1 Généralités sur le CO <sub>2</sub>	28
A.2 Le stockage du CO <sub>2</sub>	33
A.3 Transfert thermique	37

## Table des matières

---

A.4 Les échangeurs de chaleur : . . . . .	40
A.5 Généralités sur les ailettes . . . . .	45
A.8 Méthodes de calcul . . . . .	54
B. Les bases théoriques nécessaire pour la production du CO <sub>2</sub> . . . . .	55
B.1 Méthodes de production traditionnelles du CO <sub>2</sub> liquide . . . . .	55
B. 2 Technologies de Capture et de Production du CO <sub>2</sub> . . . . .	57
2.3 Conclusion . . . . .	61
<b>3 Partie pratique . . . . .</b>	<b>62</b>
3.1 Introduction . . . . .	63
3.2 Description détaillée de la station du stockage du CO <sub>2</sub> . . . . .	63
3.2.1 Consommation de CO <sub>2</sub> dans les Lignes de Production . . . . .	64
3.2.2 Sécurité et Régulation de la Pression opérationnelle . . . . .	64
3.2.3 Consommation et couts énergétique de chaque méthode de transfor- mation du CO <sub>2</sub> liquide en gaz . . . . .	64
3.3 Méthodologie suivie . . . . .	65
3.3.1 Conditions présentes . . . . .	65
3.3.2 Améliorations proposées . . . . .	65
3.4 Partie pratique . . . . .	68
3.4.1 Vaporisateurs à air ambiant présents sur site : . . . . .	68
3.4.2 Les calculs de dimensionnement des vaporisateurs . . . . .	69
3.5 Résultats et discussion . . . . .	74
3.6 Conclusion . . . . .	78
<b>4 Station de production du CO<sub>2</sub> . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1 Introduction : . . . . .	80
4.2 Analyse des besoins de Fruitall Coca-Cola . . . . .	80
4.3 Station de production du CO <sub>2</sub> . . . . .	81
4.4 Les besoins spécifiques de la station de production du Dioxyde de Carbone	85
4.5 Étude de Faisabilité . . . . .	86
4.5.1 Coûts d'installation et d'exploitation . . . . .	87
4.5.2 Coûts annuels de consommation . . . . .	87
4.5.3 Production annuelle de la station . . . . .	87
4.5.4 Bénéfice annuel et durée d'amortissement . . . . .	88
4.6 La valorisation du biogaz . . . . .	88
4.6.1 Station d'épuration . . . . .	89
4.6.2 Comment valoriser le Biogaz ? . . . . .	89
4.7 Aspect environnemental . . . . .	91
4.7.1 - De la station de production du CO <sub>2</sub> . . . . .	91
4.8 Conclusion : . . . . .	91

## Table des matières

---

Conclusion . . . . .	93
Bibliographie . . . . .	96
Annexes . . . . .	100
A L'entreprise Fruitful Coca-Cola . . . . .	101
B Table thermodynamique . . . . .	109

# Table des figures

1.1	Canalisation entre citerne du Linde Gas et le réservoir de la station du stockage du CO <sub>2</sub> . . . . .	21
1.2	Pompe de remplissage du CO <sub>2</sub> liquide . . . . .	22
2.1	Diagramme de phase du CO <sub>2</sub> . . . . .	31
2.2	Réservoir cryogénique. . . . .	34
2.3	Allure de condensation . . . . .	38
2.4	Allure de vaporisation . . . . .	38
2.5	représentation du phénomène de conduction . . . . .	39
2.6	Représentation du phénomène de convection . . . . .	39
2.7	représentation du phénomène du rayonnement . . . . .	40
2.8	Circulation à co-courant . . . . .	42
2.9	Circulation à contre-courant. . . . .	43
2.10	Circulation à courants croisés. . . . .	43
2.11	Les échangeurs tubulaires à courants croisés . . . . .	44
2.12	Echangeurs à plaques et joints . . . . .	44
2.13	Les différents types d'ailettes . . . . .	45
2.14	Les différents types des échangeurs de chaleur . . . . .	47
2.15	Diagramme température-puissance dans un échange monophasique . . . . .	49
2.16	Diagramme température-puissance dans un échange diphasique . . . . .	51
2.17	La capture du CO <sub>2</sub> en postcombustion . . . . .	58
2.18	La capture du CO <sub>2</sub> par oxycombustion . . . . .	59
2.19	La capture du CO <sub>2</sub> en précombustion . . . . .	60
3.1	Plan de la station de stockage du CO <sub>2</sub> liquide actuel . . . . .	63
3.2	Plan de la station de stockage du CO <sub>2</sub> liquide après l'amélioration . . . . .	67
3.3	Photo réelle des 04 vaporisateurs en série . . . . .	68
3.4	Température moyenne maximale et minimale à Alger [52]. . . . .	75
4.1	Différentes étapes de la génération de CO <sub>2</sub> . . . . .	82
4.2	Débit de biométhane estimé pour le mois de mai 2024 . . . . .	90
A.1	Les usines de Fruital Coca-Cola en Algérie . . . . .	103
A.2	Localisation de l'usine de Fruital Coca-Cola Rouiba sur google map . . . . .	104

## Table des figures

---

A.3	Structure organisationnelle de Fruitall Coca-Cola . . . . .	105
A.4	Processus de traitement des eaux chez Fruitall Coca-Cola . . . . .	107

# Liste des tableaux

1.1	Les avantages et les inconvénients des vaporisateurs à air ambiant [49]. . .	23
1.2	Les avantages et les inconvénients du Carbo Vapeur [51] . . . . .	24
1.3	Les avantages et les inconvénients du réchauffement électrique du CO <sub>2</sub> liquide [50]. . . . .	24
2.1	Tableau des sources de formation et des pressions partielles de CO <sub>2</sub> . . . .	29
2.2	Propriétés physique et chimique du dioxyde de carbone . . . . .	30
2.3	Propriétés physique et chimique du dioxyde de carbone . . . . .	31
2.4	Conductivité thermiques de quelques matériaux . . . . .	42
2.5	Ordre de grandeur du coefficient d'échange global . . . . .	53
3.1	Réservoirs de stockage de la station . . . . .	63
3.2	Consommation de CO <sub>2</sub> chez Fruitful Coca-Cola . . . . .	64
3.3	Consommation et couts énergétique des différentes méthodes de transformation du CO <sub>2</sub> . . . . .	65
3.4	Les nouveaux réservoirs de la station de stockage du CO <sub>2</sub> . . . . .	66
3.5	Les différents paramètres de conceptions des vaporisateurs Cryolor VAP 630.	68
3.6	Paramètres d'entrée et de sortie des fluides chaud et froid des vaporisateurs	69
3.7	res nécessaires pour les calculs de dimensionnement . . . . .	69
3.8	Résultats des calculs . . . . .	75
3.9	Températures moyenne, maximale et minimale estimé pour chaque mois [52].	76
3.10	Nombre de mois de travail des vaporisateurs . . . . .	76
3.11	Couts de consommation énergétique durant 7 mois. . . . .	76
3.12	Couts de consommation énergétique durant 4 mois. . . . .	77
3.13	Gain en couts . . . . .	77
3.14	Comparaison de la consommation énergétique entre 4 et 6 vaporisateurs . .	77
4.1	Spécifications de l'installation . . . . .	86
4.2	Besoins en ingrédients . . . . .	86
4.3	Coûts d'installations et d'exploitation . . . . .	87
4.4	Coûts annuels de consommation . . . . .	87
4.5	Production annuelle de la station de production . . . . .	87
4.6	Calcul de la durée d'Amortissement de l'investissement . . . . .	88

# Liste des abréviations

<b>CETG</b>	<i>Coefficient d'échange thermique global entre les deux fluides</i>
<b>CIP</b>	<i>Clean in place</i>
<b>DMC</b>	<i>Carbonate de di-méthyle</i>
<b>DTLM</b>	<i>La différence de température logarithmique moyenne</i>
<b>ECCBC</b>	<i>Equatorial Coca-Cola Bottling Company)</i>
<b>GRETh</b>	<i>Groupement pour la Recherche sur les Échangeurs Thermiques</i>
<b>HFC</b>	<i>HydroFluoroCarbures</i>
<b>MEA</b>	<i>Monoéthanolamine</i>
<b>NUT</b>	<i>Nombre d'unités de transfert</i>
<b>PED</b>	<i>Directive Equipement sous Pression</i>
<b>PET</b>	<i>Polyéthylène téréphtalate</i>
<b>SBC</b>	<i>Skikda Bottling Company</i>

# Nomenclature

$A$  : Surface ( $\text{m}^2$ )

$C_p$  : Chaleur massique ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )

$D$  : Diamètre (cm)

$\Delta h$  : Variation d'enthalpie (kcal/kg)

$\Delta T_m$  : Différence de température moyenne logarithmique ( $^\circ\text{C}$ )

$e$  : Épaisseur d'ailette

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau

$h$  : Coefficient d'échange par convection ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$h_f$  : Chaleur sensible (kcal/kg)

$h_{fg}$  : Chaleur latente (kcal/kg)

$h_g$  : Chaleur de vaporisation (kcal/kg)

$K$  : Conductivité thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}/^\circ\text{C}$ )

$L$  : Longueur caractéristique (m)

$N$  : Nombre de tubes

$Nu$  : Nombre de Nusselt

$NUT$  : Nombre d'unité de transfert

$P$  : Puissance (W)

$Pr$  : Nombre de Prandtl

$Q$  : Flux de chaleur (W)

## Nomenclature

---

$R$  : Résistance thermique ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )

$Re$  : Nombre de Reynolds

$S$  : Surface ( $\text{m}^2$ )

$T$  : Température ( $^\circ\text{C}$ )

$\dot{m}$  : Débit massique ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$\dot{m}_{\text{air}}$  : Débit d'air ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$\dot{m}_{\text{c}}$  : Débit du combustible ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$\dot{m}_{\text{v}}$  : Débit massique de la vapeur ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$U$  : Coefficient d'échange global ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$V$  : Vitesse du fluide ( $\text{m}/\text{s}$ )

$\eta$  : Efficacité (%)

$\mu$  : Viscosité dynamique ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ )

$\nu$  : Viscosité cinématique ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ )

$\rho$  : Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

# Introduction Générale

## Introduction générale

---

L'industrie des boissons gazeuses en Algérie, dominée par des acteurs majeurs comme Fruital Coca-Cola, connaît une consommation significative de CO<sub>2</sub>, essentiel à la carbonatation. Avec un marché atteignant 3,51 milliards de litres au premier trimestre 2024 et une croissance modérée prévue, le secteur souligne l'importance du CO<sub>2</sub> dans la production. Fruital Coca-Cola, s'étant imposé comme un acteur clé, produit des centaines de millions de bouteilles par an, impactant l'emploi et l'économie locale. L'entreprise accorde une attention particulière au stockage et à la transformation du CO<sub>2</sub>, crucial pour la qualité, le goût et la conservation des boissons, maintenant un contrôle rigoureux des processus de gazéification [1].

Ce mémoire vise à optimiser les différents processus de stockage et de transformation du CO<sub>2</sub> liquide en gaz dans la station de stockage du Dioxyde de carbone de Fruital Coca-Cola. Nous étudierons diverses propositions tels que l'emplacement des réservoirs de stockage et l'ajout de deux vaporisateurs et en discuterons les résultats par la suite. De plus, cette étude nous a amenés à élaborer une toute nouvelle proposition pour l'entreprise afin de répondre à ses différents besoins en dioxyde de carbone cette dernière manifeste comme une solution pour la dépendance du monofournisseur. Le travail est structuré de manière à fournir une vue d'ensemble complète et approfondie de la problématique. Il est divisé en quatre chapitres, chacun abordant des aspects spécifiques du sujet.

Le premier chapitre présente un contexte sur le sujet et introduit la structure d'accueil du projet, et présentant en dernier lieu notre problématique.

Le deuxième chapitre met en lumière tous les fondements théoriques nécessaire pour comprendre les différents processus et aspects de notre projet.

Le troisième chapitre explore en détail les éléments à optimiser et la méthodologie suivie pour les calculs. Il présente ensuite une interprétation des différents résultats obtenus.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude du risque industriel auquel Fruital Coca-Cola est exposé. Il examine également l'étude financière concernant la possibilité d'installer une station de production propre à l'entreprise comme une solution face à ce risque, ainsi que la valorisation du biogaz produit dans sa station d'épuration.

# Chapitre 1

## Contexte général et problématique

### 1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation de l'industrie des boissons gazeuses en général, puis de l'entreprise d'accueil Fruital Coca-Cola, la filiale algérienne de la marque, située à Rouiba, Alger. Il détaille son organisation et ses opérations, en soulignant les processus essentiels à la fabrication des boissons gazeuses.

### 1.2 Aperçu général de l'industrie des boissons gazeuses

L'industrie des boissons gazeuses a connu une évolution remarquable depuis ses débuts au XVIIIe siècle. À l'origine, elles étaient produites artisanalement et considérées comme des produits de luxe. Avec l'avènement de l'industrialisation et des avancées technologiques au XXe siècle, la production de masse a permis une démocratisation de ces boissons.

Aujourd'hui, le marché est dominé par quelques acteurs majeurs, notamment Coca-Cola, PepsiCo et Dr Pepper Snapple Group. Ces entreprises contrôlent une grande partie du marché mondial, avec des portefeuilles de marques diversifiés qui s'étendent bien au-delà des sodas traditionnels [1].

Les tendances actuelles du marché reflètent une évolution des préférences des consommateurs. On observe une demande croissante pour des boissons perçues comme plus saines, telles que les eaux aromatisées gazeuses, les boissons énergisantes naturelles et les sodas à faible teneur en sucre ou sans sucre. Cette tendance pousse l'industrie à innover constamment dans ses formulations et ses processus de production.

### 1.3 Processus de fabrication des boissons gazeuses

La fabrication des boissons gazeuses est un processus complexe qui implique plusieurs étapes cruciales. Tout commence par le traitement de l'eau, qui est la base de toute boisson. Ensuite vient l'étape du mélange des ingrédients. C'est ici que les sirops, les arômes, les acides, les colorants et autres additifs sont combinés selon des formules précises. Cette phase est cruciale car elle détermine le goût, la couleur et la texture de la boisson finale.

La carbonatation est l'étape qui donne aux boissons leur caractère pétillant. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est dissous dans la boisson sous pression. Le niveau de carbonatation varie selon le type de boisson et les préférences régionales.

Enfin, l'embouteillage est réalisé dans des conditions strictes d'hygiène et de contrôle qualité. Les bouteilles ou canettes sont remplies, scellées et étiquetées à grande vitesse sur des lignes de production automatisées.

Le contrôle qualité est omniprésent tout au long du processus. Des tests microbiologiques sont effectués pour garantir l'absence de contaminants. Des analyses chimiques vérifient la composition et la conformité aux normes. Des tests organoleptiques (goût, odeur, apparence) assurent la constance du produit final [2].

### 1.4 Rôle et importance du CO<sub>2</sub> dans l'industrie des boissons gazeuses

Le CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) est essentiel dans la carbonatation des boissons pour plusieurs raisons :

- a. **Création de Bulles et Effervescence** Le CO<sub>2</sub> est dissous sous pression dans les boissons pour créer des bulles. Lorsqu'on ouvre une boisson carbonatée, la pression diminue, libérant le CO<sub>2</sub> sous forme de bulles, ce qui donne l'effervescence caractéristique. Cette effervescence est un élément clé de l'expérience de consommation des boissons gazeuses, ajoutant une sensation de picotement et de fraîcheur.
- b. **Amélioration du Goût** Le CO<sub>2</sub> ajouté aux boissons crée une acidité douce qui peut améliorer et équilibrer le profil de saveur de la boisson. L'acide carbonique formé lorsque le CO<sub>2</sub> se dissout dans l'eau ajoute une légère acidité, ce qui peut rendre les boissons plus rafraîchissantes et agréables à boire.
- c. **Conservation** Le CO<sub>2</sub> agit également comme agent de conservation. Lorsque le CO<sub>2</sub> se dissout dans l'eau, il forme de l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), qui abaisse le pH de la boisson. Un pH plus bas inhibe la croissance de bactéries, levures et moisissures qui pourraient autrement proliférer et altérer la boisson.
- d. **Facteur Sensoriel et Marketing** La dimension sensorielle qui est très appréciée par les consommateurs est utilisé comme un point de vente dans le marketing des produits, en mettant en avant la fraîcheur et l'effervescence des boissons [3].

### 1.5 Défis liés à l'utilisation du CO<sub>2</sub>

L'utilisation du CO<sub>2</sub> dans l'industrie des boissons gazeuses présente plusieurs défis logistiques et environnementaux. Le transport du CO<sub>2</sub> est une opération délicate qui nécessite

des équipements spécialisés. Il est généralement transporté sous forme liquide dans des camions-citernes isothermes ou par pipelines pour les grandes installations.

Le stockage du CO<sub>2</sub> requiert des infrastructures spécifiques. Il est généralement stocké sous forme liquide, soit à basse température (-20°C à -30°C) dans des réservoirs cryogéniques, soit à température ambiante sous haute pression (environ 65 bar). Ces méthodes de stockage nécessitent des équipements coûteux et des mesures de sécurité strictes pour prévenir les fuites [4].

La vaporisation du CO<sub>2</sub> liquide en gaz pour son utilisation dans le processus de carbonatation est une étape critique. Elle nécessite des vaporisateurs spéciaux qui doivent être correctement dimensionnés et entretenus pour assurer un approvisionnement constant en CO<sub>2</sub> gazeux.

Les enjeux environnementaux liés à l'utilisation du CO<sub>2</sub> sont de plus en plus au centre des préoccupations. Bien que le CO<sub>2</sub> utilisé dans les boissons soit souvent un sous-produit d'autres processus industriels, son extraction, son transport et son utilisation contribuent à l'empreinte carbone globale de l'industrie. Les entreprises sont donc poussées à optimiser leur utilisation du CO<sub>2</sub> et à explorer des sources plus durables [3,5].

### 1.6 Dioxyde de Carbone dans Fruitful Coca-Cola

Dans le cadre de l'industrie des boissons gazeuses en Algérie, Fruitful Coca-Cola s'est imposée comme un acteur majeur depuis sa création. L'entreprise a su s'adapter avec succès aux préférences des consommateurs algériens, solidifiant ainsi sa position sur le marché local. Sa production annuelle, s'élevant à plusieurs centaines de millions de bouteilles, témoigne non seulement de sa prééminence dans le secteur, mais aussi de son impact considérable sur l'emploi et le développement économique régional.

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) joue un rôle crucial dans la production des boissons gazeuses, influençant directement la qualité du produit final. Son importance se manifeste à travers son impact sur la texture, le goût et la durée de conservation des boissons. Consciente de cet enjeu, Fruitful Coca-Cola accorde une attention particulière à la gestion du CO<sub>2</sub>, mettant en œuvre des processus rigoureux de stockage et de transformation.

Dans cette optique, il est pertinent d'examiner en détail la station de stockage du dioxyde de carbone de Fruitful Coca-Cola. Cette analyse nous permettra d'obtenir une vue d'ensemble de l'état actuel des opérations au sein de l'entreprise et servira d'introduction à la problématique centrale de ce mémoire. L'étude de cette installation spécifique nous offrira un aperçu concret des défis et des opportunités liés à la gestion du CO<sub>2</sub> dans l'industrie

des boissons gazeuses en Algérie. Elle nous permettra également d'explorer les technologies et les procédures mises en place par Frial Coca-Cola pour assurer une utilisation efficace et sûre du dioxyde de carbone dans ses processus de production.

### 1.7 Station de stockage de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Le CO<sub>2</sub> est stocké sous forme liquide dans quatre citernes cryogénique, provenant du fournisseur Linde Gas, puis transformé en gaz selon trois méthodes distinctes. Ensuite, il est acheminé vers les lignes de production afin d'être injecté dans les boissons.

#### 1.7.1 Réception et Gestion du CO<sub>2</sub> Liquide Provenant du Camion de Linde Gas

##### Préparation du Camion Linde Gas avant Chargement

- Connexions de Canalisations : À l'arrivée du camion à l'entreprise, deux canalisations sont utilisées : l'une pour le CO<sub>2</sub> liquide et l'autre pour le CO<sub>2</sub> gazeux présent dans la citerne.



FIG. 1.1 : Canalisation entre citerne du Linde Gas et le réservoir de la station du stockage du CO<sub>2</sub>

##### Équilibrage de Pression :

- Ouverture de la Vanne du Gaz : La première étape consiste à équilibrer la pression entre le réservoir de la station et la citerne du camion en ouvrant la vanne du gaz.
- Pompe de remplissage : Une fois l'équilibrage de pression réalisé, la pompe du camion est mise en marche pour commencer le remplissage du réservoir de l'entreprise.



FIG. 1.2 : Pompe de remplissage du CO<sub>2</sub> liquide

**Importance de l'Équilibrage de Pression :** L'équilibrage de la pression est essentiel pour garantir un remplissage efficace et sécurisé. Sans cette étape, il y a un risque de dysfonctionnement de la pompe, pouvant entraîner des problèmes de craquage du réservoir lors du transfert du liquide.

### 1.7.2 Techniques de Gazéification du Dioxyde de Carbone Liquide

Chez Fruitful Coca-Cola, il existe trois principales méthodes pour transformer le CO<sub>2</sub> stocké en CO<sub>2</sub> gazeux :

#### a. Vaporisateur à air ambiant

**Description :** En tant qu'échangeur de chaleur, le vaporisateur chauffé à l'air ambiant est utilisé pour chauffer le CO<sub>2</sub> liquide afin de le vaporiser. Il utilise des tubes à ailettes en aluminium pour réaliser le transfert d'énergie thermique entre l'air et le fluide de travail, connectés en série pour augmenter la capacité de vaporisation.

#### Fonctionnement :

- Circulation du CO<sub>2</sub> : Le CO<sub>2</sub> liquide est acheminé à travers des conduites ou des serpentins exposés à l'air extérieur.
- Transfert de chaleur : En circulant à l'intérieur de ces serpentins, l'air ambiant est absorbé par les ailettes, qui transfèrent cette chaleur au CO<sub>2</sub> liquide. Ce

## Chapitre 1. Contexte général et problématique

---

processus réchauffe le CO<sub>2</sub> jusqu'à atteindre sa température de gazéification, transformant ainsi le fluide de son état liquide à gazeux.

TAB. 1.1 : Les avantages et les inconvénients des vaporisateurs à air ambiant [49].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Faible coût d'exploitation (utilise l'air ambiant gratuit);</li><li>• Simplicité de fonctionnement;</li><li>• Peu d'entretien requis;</li><li>• Écologique (pas de consommation d'énergie supplémentaire).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dépendance aux conditions météorologiques;</li><li>• Capacité de vaporisation limitée par la température ambiante;</li><li>• Moins efficace dans les climats froids;</li><li>• Nécessite plus d'espace pour l'installation des serpentins.</li></ul>

### b. Carbo Vapeur

**Description :** Le Carbo Vapeur est un système spécialement conçu pour vaporiser le CO<sub>2</sub> liquide en utilisant de l'eau et de la vapeur chaude comme source de chaleur. Ce système est composé de plusieurs éléments qui travaillent conjointement pour efficacement transformer le CO<sub>2</sub> liquide en gaz.

#### Composants et Processus :

- Bac d'Eau Chaude : Un réservoir contenant une grande quantité d'eau chauffée à haute température, servant de source de chaleur.
- Serpentin : Un tuyau en forme de spirale situé à l'intérieur du bac, à travers lequel le CO<sub>2</sub> liquide est passé. Le serpentin plongé dans l'eau chaude permet un transfert de chaleur efficace, chauffant ainsi le CO<sub>2</sub> liquide jusqu'à sa vaporisation.
- Vaporisation : Le CO<sub>2</sub> liquide, en absorbant la chaleur de l'eau chaude, atteint son point d'ébullition et se transforme en gaz.
- Collecte du CO<sub>2</sub> Gazeux : Le CO<sub>2</sub> gazeux est ensuite collecté à la sortie du serpentin et dirigé vers les lignes de production après filtration.

TAB. 1.2 : Les avantages et les inconvénients du Carbo Vapeur [51]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de vaporisation élevée et constante</li> <li>• Indépendant des conditions météorologiques</li> <li>• Contrôle précis de la température de vaporisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'installation et d'exploitation plus élevé</li> <li>• Consommation d'énergie pour chauffer l'eau</li> <li>• Nécessite un entretien régulier du système</li> <li>• Risque de corrosion des équipements dû à l'eau chaude</li> </ul>

### c. Réchauffement Électrique du CO<sub>2</sub> Liquide

**Description :** Cette méthode implique l'utilisation d'éléments chauffants électriques pour réchauffer directement le CO<sub>2</sub> liquide à travers une conduite ou un serpentin.

**Fonctionnement :**

- Élément Chauffant : Des résistances électriques sont disposées autour ou à l'intérieur du conduit où circule le CO<sub>2</sub> liquide.
- Transfert de Chaleur : La chaleur générée par les résistances électriques est transférée directement au CO<sub>2</sub> liquide, élevant ainsi sa température jusqu'à la gazéification.

TAB. 1.3 : Les avantages et les inconvénients du réchauffement électrique du CO<sub>2</sub> liquide [50].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle très précis de la température</li> <li>• Compact et peu encombrant</li> <li>• Rapide à mettre en marche et à arrêter</li> <li>• Facilement automatisable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consommation électrique importante</li> <li>• Coût d'exploitation élevé</li> <li>• Risque de surchauffe si mal régulé</li> <li>• Durée de vie limitée des résistances électriques</li> </ul>

### - Pourquoi ECCBC utilise les trois méthodes ?

- Flexibilité opérationnelle : Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients. Avoir les trois options permet à Fruital Coca-Cola de s'adapter aux différentes situations (variations de la demande, conditions météorologiques, coûts énergétiques).
- Redondance et fiabilité : En cas de panne d'un système, les autres peuvent prendre le relais, assurant ainsi la continuité de la production.
- Optimisation des coûts : Selon les périodes de l'année et les tarifs énergétiques, l'entreprise peut choisir la méthode la plus économique.
- Adaptation à la demande : Les différentes capacités de vaporisation permettent de s'ajuster aux variations de la demande en CO<sub>2</sub> gazeux.

### 1.7.3 Gestion des Problèmes de Pression

Si la pression du gaz dans les cuves de l'entreprise est plus basse que la normale, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'augmenter :

- Utilisation de Résistances Électriques : Elles permettent de chauffer le gaz, augmentant ainsi sa pression par expansion thermique.
- Équilibrage de Pression inter réservoirs : Cette méthode consiste à équilibrer la pression entre différents réservoirs pour stabiliser la pression globale en ouvrant les vannes inter réservoirs.
- Utilisation du Camion du Fournisseur : En cas de besoin, le camion peut également servir à ajuster la pression dans les cuves par le transfert de CO<sub>2</sub> gazeux qui est généralement entre 20 bar et 22bar.

Ce processus détaillé assure que la réception et le stockage du CO<sub>2</sub> liquide se font de manière sécurisée et efficace. L'équilibrage correct de la pression est vital pour prévenir tout risque de dysfonctionnement CO<sub>2</sub> lors de son transfert et de son stockage.

## 1.8 Problématique

La problématique centrale de ce mémoire s'articule autour de l'optimisation des processus liés au CO<sub>2</sub> chez Fruital Coca-Cola, une filiale d'ECCBC (Equatorial Coca-Cola Bottling Company). Elle se décline en trois axes majeurs :

1. Optimisation de la station de stockage et de la transformation du CO<sub>2</sub> liquide : L'enjeu est d'identifier et de proposer des améliorations concrètes pour le processus actuel de stockage du CO<sub>2</sub> liquide et sa transformation en gaz prêt à l'injection pour garantir une utilisation plus efficace de cette ressource, tout en maintenant, voire en améliorant, la qualité du produit final.

2. Évaluation des bénéfices énergétiques et financières : Une analyse approfondie des améliorations proposées sera menée pour quantifier les bénéfices potentiels. Cette évaluation permettra de mesurer l'impact des optimisations sur l'efficacité globale de l'usine, un aspect crucial dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement durable.

3. Étude de faisabilité d'une unité de production de CO<sub>2</sub> dédiée : Le projet examinera les raisons et les avantages potentiels de l'installation d'une unité de production de CO<sub>2</sub> liquide spécifiquement dédiée à ECCBC. Cette analyse prendra en compte les aspects économiques et environnementaux d'une telle initiative, en évaluant son impact sur l'autonomie de l'entreprise et sa capacité à contrôler la qualité de cet intrant essentiel ainsi que l'étude de la possibilité de valoriser un biogaz produit par la station d'épuration de l'entreprise.

Ces trois axes d'étude sont intimement liés et répondent à une vision globale d'amélioration continue chez Fruital Coca-Cola. En abordant ces axes, ce mémoire vise à fournir à Fruital Coca-Cola des recommandations concrètes et étayées pour améliorer ses processus, réduire ses coûts opérationnels, et renforcer sa position de leader sur le marché algérien des boissons gazeuses, tout en s'inscrivant dans une démarche de développement durable.

### 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord retracé l'histoire de Coca-Cola International et décrit l'émergence de Fruital Coca-Cola en Algérie. Ensuite, nous avons présenté le département des utilités, qui est l'unité responsable de la station de stockage du dioxyde de carbone, sujet central de notre étude.

Le prochain chapitre abordera les notions théoriques nécessaires pour comprendre les processus impliqués, ainsi que les propositions visant à améliorer la performance et l'efficacité de notre station de stockage du CO<sub>2</sub>.

# Chapitre 2

## Partie théorique

### 2.1 Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous examinerons les fondements théoriques essentiels pour comprendre les propriétés et le comportement du dioxyde de carbone, notamment son stockage, sa transformation de la phase liquide à la phase gazeuse et sa production.

### 2.2 Partie théorique

#### A. Les bases théoriques pour l'amélioration de la station du stockage de CO<sub>2</sub> liquide

##### A.1 Généralités sur le CO<sub>2</sub>

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est souvent perçu négativement dans les discours écologistes, médiatiques, et par le grand public, ainsi que par certains décideurs, où il est considéré comme un pollueur majeur. Cette vision est principalement due à son rôle dans le réchauffement climatique en tant que gaz à effet de serre. Cependant, il est crucial de reconnaître que le CO<sub>2</sub> joue aussi un rôle fondamental dans le cycle de la vie sur Terre et qu'il possède plusieurs applications et utilisations industrielles très importantes [6].

###### A.1.1 C'est quoi le CO<sub>2</sub> ?

Appelé également gaz carbonique ou anhydride carbonique, le CO<sub>2</sub> est un gaz naturel, composé d'une molécule de carbone et de deux molécules d'oxygène.

Il est incolore, inodore et indolore et peut être dangereux pour la santé s'il atteint des quantités importantes dans l'air que nous respirons [7].

Sur le plan industriel, il est récupéré pour de nombreuses applications diverses dans les gaz de combustion, comme sous-produit de la préparation de l'hydrogène pour la synthèse de l'ammoniac, dans les fours à chaux et dans d'autres sources [8].

###### - Sources de récupération du dioxyde de carbone :

Le critère le plus important pour l'efficacité économique d'une source de CO<sub>2</sub> est la pression partielle de CO<sub>2</sub>.

Les mélanges de gaz qui conviennent à la récupération économique de CO<sub>2</sub> liquéfié de grande pureté sont considérés comme des sources de dioxyde de carbone dont la pression partielle de CO<sub>2</sub> est de préférence supérieure à 1 bar.

Le Tableau des sources d'information et des pressions partielles de CO<sub>2</sub> présente des exemples de sources de CO<sub>2</sub> classées par pression partielle décroissante de CO<sub>2</sub>. Un

## Chapitre 2. Partie théorique

---

critère pour ne pas sélectionner une source de CO<sub>2</sub> qui présente des composants gazeux supplémentaires dont l'élimination peut être coûteuse [9].

TAB. 2.1 : Tableau des sources de formation et des pressions partielles de CO<sub>2</sub>

Source de formation	LE CO <sub>2</sub> pression partielle
Fraction de CO <sub>2</sub> provenant de l'épuration des gaz acides dans les usines de production d'ammoniac ou d'autres gaz de synthèse ou dans les usines de production d'H <sub>2</sub>	1,0 à 1,2 bar
CO <sub>2</sub> - effluents gazeux contenant du CO provenant d'installations de fermentation, par exemple dans les brasseries	0,9 à 0,95 bar
CO <sub>2</sub> provenant de gisements souterrains (également en mélange avec des hydrocarbures)	1 à 30 bar
Installations de purification du gaz naturel, dites installations d'adoucissement	1,0 à 1,2 bar
Usines d'oxyde d'éthylène	0,8 à 0,95 bar
Installations de neutralisation des acides	environ 1 bar
Fours à chaux et à ciment	0,2 à 0,5 bar
Gaz de combustion	0,09 à 0,11 bar

### A.1.2 Propriétés Physique et chimiques du CO<sub>2</sub>

Dans des conditions normales, le dioxyde de carbone est un gaz inodore et incolore qui présente les propriétés suivantes (dioxyde de carbone gazeux) [4] :

## Chapitre 2. Partie théorique

---

TAB. 2.2 : Propriétés physique et chimique du dioxyde de carbone

Propriété	Valeur
Masse molaire (kg kmol <sup>-1</sup> )	44.011
Densité (kg m <sup>-3</sup> )	1.977
Densité relative par rapport à l'air	1.5291
Constante de gaz spécifique (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.1927
Capacité thermique molaire (25 °C) (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	37.13
Conductivité thermique (25 °C, 1 bar) (W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.64.10 <sup>-4</sup>
Viscosité (gazeuse, 20 °C) (Pa s)	20,3.10 <sup>-6</sup>
Constante diélectrique (0 °C, 1 bar)	1.000989

### -- Diagramme de phase du CO<sub>2</sub> :

Ce diagramme de phase illustre les transitions entre les différents états du dioxyde de carbone en fonction des variations de température et de pression (FIG. 2.1)[9].

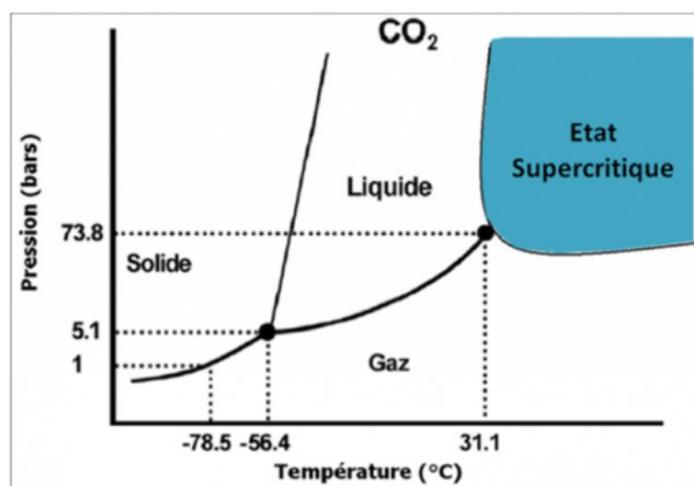


FIG. 2.1 : Diagramme de phase du CO<sub>2</sub>

On peut transformer le CO<sub>2</sub> d'un état à un autre à condition de prendre en compte sa température et sa pression pour le transformer selon le besoin.

Le CO<sub>2</sub> est préférablement stocké en phase liquide dans les industries des boissons gazeuses, en raison de certaines propriétés essentielles et des avantages qu'il présente.

TAB. 2.3 : Propriétés physique et chimique du dioxyde de carbone

Propriété	Valeur
Température critique (k)	304.13
Température critique (k)	73.75
Température au point triple (k)	216.58
Pression au point triple (bar)	5.18
Pression d'ébullition (bar) à :	
- 250 k	17.85
- 280 k	41.61
- 300 k	67.13
Chaleur de vaporisation (point triple) (bar kJ kg <sup>-1</sup> )	347.86
Chaleur de fusion (point triple) (kJ Mol <sup>-1</sup> )	9.02
Densité à -50 °C (kJ mol <sup>-1</sup> kg <sup>-3</sup> )	1152.6
Conductivité thermique (300 K, 1 bar) (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	16.8 10 <sup>-3</sup>
Viscosité (gazeuse, 300 K) (Pa s)	15.0 10 <sup>6</sup>

## Chapitre 2. Partie théorique

---

Pour liquéfier le CO<sub>2</sub> à des températures proches de l'ambient, il est généralement nécessaire de le refroidir sous sa température critique tout en appliquant une pression suffisante.

Ce dernier présente plusieurs avantages dont [10] :

- **Stockage et transport efficaces** : Le CO<sub>2</sub> liquide, plus dense que sa forme gazeuse, permet une économie d'espace et de coûts dans le stockage et le transport.
- **Utilisation industrielle polyvalente** : Utilisé comme réfrigérant et agent de gonflage, il est essentiel dans les systèmes de réfrigération et la fabrication de boissons gazeuses.
- **Sécurité** : Non inflammable, le CO<sub>2</sub> liquide présente moins de risques d'accidents par rapport à d'autres gaz industriels.
- **Applications anti-incendie** : Il est utilisé pour éteindre les incendies sans laisser de résidus, idéal pour les environnements nécessitant de la propreté.
- **Applications anti-incendie** : Il est utilisé pour éteindre les incendies sans laisser de résidus, idéal pour les environnements nécessitant de la propreté.
- **Avantages environnementaux** : Employé dans la capture et le stockage du dioxyde de carbone, il aide à réduire les émissions de gaz à effet de serre et combat le réchauffement climatique.

### A.1.3 Le CO<sub>2</sub> : Entre Applications Industrielles et Enjeux Environnementaux

#### -Applications Industrielles :

- **Industrie agroalimentaire** : Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est principalement utilisé pour la carbonatation des boissons gazeuses. Ce processus implique la dissolution du CO<sub>2</sub> sous pression dans les boissons, créant ainsi les bulles caractéristiques qui donnent leur pétillance aux sodas et autres boissons gazeuses. Le CO<sub>2</sub> contribue aussi à la conservation des boissons en créant un environnement moins propice au développement des micro-organismes, prolongeant ainsi leur durée de conservation sans altérer le goût.
- **Réfrigération** : Utilisé sous forme de glace sèche pour le transport d'énergie et comme fluide de refroidissement dans divers systèmes [11].
- **Industrie chimique** : Sert de matière première pour produire des produits chimiques et des carburants synthétiques, incluant l'éthanol et le carbonate de di-méthyle (DMC).

## Chapitre 2. Partie théorique

---

- Lutte contre les incendies : Employé dans les systèmes d'extinction d'incendie pour ses propriétés non toxiques et non résiduelles.
- Métallurgie : Utilisé pour durcir les moules et protéger les métaux de la corrosion.
- Agriculture : Employé dans les silos pour exterminer les insectes et protéger les grains stockés.
- Industrie pétrolière : injecté dans les puits de pétrole pour améliorer l'extraction en réduisant la viscosité du pétrole [12].

### Enjeux Environnementaux :

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est un composant naturel crucial dans le cycle biogéochimique de la Terre. Ce gaz à effet de serre, présent dans l'atmosphère depuis des siècles, est essentiel à la photosynthèse, permettant la croissance des plantes et la production d'oxygène. Il joue également un rôle dans la régulation thermique de la planète en modulant l'énergie solaire reçue.

Toutefois, l'augmentation des concentrations de  $\text{CO}_2$  dues aux activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles et la déforestation, intensifie l'effet de serre, entraînant un réchauffement climatique avec des conséquences environnementales sévères. Une gestion prudente et scientifique de ce gaz est donc indispensable pour minimiser les impacts écologiques tout en prenant en considération que la nature possède une capacité remarquable à rétablir ses équilibres et que nous devons éviter de surexploiter ses ressources [13].

## A.2 Le stockage du $\text{CO}_2$

Les réservoirs de stockage de dioxyde de carbone sont des systèmes compacts et autonomes, conçus pour le stockage économique du dioxyde de carbone sous forme liquide. Ils offrent également la possibilité de fournir le  $\text{CO}_2$  directement aux applications, sous forme liquide ou gazeuse, selon les besoins [14].

Pour les applications liées au secteur de la carbonatation des boissons, les réservoirs cryogéniques représentent le type de stockage le plus adapté. Fruitful Coca-Cola, par exemple, utilise deux variantes de ces réservoirs : les modèles isothermiques et non isothermiques, chacun répondant à des besoins distincts en termes de régulation thermique et de performance.

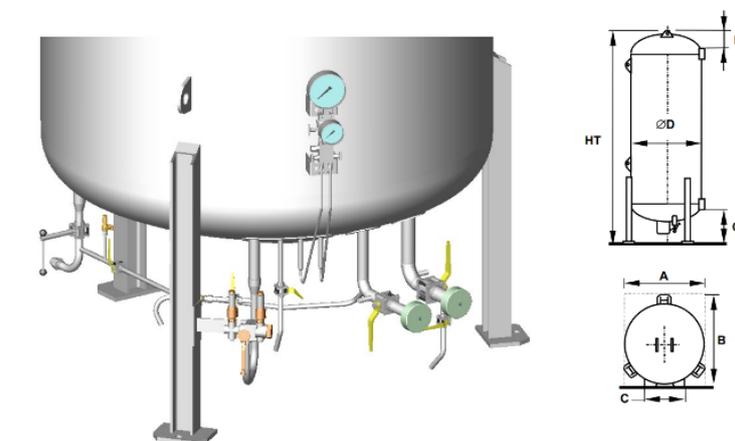
### A.2.1 réservoir cryogénique

#### A.2.1.1 Description

## Chapitre 2. Partie théorique

C'est un réservoir de stockage de gaz liquéfié, à pression et à températures cryogéniques, spécifiquement conçu pour le CO<sub>2</sub>. Il est formé de deux récipients concentriques construits en acier au carbone, avec une grande isolation thermique entre les deux. Cet espace sous vide agit comme un isolant thermique très efficace, minimisant ainsi les transferts de chaleur entre l'intérieur du réservoir et l'environnement extérieur. Disponibles dans des configurations verticales et horizontales [16].

FIG. 2.2 : Réservoir cryogénique.



**Liquide cryogénique :** Un liquide cryogénique est un fluide extrêmement froid, généralement maintenu à des températures inférieures à  $-150^{\circ}\text{C}$  ( $-238^{\circ}\text{F}$ ) [19]. Le CO<sub>2</sub> est un liquide cryogénique typiquement chaud car il devient liquide à des températures inférieures à  $-56,6^{\circ}\text{C}$  à pression atmosphérique normale. Cependant, dans l'industrie des boissons gazeuses, il est souvent maintenu en phase liquide à des températures un peu plus élevées en augmentant la pression [37].

**A.2.1.2 Types des réservoirs cryogéniques** Il existe plusieurs types de réservoirs de stockage cryogéniques, chacun conçu pour un usage et une application spécifiques. Voici quelques exemples :

- Réservoirs Dewar, qui sont des réservoirs non pressurisés utilisés pour le stockage et le transport de liquides cryogéniques ;
- Bouteilles de liquide cryogénique, qui sont des réservoirs sous pression utilisés pour le stockage et le transport de gaz cryogénique ;
- Réservoirs à fond plat, qui sont utilisés pour le stockage de grandes quantités de liquides cryogéniques ;
- Réservoirs sphériques, qui sont utilisés pour le stockage de grandes quantités de gaz cryogéniques.

### A.2.1.3 Conception :

- Pression de travail : 22 bars.
- Température de travail : -50 °C.
- Homologation : conforme à la directive européenne sur les équipements à pression (PED) [17] : 2014/68/U et les normes harmonisées pour la directive EN 13345 [18] et EN 13458 [19].
- Réservoir intérieur fabriqué en acier au carbone spécifique pour basse température.
- Isolation thermique : Le degré d'isolation thermique du réservoir et son efficacité sont les aspects critiques pour minimiser les pertes de produit et permettre un long stockage des gaz liquéfiés à basse température
- Finition extérieure : Surface extérieure décapée par grenailage et protégée par deux couches de peinture : primaire à haut pouvoir anticorrosion et extérieure en polyuréthane couleur blanche réfléchissante [15].

### A.2.1.4 Considérations du site :

**Pour une configuration verticale du réservoir :** Si le réservoir de stockage de dioxyde de carbone doit être installé sur le site de l'utilisateur en position verticale, La stabilité du sol, l'accessibilité pour l'entretien et la proximité du point de distribution du liquide sont les principaux éléments à prendre en compte pour l'implantation du réservoir. Il est souhaitable que :

- Le sol soit ferme afin d'éviter le tassement de l'installation et d'éventuels dommages à la station.
- Le site des fondations doit également être situé de manière à assurer le drainage des eaux à l'écart des fondations.
- Comme le réservoir sera rempli à partir d'un camion du fournisseur, il doit être facilement accessible. En général, un emplacement adjacent à un parking est le plus approprié. Étant donné que de nombreux tuyaux de livraison de liquide mesurent au moins 14 pieds de long, le réservoir ne doit pas être situé à plus de 10 pieds de l'accès le plus proche possible.
- Les socles pour réservoirs cryogéniques doivent être robustes pour supporter le poids du réservoir rempli de liquide et respecter les normes de sécurité, incluant la ventilation et la prévention des fuites [15].

## Chapitre 2. Partie théorique

---

**A.2.1.5 Caractéristiques :** Les réservoirs de stockage de dioxyde de carbone sont conçus pour offrir une méthode pratique, fiable et économique de stockage et de distribution du CO<sub>2</sub>.

Les caractéristiques importantes de ces conteneurs sont les suivantes :

- Temps de maintien à long terme grâce à un système d'isolation composite multicouche très efficace avec un vide faible.
- Un système optionnel de renforcement de la pression qui peut être utilisé pour maintenir la pression de travail pendant les opérations de retrait élevé
- Un système optionnel de vaporisation de la ligne finale qui peut être utilisé pour vaporiser le liquide et réchauffer le gaz pour les applications d'utilisation du gaz.
- Un serpentin de réfrigération optionnel qui permet d'utiliser un système de réfrigération pour abaisser la pression du réservoir pendant les opérations de faible retrait afin d'éviter la perte de produit lorsqu'il est utilisé dans des applications à fort apport de chaleur industrielle.
- Une ligne de remplissage par le bas et une ligne de retour de vapeur qui permettent de remplir le réservoir à partir d'une unité d'alimentation en liquide par transfert de pompe [15].

### Importance du stockage sécurisé du CO<sub>2</sub> liquide pour l'industrie des boissons gazeuses

#### → Sécurité :

- Prévention des risques liés aux basses températures et hautes pressions ;
- Isolation thermique pour éviter la vaporisation rapide et les surpressions.

#### → Qualité du CO<sub>2</sub> :

- Maintien de la pureté du produit ;
- Prévention des pertes par évaporation ou fuite.

#### → Efficacité économique :

- Réduction des coûts liés aux pertes et aux accidents ;
- Optimisation de l'espace de stockage.

#### → Performance industrielle :

- Assurance d'un approvisionnement constant pour les processus continus ;
- Gestion efficace de la pression pour les différentes applications.

→ **Conformité réglementaire :**

- Respect des normes de sécurité ;
- Contribution à la protection de l'environnement en minimisant les émissions.

### A.3 Transfert thermique

Le transfert thermique est le processus par lequel la chaleur est déplacée d'un corps ou d'un système à un autre en raison de la différence de température entre eux.

Deux corps ayant la même température sont dits en " équilibre thermique ". Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a transfert thermique, ou par chaleur [20].

#### A.3.2 Les différentes applications du transfert thermique

Le transfert thermique joue un rôle crucial dans diverses industries en contribuant à une multitude de procédés et d'applications. Voici un aperçu des différentes utilisations du transfert thermique [21] :

- **Réfrigération** : Ils refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau associé au fonctionnement de compresseur pour la réfrigération des gaz comprimés.
- **Réchauffage** : Leur rôle est de chauffer un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ou un autre fluide chaud. Ces termes sont surtout employés dans le cas du réchauffage d'un produit stocké pour en assurer son pompage.
- **Condensation** : Les condenseurs assurent la condensation totale ou partielle de vapeur par circulation d'eau ou de fluide de procédé suffisamment froid, les aérocondenseurs assurent simultanément la condensation de vapeur et le refroidissement des condensats, le plus souvent par circulation d'eau.

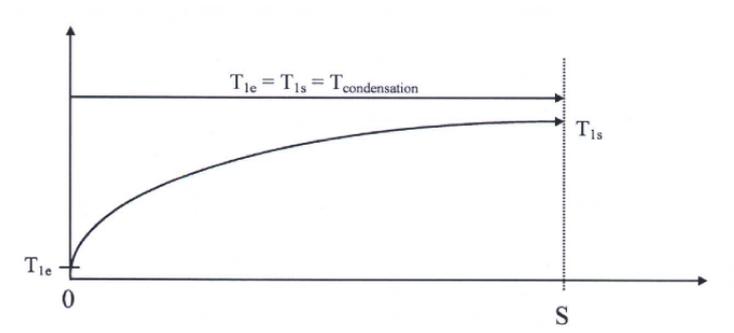


FIG. 2.3 : Allure de condensation

- **Vaporisation** : Les évaporateurs assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquide du procédé, l'apport de chaleur étant assuré par de la vapeur d'eau ou un fluide chaud.

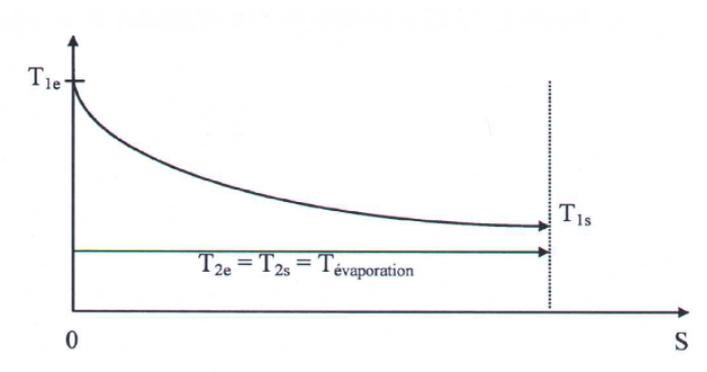


FIG. 2.4 : Allure de vaporisation

### Modes de transfert de chaleur

Les modes de transfert de chaleur sont la manière avec laquelle la chaleur est transportée d'un milieu à un autre. Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

- a. **Conduction** : La conduction est un mode de transfert de chaleur dans un milieu solide ou fluide qui ne bouge pas. L'activité des atomes ou des molécules permet de transférer l'énergie cinétique des vibrations moléculaires du milieu qui a le plus d'énergie vers le milieu qui en a le moins. Ce mode de transfert de chaleur existe dans tous les solides. Il existe parfois dans les gaz qui ne bougent pas.

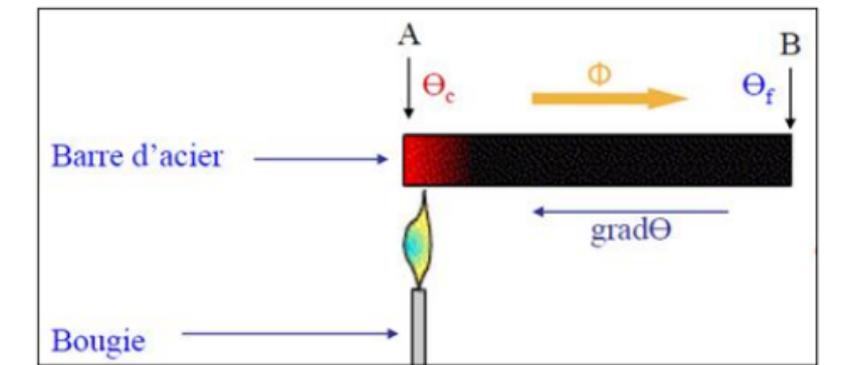


FIG. 2.5 : représentation du phénomène de conduction

b. **Convection** : La convection est un mode de transfert de chaleur dans lequel la chaleur est transportée par le mouvement de fluides, tels que les liquides ou les gaz. On distingue deux types de convection :

- La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air).
- La convection naturelle : lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède .

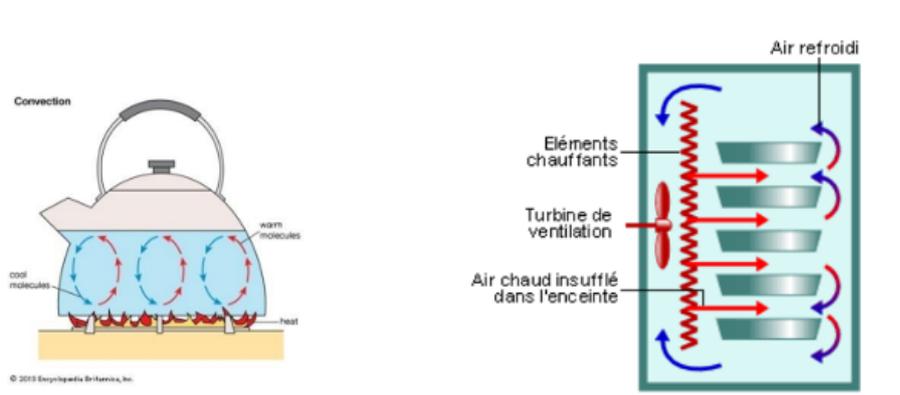


FIG. 2.6 : Représentation du phénomène de convection

c. **Rayonnement** : Le rayonnement est un transfert de chaleur sans support matériel. Il a lieu grâce aux photons. La chaleur est transportée par des ondes électromagnétiques. L'exemple le plus connu est la chaleur du soleil. La chaleur se

## Chapitre 2. Partie théorique

---

propage mieux par rayonnement dans le vide. Le rayonnement dépend de la nature de la surface et de sa matière .

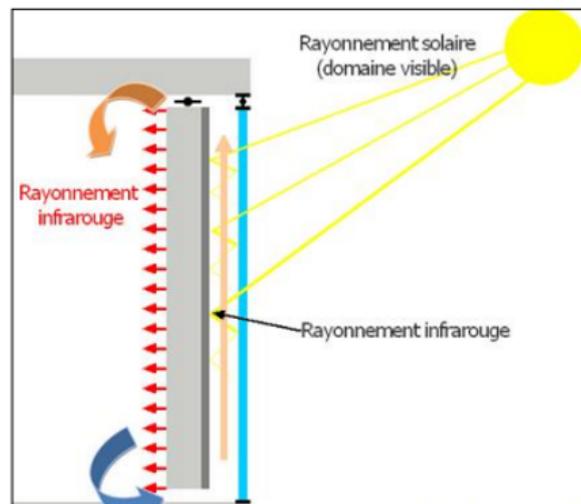


FIG. 2.7 : représentation du phénomène du rayonnement

### A.4 Les échangeurs de chaleur :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans les mettre en contact direct. Le transfert s'effectue à travers une surface d'échange, qui doit être aussi grande que possible pour une efficacité thermique optimale. Les matériaux constituant l'échangeur doivent être hautement conducteurs pour favoriser le transfert de chaleur.

Ils sont utilisés pour réchauffer ou refroidir des fluides lorsqu'un contact direct est impraticable ou inefficace. Dans de nombreux cas, les fluides restent monophasiques, qu'ils soient gazeux ou liquides. Il existe toutefois trois grandes catégories d'échangeurs dans lesquelles surviennent des changements de phase : les vaporiseurs ou évaporateurs où l'on vaporise un liquide, les condenseurs où une vapeur est liquéfiée, et les vapocondenseurs dans lesquels les deux fluides changent de phase [25].

#### A.4.1 Principe de fonctionnement

Pour fonctionner, l'échangeur de chaleur dispose de réseaux parallèles à travers lesquels circulent les fluides à des températures différentes. Ces derniers sont séparés par une paroi aux capacités conductrices optimales. C'est l'écart de température entre les deux fluides qui permet l'échange de chaleur. En effet, le plus chaud va naturellement se diriger

## Chapitre 2. Partie théorique

---

vers le plus froid, le réchauffant immédiatement, tout en perdant des calories. Ainsi, lorsqu'il entre chaud dans l'échangeur thermique, le fluide primaire va réchauffer le fluide secondaire qui est froid. Il sort alors refroidi, tandis que le second fluide est réchauffé [25].

### A.4.2 Marché et application des échangeurs de chaleur

Ils sont utilisés dans une large variété d'applications, celles-ci incluent la production d'énergie :

- Industries alimentaires, de produit chimique ;
- Domaine d'électronique ;
- Technologie environnementale ;
- Rétablissement de chaleur résiduelle ;
- Climatisation, réfrigération.

### A.4.3 Les différents types des échangeurs de chaleur

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux.

#### -Classification selon la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi :

- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc ;
- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires .[31]

TAB. 2.4 : Conductivité thermiques de quelques matériaux

Matériau	$\lambda$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	Matériau	$\lambda$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12 – 0,23
Acier doux	45	Liège	0,044 – 0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038 – 0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035 – 0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036 – 0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030 – 0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

### -Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient [30]

### -Classification suivant le mode de circulation

L'organisation de la circulation des fluides de chaque côté de la paroi constituant la surface d'échange correspond à différents modes de base ou à des combinaisons entre ces modes ; seules les solutions technologiques les plus utilisées sont présentées dans ce qui suit.

- Circulation à co-courant (ou à courants parallèles) : Dans ce cas, les deux fluides circulent dans le même sens, de chaque côté de la paroi ;

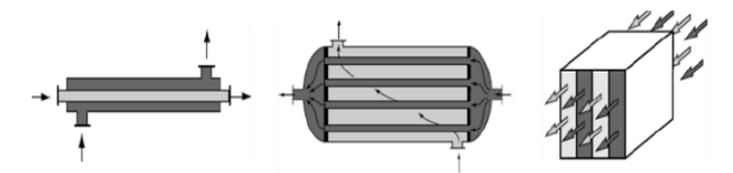


FIG. 2.8 : Circulation à co-courant

- Circulation à contre-courant : Dans ce cas, les deux fluides circulent dans le sens opposé, de chaque côté de la paroi [25].

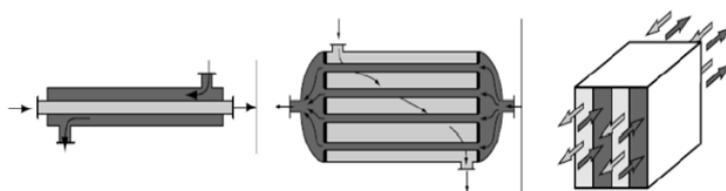


FIG. 2.9 : Circulation à contre-courant.

- Circulation à courants croisés : L'écoulement des deux fluides se fait dans deux directions perpendiculaires .

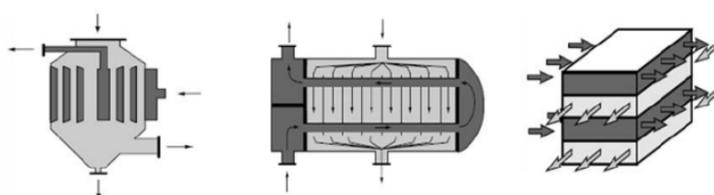


FIG. 2.10 : Circulation à courants croisés.

### Classement technologique

- Echangeurs à contact direct,
- Echangeurs discontinus ou les régénérateurs,
- Echangeurs à surface directe.

Nous ne considérons ici que les échangeurs à fluides séparés, où le transfert de chaleur s'effectue à travers une paroi matérielle, ce qui exclut donc les échangeurs dits « à contact direct ». Dans ces appareils dominent deux grandes familles : les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques.

#### a. Les échangeurs tubulaires :

- Echangeur monotube : Le tube est placé dans ce cas à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin.
- Echangeur coaxial : Les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur ;
- Les échangeurs tubulaires à courants croisés (Liquide-Gaz) Les échangeurs à courants croisés sont utilisés pour des échanges entre gaz circulant en calandre et liquide circulant dans les tubes. L'écoulement autour des tubes est presque perpendiculaire au faisceau de tubes.

Note :

- non brassé : fluide circule dans des canaux parallèles distincts et de faible section
- brassé : fluide ne circule pas dans des canaux parallèles distincts et de faible section.

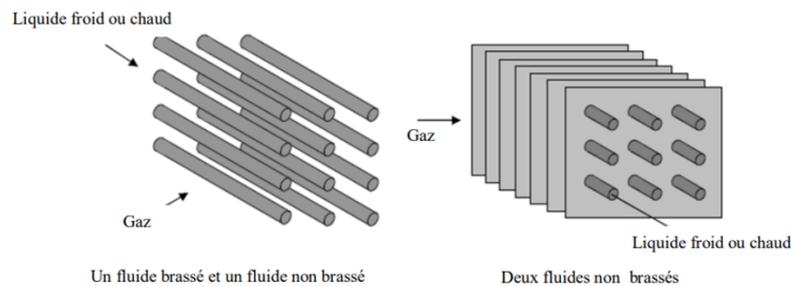


FIG. 2.11 : Les échangeurs tubulaires à courants croisés

- Echangeurs à plaques soudées ou brasées Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire.
- Echangeurs à plaques et joints La surface d'échange est composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile. On trouve dans ce genre d'échangeurs avec circulation des fluides est latérale et avec circulation des fluides est diagonale.

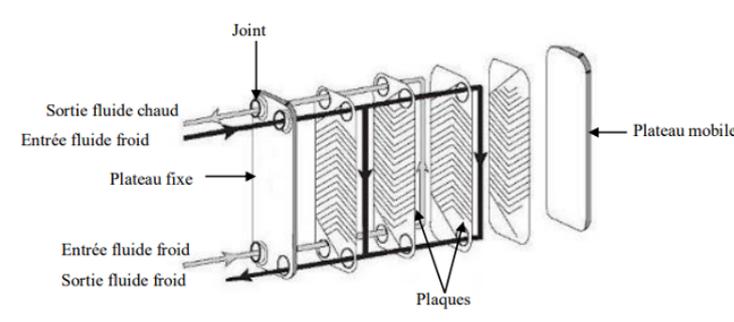


FIG. 2.12 : Echangeurs à plaques et joints

**c. Les échangeurs à ailettes** Les échangeurs à ailettes (ou batterie à ailettes) : ce sont des échangeurs tubulaires utilisés dans les évaporateurs et les condenseurs à air . [32]

Pour augmenter la zone de transfert de chaleur, des appendices connus sous le nom d'ailettes peuvent être intimement connectés à la surface primaire pour fournir une

## Chapitre 2. Partie théorique

surface étendue, secondaire ou indirecte. Ainsi, l'ajout d'ailettes réduit la résistance thermique de ce côté et augmente ainsi le transfert thermique net de/vers la surface pour la même différence de température. Le coefficient de transfert de chaleur peut également être plus élevé pour les ailettes .[33]

### A.5 Généralités sur les ailettes

#### A.5.1 Définition :

L'ailette est un dispositif qui permet de créer des perturbations et de la turbulence au niveau de l'écoulement du fluide entourant l'ailette (elle permet d'augmenter le niveau de la turbulence dans la couche limite) mais surtout la surface d'échange de chaleur, donc le transfert thermique .[34]

Les différents types d'ailettes sont toutefois présentés si contre [29].

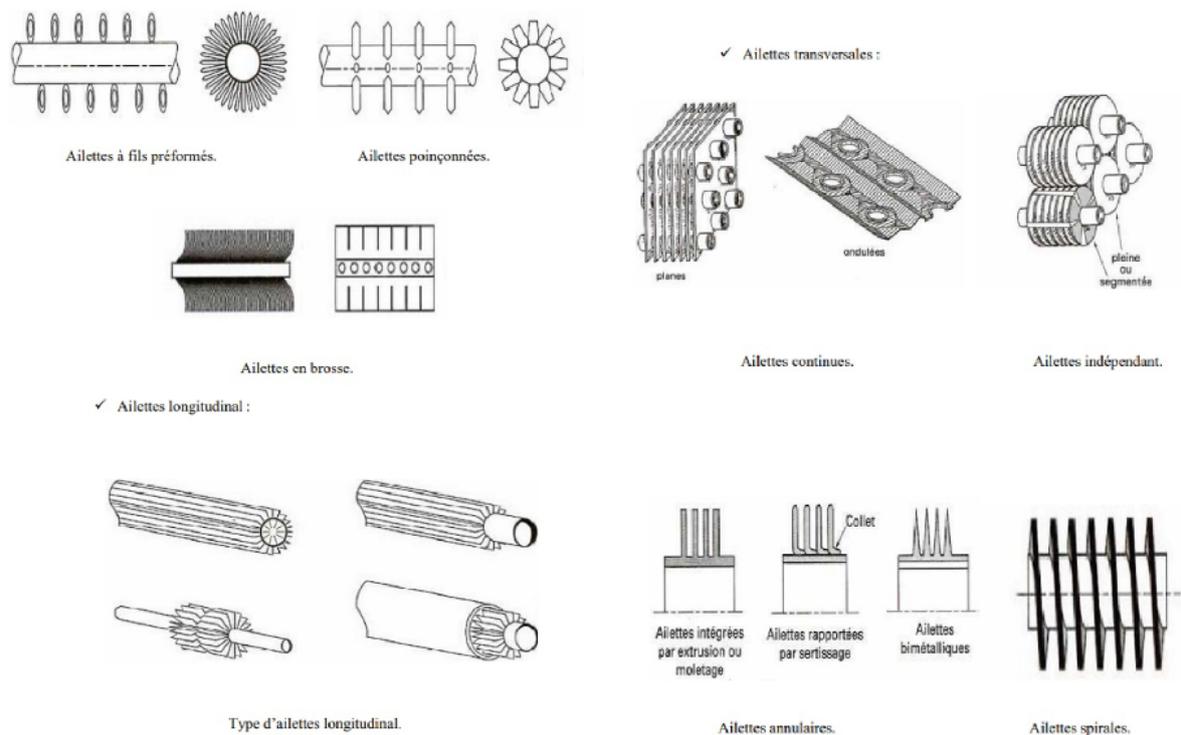


FIG. 2.13 : Les différents types d'ailettes

### A.5.2 Efficacité d'une ailette

Rappelons que les ailettes sont utilisées pour augmenter la quantité de chaleur transmise à partir d'une paroi en augmentant la surface effective. Pour cette raison, l'évaluation de la qualité d'une ailette peut être faite en évaluant l'efficacité des ailettes. L'efficacité d'une ailette est définie comme le rapport entre la quantité de chaleur réelle échangée par les ailettes et la quantité de chaleur échangée par convection (maximum). L'efficacité de l'ailette est donnée comme [35] :

$$\eta = \frac{Q_{\text{réel échangé}}}{Q_{\text{maximum}}} \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{réel échangé}} = KmS (T_s - T_\infty) \frac{\tanh(mL) + G}{1 + G \tanh(mL)} \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{maximum}} = hpL (T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Le schéma ci-dessous regroupe tous les différents types des échangeurs de chaleur :

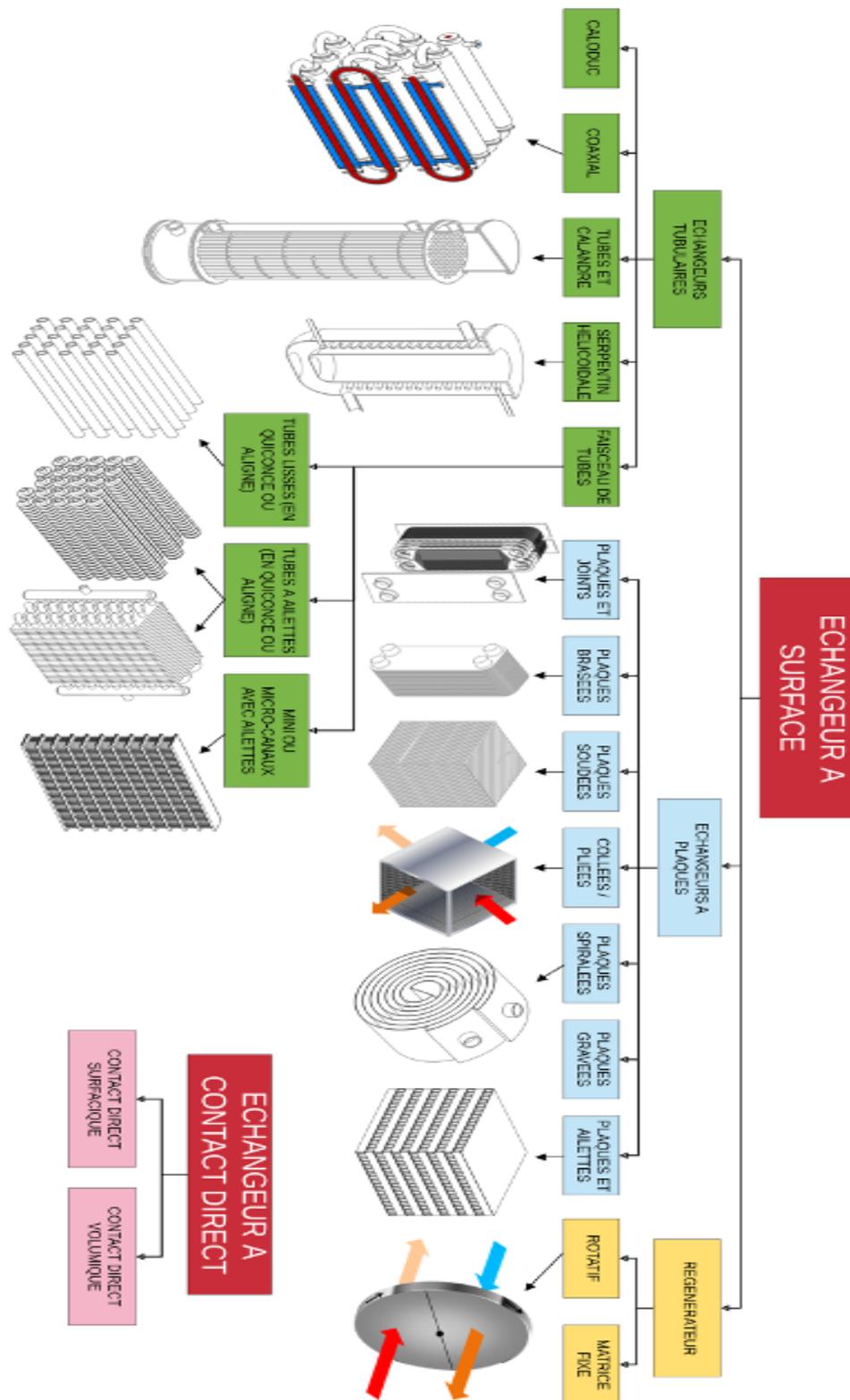


FIG. 2.14 : Les différents types des échangeurs de chaleur

### Calcul de la puissance thermique d'un échangeur : le bilan thermique

L'équation de bilan d'énergie exprime, conformément au premier principe de la thermodynamique, l'égalité des flux de chaleur échangés par chacun des fluides circulant dans l'échangeur thermique, en négligeant les pertes vers l'extérieur.

La puissance échangée entre les deux fluides, dépend essentiellement de l'écart de température que celui-ci subit lorsque l'échange se réalise par chaleur sensible, ou alors essentiellement de la valeur de la chaleur latente (correspondant à l'enthalpie de changement d'état) lorsqu'il y a un changement de phase (fluide diphasique) [26].

#### a. Echange monophasique

Lorsque l'on parle de transfert monophasique, cela signifie que les fluides en présence restent sous une même et unique phase et ne changent pas d'état (il reste uniquement à l'état gazeux ou liquide) : les échanges de chaleur se traduisent ainsi uniquement par une élévation ou une baisse de leur température.

La puissance échangée ( $P$  en Watt) entre deux fluides à l'état monophasique, dépend essentiellement des trois critères suivants :

- Le débit massique des fluides ( $q_m$  en [kg/s]),
- Les propriétés thermo-physiques des fluides (masse volumique ( $\rho$  en [kg/m<sup>3</sup>]) et chaleur spécifique ( $C_p$  en [J/kg-K])),
- L'écart de température que vont subir les fluides ( $\Delta T$  en [K] ou en [°C]).

La chaleur se dirigeant toujours du fluide chaud vers le fluide froid et en faisant l'hypothèse que les échanges vers l'extérieur sont nuls (cas d'un échangeur isolé), on a logiquement :

$$\begin{aligned} T_{\text{entrée chaud}} &> T_{\text{sortie chaud}} \\ T_{\text{entrée froid}} &< T_{\text{sortie froid}} \end{aligned}$$

De ce fait, on peut exprimer la puissance échangée par chacun des fluides avec les expressions suivantes qui impliquent la notion de conservation de l'énergie :

$$P = qm_c C_{p_c} \Delta T_c = -qm_f C_{p_f} \Delta T_f \quad (2.4)$$

Avec :

$$\Delta T_c = T_{e_c} - T_{s_c} \quad (2.5)$$

$$\Delta T_f = T_{e_f} - T_{s_f} \quad (2.6)$$

On notera également que de manière générale, les valeurs des propriétés thermophysiques des fluides sont retenues comme étant des constantes calculées à la valeur moyenne de température et de pression de chacun des fluides.

Grâce à l'écriture de ces bilans thermiques, on peut ainsi facilement retrouver une grandeur (par exemple la température de sortie du fluide froid) si on connaît l'ensemble des autres grandeurs. Une représentation assez courante des échanges thermiques entre deux fluides est le diagramme Température-Enthalpie (ou Température-Puissance). La représentation est celle de la Figure.

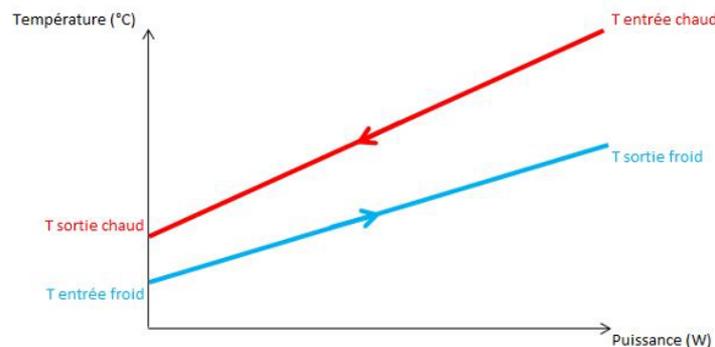


FIG. 2.15 : Diagramme température-puissance dans un échange monophasique

Ici, on illustre une configuration à contre-courant où le fluide chaud (en rouge) entre du côté opposé à celui du fluide froid (en bleu) : on rappelle que, dans cette configuration, le fluide chaud peut être refroidit à un niveau plus bas que la température de sortie du fluide froid tandis que le fluide froid peut, lui aussi, être chauffé à une température plus haute que la température de sortie du fluide chaud.

### b. Échange diphasique

Lorsque l'on parle de transfert diphasique, cela signifie que les fluides en présence vont changer d'état (ou de phase) entre l'entrée et la sortie de l'échangeur.

Les changements de phase les plus fréquemment rencontrés dans le domaine des échangeurs de chaleur sont l'évaporation (Liquide  $\rightarrow$  Gaz) et la condensation (Gaz  $\rightarrow$  Liquide).

La puissance échangée ( $P$  en [W]) entre deux fluides qui vont changer de phase dépend essentiellement des trois critères suivants :

- Le débit massique des fluides ( $q_m$  en [kg/s]),

## Chapitre 2. Partie théorique

---

- La chaleur latente ou enthalpie de changement de phase (liquide/vapeur le plus couramment) qui est une propriété thermo physique des fluides (noté  $L_v$  ou  $h_{lv}$  en  $[J/kg]$ ).
- Le titre massique (noté  $x_v$ ) d'une des phases (en général la phase vapeur pour un mélange liquide/vapeur). Ce titre massique est défini comme le rapport du débit massique de la phase vapeur au débit massique des deux phases (c'est-à-dire le débit massique total de fluide), il est donc compris entre 0 (phase totalement liquide) et 1 (phase totalement vapeur) :

$$x_v = \frac{qm_v}{(qm_v + qm_l)} = \frac{qm_v}{(qm_{\text{total}})} \quad (2.7)$$

Pour une évaporation (ou une condensation) totale, on peut donc dire que l'on passe d'un titre de vapeur de 0 à un titre de vapeur de 1 (ou inversement pour la condensation) donc  $x_v = 1$ . Ainsi, l'expression de la puissance est la suivante :

$$P = qm_c \Delta h_{vl_c} = -qm_f \Delta h_{lv_f} \quad (2.8)$$

Dans le cadre de cette expression, le fluide chaud (indice c) va par exemple se condenser totalement et le fluide froid va s'évaporer totalement. On a ainsi les expressions suivantes pour le calcul de l'enthalpie de changement de phase :

$$\Delta h_{vl_c} = H_{v_c} - H_{l_c} \quad (2.9)$$

$$\Delta h_{lv_f} = H_{l_c} - H_{v_c} \quad (2.10)$$

On notera que la détermination de l'enthalpie de changement de phase est dépendante de la pression ou de la température de saturation du fluide (en sachant que ces deux paramètres sont dépendants l'un de l'autre).

Lorsque la condensation ou l'évaporation est partielle (i.e.  $0 < x_v < 1$ ), on fait alors intervenir la différence du titre massique entre l'entrée et la sortie du fluide : La puissance échangée s'exprime ainsi par :

$$P = qm_c \Delta h_{vl_c} \Delta x_v = -qm_f \Delta h_{lv_f} \Delta x_v \quad (2.11)$$

Pour un changement de phase sur le fluide froid (évaporation) avec un fluide chaud monophasique, on peut par exemple rencontrer l'évolution suivante dans le diagramme Température-Puissance (Figure 2.16) :

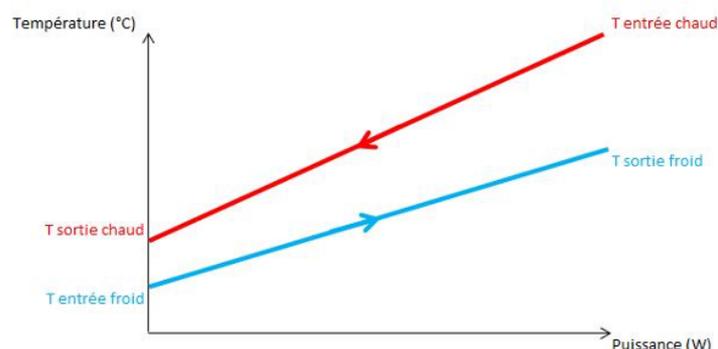


FIG. 2.16 : Diagramme température-puissance dans un échange diphasique

Ici, le fluide froid entre dans l'échangeur à l'état liquide saturé (par exemple eau liquide à 1 bar et 100°C donc  $x_v = 0$ ) et s'évapore jusqu'à saturation vapeur (par exemple vapeur d'eau à 1 bar et 100°C donc  $x_v = 1$ ) par l'apport d'énergie thermique issue du fluide chaud qui par conséquent se refroidit .

### Méthodes de dimensionnement

Mis-à-part l'équation de bilan d'énergie, la résolution des problèmes d'échange thermique nécessite l'écriture d'une seconde équation, de nature tout à fait différente de la première, qui pour rappel est une équation thermodynamique et traduit le principe de conservation de l'énergie.

Cette seconde équation est l'équation de transfert de chaleur qui traduit la relation entre le flux de chaleur échangé et la différence de températures disponibles entre les deux fluides qui circulent dans l'échangeur thermique [27].

Le dimensionnement d'un échangeur consiste à calculer la surface d'échange nécessaire pour obtenir les performances désirées (puissance, température de sortie). Il faudra par la suite déterminer les pertes de charge (pertes de pression) que va engendrer la circulation des fluides (par la friction contre les parois du fait de la viscosité) afin de vérifier la concordance avec le cahier des charges qui impose souvent une limite haute en terme de valeur d'une perte de charge. Cette valeur haute correspondant, la plupart du temps, à une capacité de pompe existante et donc à ne pas dépasser.

Pour connaître la surface d'échange de l'échangeur, il faut dans un premier temps connaître les grandeurs dimensionnant telles que la puissance, les températures, les débits. Ensuite, il faut calculer les coefficients d'échanges thermiques partiels et le coefficient d'échange thermique global, et ce quelle que soit la méthode de dimensionnement utilisée [28].

### Pourquoi un échangeur à chaleur et pas autre méthode ?

#### - Importance de ces méthodes :

- **Qualité du Produit** : La qualité des boissons gazeuses dépend fortement de la précision de la carbonatation, qui ne peut être atteinte qu'avec un contrôle précis du CO<sub>2</sub> gazeux.
- **Efficacité Énergétique** : La transformation efficace du CO<sub>2</sub> de l'état liquide à l'état gazeux peut contribuer à réduire les coûts énergétiques associés à la production, surtout lorsqu'elle est optimisée pour minimiser les pertes de CO<sub>2</sub>.
- **Conformité Réglementaire** : Respecter les normes de sécurité pour le stockage et la manipulation du CO<sub>2</sub> en conformité avec les réglementations locales et internationales est crucial pour l'exploitation légale des installations de production.
- **Durabilité** : L'utilisation efficace du CO<sub>2</sub>, en minimisant les fuites et en optimisant les procédés de transformation, joue un rôle dans les efforts des entreprises pour réduire leur empreinte carbone et promouvoir des pratiques de production plus durables [32].

**Coefficient d'échange global et partiel** Pour expliquer clairement la notion de coefficient d'échange, on considère une paroi métallique au travers de laquelle la chaleur est transférée par conduction, cette paroi étant en contact avec un fluide chaud et sur son autre face avec un fluide froid : cette situation se traduit par un transfert de chaleur entre les deux fluides. On peut exprimer par l'équation qui suit la relation entre le flux de chaleur transféré  $Q$ , l'écart de température  $T$  des deux fluides (le chaud (indice c) et le froid (indice f)) et l'aire  $S$  de la paroi d'échange :

$$Q = US (T_c - T_f) = \frac{T_c - T_f}{R_{\text{global}}} \quad (2.12)$$

Cette équation, plus connue sous le nom de loi de Newton, caractérise le transfert de chaleur entre les deux fluides et introduit ainsi de nouvelles grandeurs :

- Le coefficient  $U$  dont l'unité est en  $[\text{W}/\text{m}^2\text{-K}]$  qui exprime la qualité du transfert de chaleur entre les deux fluides s'écoulant de part et d'autre de la paroi ; ce facteur est désigné comme le coefficient d'échange thermique global entre les deux fluides (CETG) ;

## Chapitre 2. Partie théorique

---

- Le facteur  $R_g$ , inverse du produit  $U.A$ , dont l'unité est en  $[K/W]$  appelé résistance thermique globale (RTG).

Comme mentionné précédemment, une grande part du calcul d'un échangeur repose sur l'évaluation de ce coefficient d'échange global dont la valeur peut être très différente suivant le type de paroi en contact avec les fluides, les fluides et leurs propriétés, l'état du fluide (simple phase gazeuse ou liquide, double phase), les modes de transfert entre les fluides et la paroi (réchauffement ou refroidissement, évaporation, condensation...). Bien que le calcul d'un échangeur nécessite l'évaluation précise du coefficient d'échange global, il est indispensable de connaître les ordres de grandeur des coefficients d'échanges globaux dans diverses conditions, notamment pour juger rapidement de la justesse d'un calcul (Table) [28].

TAB. 2.5 : Ordre de grandeur du coefficient d'échange global

Condition d'échangeur de chaleur	U en $W/m^2-K$
condenseur de vapeur d'eau	1100-1600
réchauffeur d'eau	1100-5600
condenseur de fluide frigorigène de type HFC avec eau comme fluide secondaire	500-1000
échangeur eau-eau	850-1800
batteries à ailettes (tube : eau, ailette : air)	25-70
échangeur eau/huile	110-350
condenseur d'ammoniac avec eau comme fluide secondaire	850-1400
échangeur gaz/gaz	10-40
évaporateur de HFC à tubes et calandre à détente directe	800-1600
Evaporateur noyé de HFC à tubes et calandre	500-1200

On notera que la valeur de ce coefficient est avant tout gouvernée par la résistance thermique convective (c'est-à-dire le transfert entre la paroi et le fluide), la résistance par conduction étant très faible dans la majorité des cas (car les parois sont de faible épaisseur et de conductivité thermique élevée). Ce point souligne alors l'importance d'une bonne évaluation des transferts thermiques par convection.

Le coefficient d'échange global  $U$  se calcul à partir des différentes résistances thermiques de convection (interne et externe), de conduction (paroi solide) :

- a. La résistance de conduction due à la présence d'une paroi solide s'exprime grâce à l'équation de la chaleur, elle est fonction de la géométrie de la paroi (coordonnées plan, cylindrique ou sphérique). Elle dépend aussi de la nature du matériau (conductivité thermique).

Si la conduction est monodirectionnelle comme cela est le cas dans une paroi plane, on utilise l'expression suivante :

$$R_{\text{conduction}} = \frac{e}{\lambda S} \quad (2.13)$$

Si la conduction est réalisée dans une paroi cylindrique, on utilise l'expression qui suit :

$$R_{\text{conduction}} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln\left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}}\right) \quad (2.14)$$

- b. Les résistances thermiques de convection sont en fait l'inverse du coefficient d'échange convectif  $h$  (interne et externe). Chaque coefficient d'échange convectif est calculé à partir de la valeur du nombre adimensionnel de Nusselt qui est évalué par des corrélations empiriques (par expérimentation) données en fonction de la géométrie (diamètre par exemple), des régimes d'écoulement (laminaire, transitoire ou turbulent) et de nombres adimensionnels (Reynolds ( $Re$ ), Prandtl ( $Pr$ )). De manière générale, les expressions du nombre de Nusselt ( $Nu$ ) apparaissent sous la forme suivante :

$$Nu = h \frac{D_h}{\lambda} = A Re^x Pr^y \quad (2.15)$$

Ces corrélations sont spécifiques aux produits de nombreux constructeurs et possèdent des domaines de validité bien précis (géométrie, intervalle de la valeur du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl) qu'il est impératif de respecter pour minimiser les erreurs sur ces données. On trouve ces corrélations dans différents ouvrages notamment au GRETh où une revue exhaustive des méthodes existantes est disponible [36].

### A.8 Méthodes de calcul

Le calcul des échangeurs de chaleur, indépendamment de leur configuration, a longtemps été basé sur les principes utilisés pour les échangeurs à courants parallèles.

Deux principales méthodes de calcul sont couramment employées : la méthode de la différence de température logarithmique moyenne (DTLM) et la méthode du nombre d'unités de transfert (NUT) [29].

#### a. La méthode de différence de température logarithmique moyenne :

L'évolution de la température de chaque fluide à partir des températures d'entrée  $T_{ce}$  et  $T_{fe}$  conditionnent directement la valeur moyenne de  $T$ . Elle est fonction :

- De la nature et des débits respectifs des deux fluides
- Du sens d'écoulement relatif des deux fluides qui peuvent circuler soit à co-courant ou à contre-courant.

L'étude de la différence moyenne de température dans un appareil s'effectuera en supposant que le coefficient global de transfert est constant en tout point, ainsi que les

chaleurs spécifiques des fluides et qu'il n'y a ni pertes thermiques, ni changement de phases au cours du transfert.

### b. Méthode de l'efficacité et du nombre d'unité de transfert (NUT)

On définira l'efficacité  $\epsilon$  d'un échangeur comme le rapport du flux de chaleur réellement échangé dans l'échangeur (d'arrangement géométrique quelconque) au flux de chaleur maximum qu'il est possible d'échanger (c'est-à-dire le flux échangé avec une surface d'échange infinie) pour un échangeur à circulation à contre-courant fonctionnant avec des débits et des températures d'entrée des fluides identiques à ceux du cas considéré.

Le flux de chaleur maximum qu'il est possible d'échanger est déterminé de la façon suivante : la variation de température maximale que peut subir le fluide de plus faible débit de capacité thermique (le débit de capacité thermique noté

et exprimé en  $[W/K]$  est le produit du débit massique ( $qm$ ) par la chaleur spécifique ( $C_p$ ) est égale la différence entre les températures d'entrée des fluides.

Le fluide qui est susceptible de subir cette variation maximale est le fluide qui présente le débit de capacité thermique massique minimale [28]

## B. Les bases théoriques nécessaire pour la production du $CO_2$

Toutes les informations générales sur le dioxyde de carbone sont détaillées dans la partie théorique du deuxième chapitre. Cette section se concentre spécifiquement sur la génération de  $CO_2$  et les processus associés.

### B.1 Méthodes de production traditionnelles du $CO_2$ liquide

**Fermentation** Le  $CO_2$  généré pendant la fermentation est une ressource précieuse qui peut être récupérée, purifiée et réutilisée dans la brasserie, ou vendue à l'industrie agroalimentaire et des boissons. En plus de contribuer à réduire les coûts de production, la récupération du  $CO_2$  issu de la fermentation rend le processus globalement plus écologique, avec des émissions réduites et une empreinte carbone moindre [38].

#### **Processus :**

Le gaz brut généré par les microorganismes lors de la fermentation est capté et purifié pour éliminer les impuretés telles que l'alcool et les aérosols. Il subit ensuite une seconde phase de purification et de séchage, qui permet de séparer le  $CO_2$  des gaz non condensables. La teneur en oxygène est réduite à moins de 5 ppm, produisant ainsi un

## Chapitre 2. Partie théorique

---

CO<sub>2</sub> pur à 99,998 %. Enfin, le CO<sub>2</sub> liquide est stocké pour une utilisation ultérieure dans la brasserie ou vendu à l'industrie agroalimentaire [38].

### Procédés chimiques

Certaines industries produisent du CO<sub>2</sub> comme sous-produit de réactions chimiques.

**Processus :** Par exemple, la réaction de reformage du méthane pour produire de l'hydrogène génère du CO<sub>2</sub>. Ce gaz est ensuite capturé, purifié et liquéfié [45].

### La gazéification

La technique de gazéification présente un bilan carbone équilibré dans la mesure où elle utilise la biomasse. En effet, dans ce cas, le CO<sub>2</sub> rejeté est celui qui a été absorbé par la photosynthèse ayant produit les végétaux gazéifiés.

#### Processus :

Sous l'effet de la chaleur et de l'agent gazeifiant, la biomasse se décompose en gaz de synthèse (syngas). Ce mélange gazeux est composé principalement de monoxyde de carbone (CO), d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), avec de petites quantités de méthane (CH<sub>4</sub>) et d'autres gaz [39].

### - Innovations et nouvelles technologies pour l'utilisation du CO<sub>2</sub>

#### La capture et utilisation du CO<sub>2</sub>

Implique la capture du CO<sub>2</sub> produit par des procédés industriels et sa réutilisation dans diverses applications. Trois familles de procédés de capture sont ainsi envisagées :

- La capture avant la combustion : précombustion ;
- La capture après une combustion classique (à l'air), avec peu ou pas de modification du procédé de combustion : postcombustion ;
- La capture après une combustion à l'oxygène pur : oxygène pur [37].

### Photocatalyse

Imitant la nature, la photosynthèse artificielle utilise la lumière du soleil pour convertir le CO<sub>2</sub> et l'eau en composés générateurs et libérateurs d'énergie. Mais au lieu de produire des sucres, comme c'est le cas pour les plantes vertes, la photosynthèse artificielle permet de produire du monoxyde de carbone (CO), du méthane (CH<sub>4</sub>), du méthanol (CH<sub>3</sub>OH) et de l'hydrogène (H<sub>2</sub>), des combustibles verts d'intérêt [41].

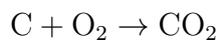
**L'électroréduction du CO<sub>2</sub>** Une technique électrochimique visant la conversion du CO<sub>2</sub> dans le but de diminuer la quantité de CO<sub>2</sub> émise dans l'atmosphère tout en favorisant la formation de produits à haute valeur énergétique tels que les hydrocarbures, les alcools et l'acide formique [40].

### B. 2 Technologies de Capture et de Production du CO<sub>2</sub>

Une combustion est une réaction libérant de l'énergie et faisant intervenir :

- Un réducteur : le combustible (charbon, fioul, gaz, biomasse, etc.) ;
- Un oxydant aussi appelé comburant : généralement l'oxygène contenu dans l'air (l'air est un mélange d'azote N<sub>2</sub> pour 78% d'O<sub>2</sub> pour 21% et d'autres espèces - moins de 1%, notamment du CO<sub>2</sub> ).

Typiquement, le combustible est composé de chaînes carbonées. La réaction de combustion s'écrit alors sous forme simplifiée :



À l'issue de la combustion, le CO<sub>2</sub> est contenu dans les gaz d'échappement mais reste une espèce minoritaire.

#### B.2.1 La capture du CO<sub>2</sub> en postcombustion

Ce procédé consiste à intervenir en aval de l'étape de combustion et à traiter les gaz de combustion pour en extraire le CO<sub>2</sub>. Les gaz de combustion contiennent majoritairement du N<sub>2</sub>, provenant de l'air entrant, mais également du CO<sub>2</sub>, de l'O<sub>2</sub>, de l'eau, des NO<sub>x</sub> et SO<sub>x</sub> (oxydes d'azote et de soufre) et d'autres produits (combustion incomplète, espèces minoritaires de l'air entrant).

Le procédé le plus commun est la capture par un solvant présentant une affinité pour les molécules de CO<sub>2</sub> (c'est-à-dire capable de se lier avec des molécules de CO<sub>2</sub> dans certaines conditions, notamment de pression et de température).

La capture se fait en deux temps :

- **Charge du solvant** : les gaz de combustion sont mis en contact avec le solvant, qui se lie aux molécules de CO<sub>2</sub> ;
- **Régénération** : le solvant est « régénéré » dans un autre compartiment pour libérer les molécules de CO<sub>2</sub> qui s'y étaient fixées.

Le reste du gaz de combustion, appauvri en CO<sub>2</sub>, est libéré dans l'atmosphère. La réussite de la capture repose sur le choix du solvant et des procédés choisis pour la mise en contact. Les solvants aux amines, notamment la MEA (monoéthanolamine), sont les plus utilisés. D'autres solvants sont à l'étude visant à limiter notamment les coûts, l'énergie de régénération (énergie nécessaire pour effectuer le cycle charge-régénération) et les impacts socio-environnementaux.

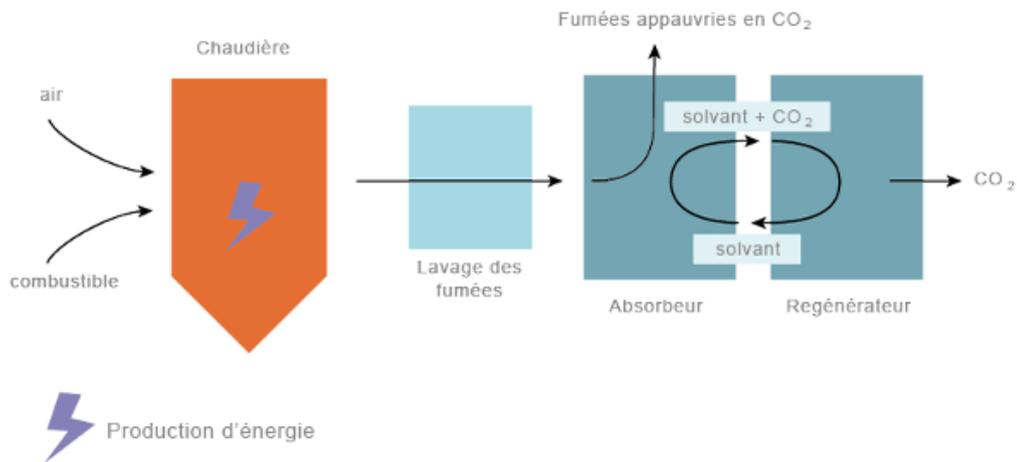


FIG. 2.17 : La capture du CO<sub>2</sub> en postcombustion

D'autres procédés existent, notamment la capture par cryogénie en refroidissant les gaz de combustion jusqu'à  $-120^{\circ}\text{C}$  /  $-80^{\circ}\text{C}$  pour congeler le CO<sub>2</sub>[37].

### B.2.2 La capture du CO<sub>2</sub> par oxycombustion

L'oxycombustion consiste à injecter de l'oxygène pur (et non pas de l'air) au cours de la combustion. Cela évite d'introduire du N<sub>2</sub> dans le foyer de combustion et de le retrouver dans les gaz de combustion. Des étapes de lavage et de déshydratation des fumées sont suffisantes pour isoler le CO<sub>2</sub>. Cette technologie nécessite la production de grandes quantités d'oxygène très pur. L'oxygène est obtenu par séparation de l'oxygène de l'air, par exemple par cryogénie. D'autres procédés sont à l'étude (ex : membranes sélectives) [37].

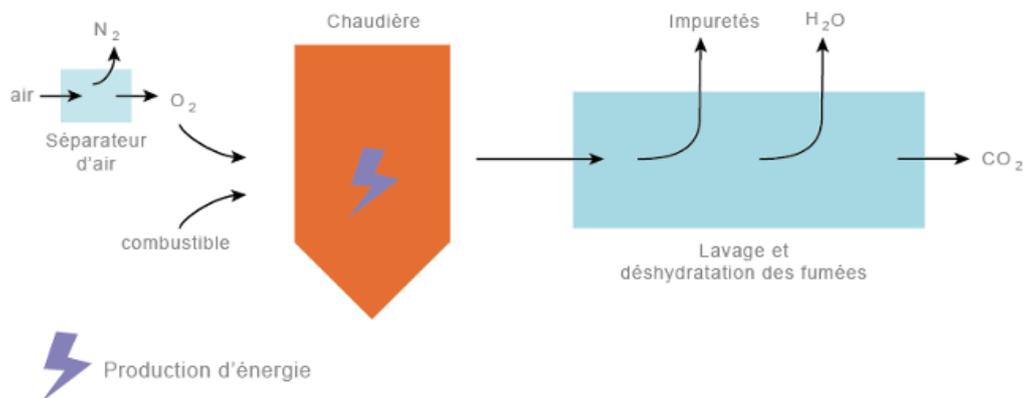


FIG. 2.18 : La capture du CO<sub>2</sub> par oxycombustion

### B.2.3 La capture du CO<sub>2</sub> en précombustion

La technologie de capture en précombustion nécessite de modifier l'ensemble du procédé de combustion. Les principales étapes sont :

- Gazéification du combustible, pour obtenir un mélange de CO + H<sub>2</sub>O ;
- Transformation chimique permettant d'obtenir un mélange CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> ;
- Extraction du CO<sub>2</sub> par solvant (typiquement du méthanol) ;
- Production d'énergie grâce à l'hydrogène (turbines).

Cette technologie ne peut s'appliquer que sur des unités neuves.

Ces différents procédés permettent d'atteindre des taux de capture du CO<sub>2</sub> généralement de l'ordre de 80 à 95%. La capture en oxycombustion, peut même permettre de dépasser 95%, voire 99% de taux de capture [37].

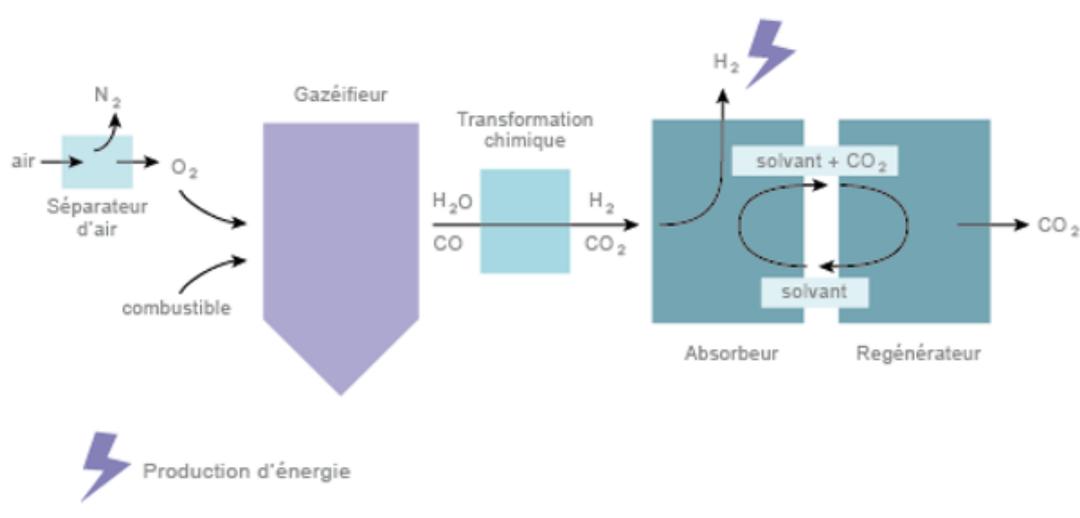


FIG. 2.19 : La capture du CO<sub>2</sub> en précombustion

## B. 3 Le Biogaz

### B.3.1 Qu'est-ce que le biogaz ?

Le biogaz est un gaz issu le plus souvent de la fermentation d'éléments organiques sous l'action de micro-organismes. Ce processus de fermentation, qui se produit spontanément dans les écosystèmes naturels (marais, rizières, sols, intestins de mammifères, etc.), est appelé méthanisation. Il est aujourd'hui maîtrisé par l'homme et permet de valoriser nos déchets tout en remplaçant certaines sources d'énergie fossiles.

À la clé : une réduction de nos émissions de gaz à effet de serre [43].

### B.3.2 Composition typique du biogaz :

Le biogaz produit par méthanisation à partir de déchets agricoles contient principalement :

- 50 à 70% de méthane.
- 20 à 50% de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>),
- Quelques traces d'azote, d'ammoniac et de sulfure d'hydrogène [43].

### B.3.3 Comment produit-t-on du biogaz ?

Le biogaz est obtenu par décomposition de matières organiques grâce à l'action de bactéries agissant en milieu anaérobie, c'est-à-dire privé d'oxygène [44].

La digestion anaérobie est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques en produisant une énergie renouvelable qui est le biogaz.

## Chapitre 2. Partie théorique

---

Les différents substrats les plus utilisés dans le procédé de la méthanisation :

- Déchets d'élevages ;
- Eaux usées ;
- Déchets des industries ;
- Déchets solides urbains [45].

### B.3.4 Les avantages du biogaz

- Le biogaz est une énergie renouvelable qui peut sensiblement diminuer les besoins en énergies fossiles ;
- L'utilisation du biogaz contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- Le biogaz est convertible sous toutes les formes d'énergie utiles (chaleur, électricité, carburant) ;
- Diminution de la charge en carbone des déchets végétaux. Une fois digérés, les déchets sont moins nocifs pour l'environnement, le risque d'une pollution biologique ou organique est en outre largement à moindre et la fermentation diminue le pourcentage de matière sèche, permettant de diminuer le volume à transporter et à épandre [46].

## 2.3 Conclusion

Pour conclure, les notions théoriques et les méthodes de calcul présentées dans ce chapitre constituent les fondements essentiels pour obtenir des résultats dans la partie pratique dans le chapitre 3 ainsi que les bases de la proposition de la station de production du CO<sub>2</sub>.

# Chapitre 3

## Partie pratique

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des propositions d'amélioration de la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide. On présente les calculs nécessaires pour démontrer les gains financiers que ces améliorations pourraient apporter.

### 3.2 Description détaillée de la station du stockage du CO<sub>2</sub>

La station de stockage de CO<sub>2</sub> comprend actuellement quatre réservoirs cryogéniques pour le stockage du CO<sub>2</sub> à une température de -25°C.

Voici un tableau qui présente les différents réservoirs présents dans la station :

TAB. 3.1 : Réservoirs de stockage de la station

Tank	Position	Type	Capacité de stockage (tonnes)
1	Horizontal	Cryogénique non isotherme	60
2	Vertical	Cryogénique non isotherme	30
3	Vertical	Cryogénique isotherme	50
4	Vertical	Cryogénique isotherme	30

Voici un schéma représentatif de la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide :

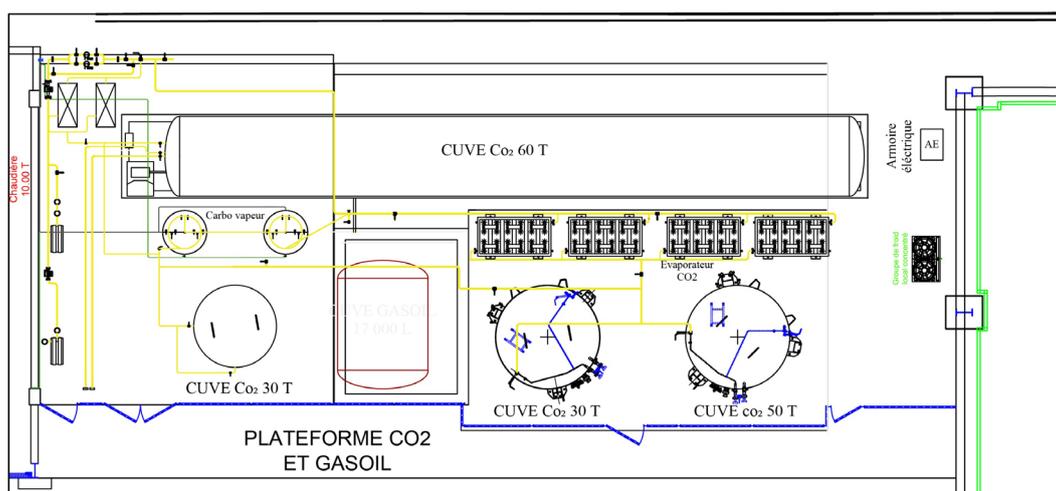


FIG. 3.1 : Plan de la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide actuel

- Les systèmes de Gestion Thermique et Pression

- Résistances Chauffantes : Chaque réservoir isotherme est équipé d'une résistance chauffante pour augmenter la température du CO<sub>2</sub> liquide et augmenter sa pression.  
**Remarque** : : Les Réservoirs Isothermes maintiennent généralement une température et une pression constantes, sauf en cas d'utilisation où la pression diminue progressivement.
- Groupes de Refroidissement : Les réservoirs non isothermes sont équipés de groupes de refroidissement pour diminuer la température du CO<sub>2</sub> liquide et sa pression lorsque la température externe est élevée.

### 3.2.1 Consommation de CO<sub>2</sub> dans les Lignes de Production

TAB. 3.2 : Consommation de CO<sub>2</sub> chez Fruitful Coca-Cola

Description	Valeur	Unité
Consommation horaire maximale	1 – 1.2	tonnes/h
Consommation quotidienne	28 – 29	tonnes/our
Capacité totale de stockage	170	tonnes
Autonomie de production	5 – 6	tonnes

### 3.2.2 Sécurité et Régulation de la Pression opérationnelle

#### - Intervalle de Pression Opérationnelle :

La pression dans les lignes de production est généralement maintenue entre 16 et 20 bars pour un fonctionnement optimal.

#### - Limites de Pression :

- **Pression Minimum** : 15 bars. Une pression inférieure à 15 bars provoque un dysfonctionnement des lignes de production.
- **Pression Maximum** : 22 bars. Une pression supérieure à ce seuil présente un risque de craquage pour l'intégrité du réservoir et peut entraîner une perte de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les soupapes de décharge jouent un rôle très important en libérant progressivement de petites quantités de gaz, ce qui permet de maintenir une pression interne stable et sûre.

### 3.2.3 Consommation et couts énergétique de chaque méthode de transformation du CO<sub>2</sub> liquide en gaz

TAB. 3.3 : Consommation et couts énergétique des différentes méthodes de transformation du CO<sub>2</sub>

Méthode	Unité	Consommation énergétique	Couts en DA/jour
Vaporisateur	/	0	0
Carbo Vapeur	KWh	140	12516
Réchauffement électrique	KWh	120	8046

### 3.3 Méthodologie suivie

#### Objectif

Dans le cadre de mon projet de fin d'études, visant à améliorer et optimiser la station du stockage de dioxyde de carbone ( CO<sub>2</sub> ), des propositions seront explorées et développées. Ces propositions ont pour objectif de renforcer l'efficacité du système, de minimiser les impacts environnementaux et de garantir une meilleure intégration des technologies avancées.

Ces changements seront présentés en détail dans les sections suivantes, mettant en lumière les bénéfices anticipés ainsi que les défis associés à leur mise en œuvre.

#### 3.3.1 Conditions présentes

Les réservoirs cryogéniques nécessitent généralement un entretien régulier ainsi qu'un contrôle réglementaire décennal.

Dans la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide, le réservoir 1, mentionné dans (Tab. 3.1), est le plus ancien. En raison de ses défauts d'isolation, il n'est pas possible de maintenir le CO<sub>2</sub> liquide à sa température et pression de stockage. L'équipe de Fruital Coca-Cola n'a pas réussi à effectuer son entretien régulier, ce qui pourrait affecter la qualité du CO<sub>2</sub> stocké et, par conséquent, celle de la production, d'autant plus que ce réservoir a la plus grande capacité.

#### 3.3.2 Améliorations proposées

##### a. Remplacement du réservoir 1 :

##### La proposition :

- Remplacement du réservoir 1 par trois réservoirs cryogéniques isothermes verticaux de 30 tonnes (2 nouveaux réservoirs et le réservoir 4).

## Chapitre 3. Partie pratique

---

-L'emplacement vide laissé par le réservoir 4 sera utilisé pour installer un autre nouveau réservoir vertical de 50 tonnes.

**Remarque :** Cette proposition s'appuie sur une étude de sol préalable réalisée par une équipe spécialisée, qui a confirmé la résistance du sol. Les résultats ont indiqué que le terrain est adapté pour accueillir les trois nouveaux réservoirs verticaux ainsi que le nouveau réservoir de 50 tonnes

TAB. 3.4 : Les nouveaux réservoirs de la station de stockage du CO<sub>2</sub>

Réservoir		Position	Type	Capacité de stockage (tonnes)
1	1	Vertical	Isotherme	30
	2	Vertical	Isotherme	30
	3	Vertical	Isotherme	30
2		Vertical	Non isotherme	30
3		Vertical	Isotherme	50
4		Vertical	Isotherme	50

### - Avantages :

- Meilleur contrôle de la température grâce aux réservoirs isothermes
- Augmentation de la capacité totale de stockage de 50 tonnes
- **Utilisation optimisée de l'espace, permettant potentiellement de gagner 50 mètre carrée**

### - Inconvénients :

- Coût initial élevé pour l'acquisition et l'installation des nouveaux réservoirs
- Gestion thermique complexe pour accompagner l'augmentation du volume de stockage
- **Coût supplémentaire** pour l'achat du CO<sub>2</sub> liquide

### **b. Ajout de deux vaporisateurs à air ambiant dans l'installation : La**

**proposition :** L'utilisation optimisée de l'espace dédié au réservoir 1 a permis de libérer une superficie de 50 m<sup>2</sup>, ce qui a donné l'idée d'installer deux nouveaux vaporisateurs à air ambiant.

## Chapitre 3. Partie pratique

Cette extension de la surface d'échange thermique offre de nombreux avantages, notamment en matière d'efficacité énergétique et de performance opérationnelle de la station. Ces aspects seront démontrés dans la partie pratique de ce projet.

- **Les avantages**

- Processus de transformation du CO<sub>2</sub> liquide en gaz respectueux de l'environnement.
- Diminution de la consommation énergétique.

- **Les inconvénients :**

- Coût initial élevé pour l'achat et l'implantation de ces vaporisateurs.
- Risque d'encrassement des nouvelles surfaces, nécessitant une maintenance plus fréquente et potentiellement coûteuse.

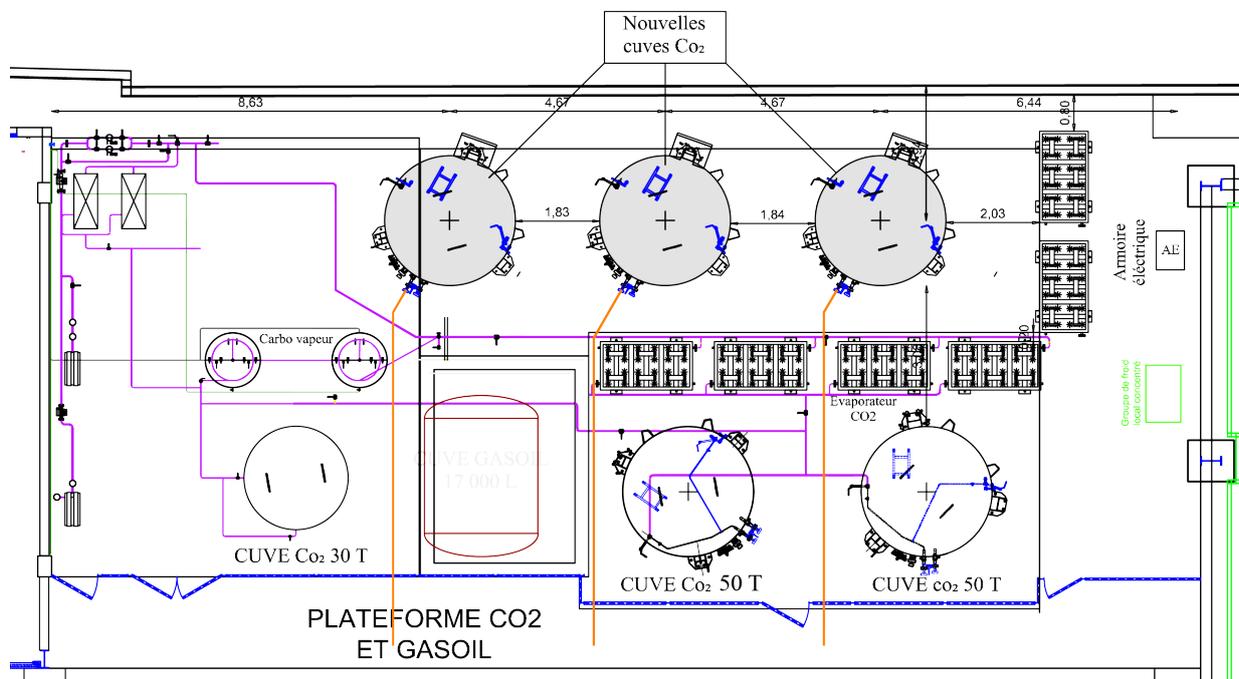


FIG. 3.2 : Plan de la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide après l'amélioration

## 3.4 Partie pratique

### 3.4.1 Vaporisateurs à air ambiant présents sur site :

Au niveau de la station de stockage du dioxyde de carbone liquide, se trouvent quatre vaporisateurs à air ambiant identiques de marque Cryolor VAP 630, reliés en série.



FIG. 3.3 : Photo réelle des 04 vaporisateurs en série

Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres de conception des vaporisateurs :

TAB. 3.5 : Les différents paramètres de conceptions des vaporisateurs Cryolor VAP 630.

Paramètre	Valeur
Matériau d'ailette	Aluminium
Nombre des tubes	24
Nombre d'ailettes par tube	8
Hauteur des ailettes	5m
Épaisseur des ailettes	0.5mm
Longueur des ailettes	10cm
Espacement des ailettes	2 mm

#### **Processus :**

Les vaporisateurs ambiants fonctionnent en faisant passer le CO<sub>2</sub> liquide à travers un

échangeur de chaleur, qui est généralement constitué de tubes en cuivre à ailettes en aluminium. L'échangeur de chaleur est exposé à l'air ambiant et la chaleur de l'air est transférée au CO<sub>2</sub> liquide, provoquant sa vaporisation avec un changement de phase. Dans notre installations le CO<sub>2</sub> liquide passe par les 04 évaporateurs jusqu'à ce qu'il soit à la sortie en phase gazeuse.

### 3.4.2 Les calculs de dimensionnement des vaporisateurs

Dans cette partie, nous allons étudier nos vaporisateurs à air ambiant et calculer la température minimale de l'air ambiant requise pour leur fonctionnement en utilisant la méthode DTLM (Différence de Température Logarithmique Moyenne) dans un échangeur à co-courant ainsi que le temps nécessaire pour ce processus.

Données de l'entreprise :

TAB. 3.6 : Paramètres d'entrée et de sortie des fluides chaud et froid des vaporisateurs

Fluides	Fluide froid	Fluide chaud
Fluide circulant	CO <sub>2</sub> liquide	Air ambiant
Débit massique (kg/h)	1200	inconnu
Températures d'entrée (°C)	-25	à calculer
Température de sortie (°C)	19 (annexes)	/
Pression de travail (bar)	16-18	/

Données nécessaires pour les calculs (annexes) : Dans un système de plusieurs

TAB. 3.7 : res nécessaires pour les calculs de dimensionnement

Données	Unité	Valeur
Enthalpie du CO <sub>liq</sub> à (-25°C)	<u>kJ</u> /kg	143.79
Enthalpie du CO <sub>2 vap</sub> à (-25°C)	<u>kJ</u> /kg	437,06
Chaleur latente de vaporisation du CO <sub>2</sub> (L <sub>v</sub> )	KJ/kg	293.27
Conductivité thermique d'Aluminium (λ)	W/mk	237
Vitesse du CO <sub>2</sub>	<u>m</u> /s	0.589

évaporateurs en série :

## Chapitre 3. Partie pratique

---

- ✓ Une quantité du CO<sub>2</sub> liquide traverse chaque évaporateur.
- ✓ La température de sortie du CO<sub>2</sub> à la sortie de chaque évaporateur doit être égale à 15°C pour garantir son évaporation complète.

Pour calculer la température minimale de l'air ambiant nécessaire à l'évaporation du CO<sub>2</sub> nous utilisons la méthode des différences de température moyenne logarithmique (  $\Delta T_{moey}$  ).

### Méthode de calcul :

1. On calcule la chaleur nécessaire pour vaporiser le CO<sub>2</sub> liquide.
2. On calcule le coefficient d'échange global théorique et la surface d'échange globale.
3. Avec la température de sortie connue du CO<sub>2</sub>, nous calculons notre  $\Delta T_{LM}$  pour avoir notre température minimale d'air ambiant.
4. On calcule le temps nécessaire pour la vaporisation

### Cas de 04 vaporisateurs (état actuel)

On a 4 vaporisateur et un débit massique du CO<sub>2</sub> liquide égale à 1200 kg/h, donc pour chaque 04 vaporisateur on a un débit d'entrée égale à 300 kg/h.

#### a. Chaleur nécessaire pour vaporiser le CO<sub>2</sub>

La chaleur totale nécessaire pour vaporiser 300 kg/h de CO<sub>2</sub> liquide est donnée par :

$$Q_{\text{total}} = \dot{m}_{\text{co2}} h_{fg} \quad (3.1)$$

$$Q_{\text{total}} = 300293.27 = 87980 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = \frac{87980000 \text{ J/h}}{3600 \text{ s/h}} = 24439.16 \text{ W}$$

**b. Calcul de la surface d'échange de chaleur** Pour un seul vaporisateur : Pour un seul vaporisateur :

$$A_{\text{évap}} = N_{\text{tubes}} A_{\text{tube}} \quad (3.2)$$

$$A_{\text{tube}} = N_{\text{ailettes}} A_{\text{ailettes}} \quad (3.3)$$

On a des ailettes rectangulaires :

$$A_{\text{aillette}} = 2((Le) + (HL)) + (eH) \quad (3.4)$$

$$A_{\text{aillette}} = 2((0.10.002) + (50.1)) + (0.0025)$$

$$A_{\text{aillette}} = 1.01 \text{ m}^2$$

On calcule maintenant la surface d'échange d'un seul tube :  
AN :

$$A_{\text{tube}} = 81.0104 = 8.08 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{évap}} = 248.0832 = 193.99 \text{ m}^2$$

### Coefficient d'échange global théorique

Pour un évaporateur complet, le  $U_{\text{global}}$  est influencé par la surface totale d'échange. Cependant, le  $U_{\text{global}}$  de l'évaporateur complet peut être approximé comme étant le même que celui d'une section si toutes les sections sont similaires et fonctionnent sous des conditions semblables. Dans notre cas on a 04 évaporateurs identiques et donc :

$$U_{\text{global}} \approx U_{\text{section}}$$

Maintenant pour calculer le coefficient global de transfert de chaleur, on doit prendre en compte les résistances thermiques associées aux différentes parties du système de transfert de chaleur. Dans le cas d'évaporateur à air ambiant avec des tubes à ailettes en aluminium :

$$\frac{1}{U} = R_{\text{conv,air}} + R_{\text{ailettes}} + R_{\text{conv,co2}} \quad (3.5)$$

#### - Résistance thermique de la convection naturelle de l'air ( $R_{\text{conv,air}}$ )

Pour la convection naturelle, le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'air ( $h_{\text{air}}$ ) est généralement plus faible que pour la convection forcée. Il peut être déterminé à partir de corrélations empiriques comme suit :

$$h_{\text{air}} = C \left( \frac{Gr Pr}{H} \right)^n k_{\text{air}} \quad (3.6)$$

H ici c'est la longueur caractéristique de la surface qui est égale à la hauteur d'ailette  $C$  et  $n$  sont des constantes déterminées empiriquement pour la convection naturelle.

$$\left\{ \text{Pour un écoulement laminaire : } n = \frac{1}{4} \right\}$$

$$Gr = \frac{\rho g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\mu^2} \quad (3.7)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K_{\text{air}}} \quad (3.8)$$

### Chapitre 3. Partie pratique

---

Dans notre cas on n'a pas la température sur la surface et de l'air ambiant et aussi le cas de nos évaporateurs qui travaillent à l'air ambiant la température change aléatoirement elle n'est pas constante donc on n'a pas un coefficient d'échange fixe.

Les coefficients de transfert de chaleur par convection naturelle pour l'air ambiant sont généralement dans la gamme de 5 à 25 W/m<sup>2</sup> · K. Gr Pr Pour l'air ambiant est typiquement autour de 10<sup>9</sup> à 10<sup>10</sup>. Cela donne une estimation de :

$$h_{\text{air}} \approx 5 - 10 \text{ W/m}^2\text{k}$$

Pour nos calculs on prend la moyenne et donc :

$$\begin{aligned} h_{\text{air}} &= 7.5 \text{ W/m}^2\text{k} \\ R_{\text{conv,air}} &= 0.13 \text{ m}^2\text{k/W} \end{aligned}$$

Résistance thermique des ailettes (  $R_{\text{aillette}}$  )

$$\begin{aligned} R_{\text{aillette}} &= \frac{e_{\text{aillette}}}{k_{\text{aillette}} A_{\text{aillette}}} & (3.9) \\ R_{\text{aillette}} &= \frac{0.002}{2371.0104} \\ R_{\text{aillette}} &= 8.35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K/W} \end{aligned}$$

- Résistance thermique de la convection du CO<sub>2</sub> (  $R_{\text{conv,air}}$  )

$$h_{\text{co2}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k_{\text{co2}}}{D} \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Re = \frac{\rho \vartheta D}{\mu} \\ Pr = \frac{\mu C_p}{K_{CO_2}} \\ K_{CO_2} = 0.16 \\ D = 0.03 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Re = \frac{9710.5890.03}{0.00015} = 11.4310^4 \\ Pr = \frac{0.000152100}{0.16} = 1.31 \end{array} \right\}$$

$$h_{CO_2} = 0.023 (11.4310^4)^{0.8} 1.31^{0.4} \frac{0.16}{0.03}$$

$$h_{CO_2} = 1520.79 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$$

$$R_{CO_2} = \frac{1}{1520.79} = 6.57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Calcul du coefficient global théorique pour 04 vaporisateurs :

$$\frac{1}{U_{\text{théorique},04}} = 0.13 + 8.3510^{-6} + 6.5710^{-4} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{U_{\text{théorique},04}} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (3.12)$$

$$U_{\text{théorique},04} = 7.65 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (3.13)$$

c. Calcul de la différence de température moyenne logarithmique (LMTD)

$$Q = UA\Delta T \quad (3.14)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{UA} \quad (3.15)$$

AN :

$$\Delta TL = \frac{24439.16}{7.65193.99}$$

$$\Delta T = 16.4^\circ\text{C}$$

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\text{Ln} \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{\text{air},e} - T_{\text{co2},s} \\ \Delta T_2 = T_{\text{air},s} - T_{\text{co2},e} \end{cases}$$

On sait que :  $T_{\text{air},e} = T_{\text{air},s}$

$$16.4 = \frac{T_{\text{air}} - 15 - T_{\text{air}} + (-25)}{\text{Ln} \left( \frac{T_{\text{air}} - 15}{T_{\text{air}} - (-25)} \right)}$$

$$16.4 = \frac{-40}{\text{Ln} \left( \frac{T_{\text{air}} - 15}{T_{\text{air}} + 25} \right)}$$

$$\text{Ln} \left( \frac{T_{\text{air}} - 15}{T_{\text{air}} + 25} \right) = \frac{-40}{16.4} = -2.43$$

$$\left( \frac{T_{\text{air}} - 15}{T_{\text{air}} + 25} \right) = 0.08 \Rightarrow T_{\text{air}} - 15 = \mathbf{0.08 T_{\text{air}} + 2}$$

$$T_{\text{air}} = 18.17^\circ\text{C}$$

d. Le temps nécessaire pour vaporiser le CO2

On sait que :  $t = \frac{Q_{\text{tot}}}{P}$

Calcul de la puissance :

$$P = U.A.DT_{moy}$$
$$P = 7,65.193,9.16,4 = 24326.694W$$
$$t = \frac{87980000 \text{ J}}{24326.694w} = 361 \text{ F s} = 1 \text{ h}$$

### Cas de 06 vaporisateurs (après amélioration)

Dans ce cas on a 6 vaporisateur et un débit massique du CO<sub>2</sub> liquide égale à 1200 kg/h, donc pour chaque vaporisateur on a un débit d'entrée égale à 200 kg/h.

#### a. Chaleur nécessaire pour vaporiser le CO<sub>2</sub>

La chaleur totale nécessaire pour vaporiser 200 kg/h de CO<sub>2</sub> liquide est donnée par :

$$Q_{\text{total}} = 200293.27 = 58654 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = \frac{58654000 \text{ J/h}}{3600 \text{ s/h}} = 16292.77 \text{ W}$$

b.

- ✓ La surface d'échange de chaleur est la même qu'auparavant.
- ✓ Le coefficient d'échange global reste le même qu'auparavant.

#### . Calcul de la différence de température moyenne logarithmique (LMTD)

En utilisant la même méthode on trouve :

$$\Delta T_{LM} = 8.97^\circ\text{C}$$
$$T_{\text{air}} = 14.4^\circ\text{C}$$

d. Le temps nécessaire pour vaporiser le CO<sub>2</sub>

On sait que :  $t = \frac{Q_{\text{tot}}}{P}$  Calcul de la puissance :

$$P = 18285.21 \text{ W}$$
$$t = 3007s = 50\text{min}$$

## 3.5 Résultats et discussion

Les calculs précédents nous ont permis d'obtenir des résultats concernant les températures minimales de l'air ambiant nécessaires pour assurer l'évaporation du CO<sub>2</sub> liquide dans ces conditions de stockage, ainsi que le temps requis pour compléter cette transformation de phase, que ce soit avec 4 vaporisateurs sur la station ou avec 6 vaporisateurs. Le tableau ci-dessous résume ces résultats :

TAB. 3.8 : Résultats des calculs

Paramètre	Cas de 04 vaporisateurs sur site	Cas de 06 vaporisateurs sur site
Durée de changement de phase	1 h	50 min = 0.83 h
Température d'air ambiant requise	18.17°C	14.4 °C

**Gain en temps :** Comme présenté dans le tableau précédent avoir 6 vaporisateurs sur site nous a fait gagner une marge de temps de 10 min en processus de transformation ce qui permet d'augmenter la capacité de transformation du CO<sub>2</sub> selon le besoin des lignes de production.

✓ Capacité de transformation par jour par 04 vaporisateurs :  $1.2 \text{ tonne} / h124 = 28.8$  tonnes

✓ Capacité de transformation par jour par 06 vaporisateurs :  $1.2 \text{ tonne} / h0.8324 = 33.6$  tonnes

Quant à la diminution de la température nécessaire pour vaporiser notre débit massique de 1200 kg/h avec 6 vaporisateurs sur le site, elle nous permettra de réaliser des économies d'énergie et en couts d'énergie. Ceci sera démontré par la suite.

La figure ci-dessous représente un diagramme des températures moyenne, maximale et minimale à Alger durant les mois de l'année :

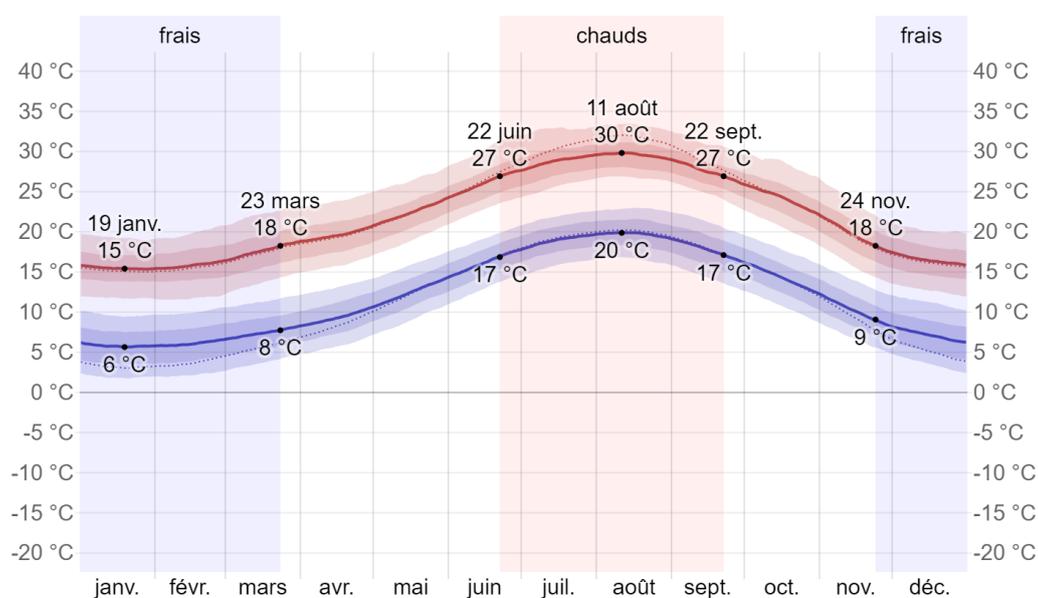


FIG. 3.4 : Température moyenne maximale et minimale à Alger [52].

## Chapitre 3. Partie pratique

---

Ainsi que le tableau ci-dessous regroupe les températures moyenne, maximale et minimale de chaque mois :

TAB. 3.9 : Températures moyenne, maximale et minimale estimé pour chaque mois [52].

Moyenne	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
<b>Haute</b>	15 °C	16 °C	18 °C	20 °C	22 °C	26 °C	29 °C	30 °C	28 °C	24 °C	20 °C	16 °C
<b>Temp.</b>	10 °C	11 °C	12 °C	14 °C	17 °C	21 °C	24 °C	25 °C	23 °C	19 °C	15 °C	11 °C
<b>Basse</b>	6 °C	6 °C	7 °C	9 °C	12 °C	16 °C	19 °C	20 °C	18 °C	14 °C	10 °C	7 °C

La figure ci-dessous montre une caractérisation compacte des températures horaires moyennes pour toute l'année. L'axe horizontal représente le jour de l'année, l'axe vertical l'heure du jour, et la couleur représente la température moyenne pour cette heure et ce jour.

D'après la figure 3.4 et le tableau 3.9. On peut estimer les mois de travail des vaporisateurs seuls sans avoir besoin des autres méthodes.

TAB. 3.10 : Nombre de mois de travail des vaporisateurs

Cas	04 vaporisateurs	06 vaporisateurs
Nombre de mois de travail	05 mois	08 mois

Pour 04 vaporisateurs les mois de travail estimés sont : Juin, juillet, août, septembre, octobre.

Pour 06 vaporisateurs les mois de travail estimés sont : Avril, mai, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre.

### Calcul des coûts de consommation énergétique liées à l'utilisation des deux méthodes de transformations présentes sur site :

Cas de 04 vaporisateurs sur site : On a une utilisation estimée à 7 mois

TAB. 3.11 : Coûts de consommation énergétique durant 7 mois.

Méthode	Coûts (DA)
Carbo Vapeur	2628360
Réchauffement électrique	1689660

Cas de 06 vaporisateurs sur site : On a une utilisation estimée à 4 mois

## Chapitre 3. Partie pratique

---

TAB. 3.12 : Coûts de consommation énergétique durant 4 mois.

Méthode	Coûts (DA)
Carbo Vapeur	1501920
Réchauffement électrique	965520

### Calcul de gain en coûts :

Gain = Coûts de consommation durant 7 mois - Coûts de consommation durant 4 mois

TAB. 3.13 : Gain en coûts

Méthode	Gain(DA)
Carbo Vapeur	1126440
Réchauffement électrique	724140

### Gain énergétique :

TAB. 3.14 : Comparaison de la consommation énergétique entre 4 et 6 vaporisateurs

Cas de 04 vaporisateurs		Cas de 06 vaporisateurs		Gain énergétique
Utilisation des autres méthodes durant 7 mois		Utilisation des autres méthodes durant 4 mois		
Consommation énergétique du Carbo vapeur	<b>980 kwh</b>	Consommation énergétique du Carbo vapeur	<b>560 Kwh</b>	<b>420 KWh</b>
Consommation énergétique du réchauffement électrique	<b>840 kwh</b>	Consommation énergétique du réchauffement électrique	<b>480 Kwh</b>	<b>360 KWh</b>

D'après les résultats des calculs précédents, l'utilisation de 6 vaporisateurs dans la station de production permettrait de réaliser des économies significatives en coûts et en énergie. En effet, l'augmentation du nombre de vaporisateurs améliore l'efficacité du processus de vaporisation du CO<sub>2</sub> liquide.

En utilisant 6 vaporisateurs, le débit massique de 1200 kg/h peut être vaporisé de manière plus rapide, réduisant ainsi la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer le CO<sub>2</sub> liquide à sa température de vaporisation.

Cette approche démontre l'efficacité de la deuxième proposition, qui consiste à ajouter deux vaporisateurs à air ambiant supplémentaires dans l'espace de 50 m<sup>2</sup> libéré par le

changement du réservoir 1 . Le remplacement du réservoir 1 , qui était problématique en raison de ses défauts d'isolation et de ses fissures, permet non seulement de libérer de l'espace, mais aussi d'augmenter notre capacité de stockage et de garantir une meilleure qualité du CO<sub>2</sub> stocké et une plus grande sécurité.

**Aspect environnemental :** L'utilisation de vaporisateurs à air ambiant pour le CO<sub>2</sub> liquide chez ECCBC témoigne de l'engagement de l'entreprise envers des pratiques respectueuses de l'environnement.

Ces systèmes exploitent la chaleur naturelle de l'air, réduisant considérablement la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associées. Au-delà de leur efficacité énergétique, ils présentent plusieurs avantages écologiques : ils n'émettent pas de polluants directs, minimisent l'utilisation d'eau et de produits chimiques, et génèrent peu de bruit. Leur conception simple se traduit par une durabilité accrue et des besoins de maintenance réduits, diminuant ainsi la production de déchets à long terme.

### 3.6 Conclusion

Pour conclure, les résultats de notre étude démontrent clairement que les propositions d'amélioration de la station de stockage du CO<sub>2</sub> liquide présentent des avantages significatifs pour Fruitful Coca-Cola. Ces améliorations ont prouvé leur efficacité optimale sur plusieurs aspects, notamment à l'échelle opérationnelle par une marge de temps de 10min pour la transformation du Dioxyde de carbone en gaz, en efficacité énergétique , réduction des coûts et de plus son impact environnemental positif.

Compte tenu de ces multiples avantages, il est hautement recommandé à ECCBC de mettre en œuvre ces améliorations proposées. Cette décision stratégique non seulement optimiserait les opérations actuelles, mais positionnerait également ECCBC comme une entreprise responsable, alignant ses opérations avec les principes du développement durable.

# Chapitre 4

## Station de production du CO<sub>2</sub>

### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinerons les raisons justifiant la nécessité pour ECCBC de disposer de sa propre station de production de CO<sub>2</sub>. Nous réaliserons une étude de faisabilité de ce projet et mettrons en lumière les nouveaux aspects environnementaux qu'il apporterait à l'entreprise.

#### Objectifs de ce chapitre

- Étudier la faisabilité d'une installation de production de CO<sub>2</sub> chez ECCBC
- Identifier les technologies et détailler les processus nécessaires pour produire et liquéfier le CO<sub>2</sub>.
- Estimer les coûts d'installation et les bénéfices potentiels à long terme pour l'entreprise.
- Valorisation d'un déchet de la station d'épuration de l'entreprise.

### 4.2 Analyse des besoins de Fruital Coca-Cola

Le besoin primordial de l'entreprise est d'assurer ses ressources d'approvisionnement en CO<sub>2</sub> pour garantir le fonctionnement de ses lignes de remplissage et maintenir sa production. Au quotidien, l'entreprise fait appel aux camions d'approvisionnement du fournisseur une fois par jour pour une capacité de 20 tonnes.

L'augmentation de la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> liquide a effectivement permis de garantir la couverture des besoins en CO<sub>2</sub> pendant une semaine sans nécessiter l'intervention du fournisseur. Néanmoins, la dépendance de Fruital Coca-Cola envers un unique fournisseur, Linde Gas, expose l'entreprise à un risque industriel significatif, qui se manifeste sous deux aspects principaux :

**1. Risque temporel :** Si Linde Gas cessait ou interrompait son approvisionnement, Fruital Coca-Cola se trouverait dans une situation critique. Trouver rapidement un nouveau fournisseur de CO<sub>2</sub> capable de répondre aux exigences spécifiques de l'industrie des boissons gazeuses serait difficile à court terme. Cette situation pourrait entraîner une rupture dans la chaîne de production et mettrait en question la capacité de l'entreprise à honorer ses engagements envers ses clients.

**2. Risque financier :** L'arrêt des lignes de remplissage, conséquence directe d'un manque d'approvisionnement en CO<sub>2</sub>, engendrerait des pertes économiques considérables pour Fruital Coca-Cola. Ces pertes se manifesteraient sous plusieurs formes : Coûts fixes continus (salaires, loyers, etc.) sans production correspondante, Perte de parts de marché due à l'incapacité de fournir les produits, Coûts supplémentaires pour relancer la production une fois l'approvisionnement rétabli.

## Chapitre 4. Station de production du CO<sub>2</sub>

---

De plus, cette dépendance à un fournisseur unique peut également exposer Eruitall Coca-Cola à des risques de fluctuation des prix. Sans alternative d'approvisionnement, l'entreprise pourrait se trouver contrainte d'accepter des augmentations de prix imposées par Linde Gas, ce qui impacterait directement sa structure de coûts quotidienne.

Pour atténuer ces risques, il serait judicieux pour Fruitall Coca-Cola d'envisager des stratégies telles que la diversification des fournisseurs ou l'investissement dans sa propre capacité de production de CO<sub>2</sub>. C'est dans ce cadre que s'inscrit la proposition de mise en place d'une station de production de CO<sub>2</sub> propre à Coca-Cola.

### La vision du projet pour l'entreprise

Ce projet vise plusieurs objectifs spécifiques, permettant à l'entreprise de renforcer son autonomie, sa résilience dont je peux citer :

- Réduire la dépendance envers un seul fournisseur (Linde Gas) en diversifiant sa source d'approvisionnement en CO<sub>2</sub> liquide.
- Assurer une production autonome continue de CO<sub>2</sub> garantissant la disponibilité en fonction des besoins de l'entreprise.
- Encourager l'innovation technologique et renforcer la compétitivité de l'entreprise sur le marché des boissons gazeuses.

## 4.3 Station de production du CO<sub>2</sub>

Les différentes étapes et processus de la station de production de CO<sub>2</sub> liquide sont dérivés des informations techniques fournies par le manuel d'Union Engineering Comngny, complétées par les pratiques et connaissances acquises lors du stage fait en mars dans la station de production présente chez Skikda Bottling Company (SBC).

### Description de l'installation :

Pour cette installation le CO<sub>2</sub> sera produit par récupération des fumées de combustion du gaz naturel, avec une capacité de production égale à 1200 kg/h, le CO<sub>2</sub> liquide sera stocké sous une pression d'environ 15 - 18 bar et une température correspondante d'environ  $-27^{\circ} / -21^{\circ}\text{C}$ .

Le procédé de production du CO<sub>2</sub> présente les opérations majeures montrées dans le schéma suivant :

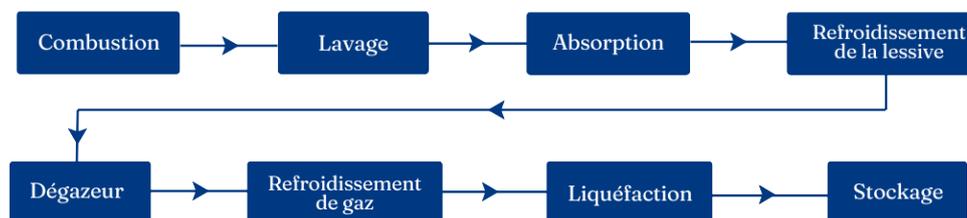


FIG. 4.1 : Différentes étapes de la génération de CO<sub>2</sub>

Pour réaliser ces opérations, des installations spécifiques et des processus bien structurés sont nécessaires. Voici un résumé et une explication des parties importantes de ce système :

**La combustion :** La combustion se fait à l'aide d'une chaudière, qui est conçue pour fonctionner avec du gaz naturel. Le fuel est pompé d'un bac de stockage vers le brûleur qui par la suite génère les fumées qui sont acheminées par la suite vers le laveur des fumées par un extracteur.

**Lavage des fumées :** Dans le laveur, les fumées sont refroidies et les traces de sulfures et suies sont éliminées. De l'eau circule dans le système par l'intermédiaire de la pompe de lavage. L'excès de chaleur est éliminé par un échangeur de chaleur utilisant l'eau du circuit de refroidissement.

L'eau est dirigée vers le laveur à travers un distributeur placé à son sommet. Le distributeur assure une distribution homogène de la solution à travers toute la surface du laveur. Pour assurer une haute efficacité de l'opération de lavage, l'eau ruisselle du haut de la tour vers le bas à travers le garnissage, pendant que le gaz (fumée) circule à contre-courant du bas vers le haut.

Ce contre-courant permet une élimination efficace de la chaleur et des impuretés.

Lorsque les fumées contenant du soufre ou composés soufrés sont lavées dans le laveur, la solution devient plus acide, et la valeur du pH tombe. Une vanne d'entrée de la solution 10% carbonate s'ouvre. L'injection de cette solution concentrée aura pour effet d'augmenter le pH de la solution en circulation. Lorsque le pH aura atteint des valeurs comprises dans les limites de sécurité, la vanne se ferme.

**Absorption :** Dans l'absorbeur, le CO<sub>2</sub> contenu dans le gaz de fumée est absorbé

par une solution de MEA en circulation. La MEA absorbe le CO<sub>2</sub> à basse température (35 – 45°C). La lessive pauvre ruisselle à travers un garnissage du haut vers le bas, tandis que le gaz contenant le CO<sub>2</sub> passe du bas vers le haut. Avec ce contre-courant, le CO<sub>2</sub> contenu dans le gaz sera absorbé par la lessive pauvre relativement froide. La lessive pompée de l'absorbeur contient maintenant le CO<sub>2</sub>, et elle appelée lessive riche.

**Refroidissement de la lessive :** Le refroidisseur de lessive est un double échangeur de chaleur utilisant 3 médias : lessive riche, lessive pauvre et eau de refroidissement. Dans la première section de l'échangeur, il y a la lessive pauvre chaude d'un côté, et la lessive riche froide de l'autre (Pos. 3, fig. 2). Dans cette section la chaleur est transférée de la lessive pauvre vers la lessive riche. Dans la deuxième section de l'échangeur, la lessive pauvre encore relativement chaude, subit un second refroidissement à environ 40°C avec de l'eau de refroidissement (Pos. 1 fig. 2).

La particularité de la solution de MEA, est que, elle ne peut absorber le CO<sub>2</sub> qu'à basse température ( 35 – 45°C ), d'où la nécessité d'un refroidissement supplémentaire à l'eau pour atteindre la température requise pour une bonne absorption.

**Dégazeur :** La lessive riche contenant le CO<sub>2</sub> est préchauffée dans le refroidisseur à lessive avant d'entrer dans le strippeur (dégazeur). Afin de libérer le CO<sub>2</sub> de la solution de lessive, celle-ci doit être portée à son point d'ébullition. L'apport de chaleur est fourni par le brûleur, et dans la chaudière on génère un mélange de vapeur d'eau et de CO<sub>2</sub> gaz qui se dirige vers le strippeur. La lessive riche (lessive MEA avec CO<sub>2</sub> ) provenant de l'absorbeur est dirigée vers le haut du strippeur et passe par un distributeur.

Le distributeur assure une distribution homogène de la lessive riche à travers toute la surface du strippeur. Afin d'augmenter la surface de contact entre la lessive riche et la vapeur provenant de la chaudière, la tour de stripping est garnit d'anneaux en céramique. La lessive riche ruisselle à travers ce garnissage du haut vers le bas, tandis que le mélange vapeur et CO<sub>2</sub> s'écoule du bas vers le haut. Ce contre-courant va contribuer efficacement à libérer (desorbé) le CO<sub>2</sub> contenu dans la lessive riche. Le mélange vapeur et CO<sub>2</sub> sort en tête du strippeur et se dirige vers le refroidisseur de gaz. La lessive aspirée de la chaudière a libéré tout son CO<sub>2</sub> et, est appelée lessive pauvre.

**Refroidissement de gaz :** La vapeur et le CO<sub>2</sub> développés dans la chaudière et le strippeur doivent être séparés avant d'entrer dans la section de liquéfaction. Pour cette raison, le refroidisseur de gaz est installé. L'eau de refroidissement utilisée permet d'une part de condenser la vapeur d'eau et d'autre part de refroidir le CO<sub>2</sub> à environ 40°C. L'eau de condensation est envoyée vers le réservoir. Le CO<sub>2</sub> gazeux refroidit sortira en tête du séparateur d'eau pour se diriger vers la section de liquéfaction. Le séparateur d'eau est équipé

## Chapitre 4. Station de production du CO<sub>2</sub>

---

d'un extracteur de gouttelette, afin d'éviter aux gouttelettes d'eau de s'échapper avec le CO<sub>2</sub> gaz.

### **Liquéfaction : Tour de lavage au permanganate de potassium ( KMNO<sub>4</sub> ) :**

A la sortie du séparateur d'eau le CO<sub>2</sub> gazeux entre dans le laveur au permanganate, où les NOX, traces de MEA et les acétaldéhydes sont éliminées. Ceci est réalisé avec une solution de permanganate de potassium dosée à 3% qui circule dans le laveur. Le principe de cette tour est le même que pour le laveur à carbonate de sodium, mais celle-ci utilise du permanganate.

Le distributeur installé au sommet de la tour pour assurer une haute efficacité de l'opération de lavage. La solution de permanganate ruisselle du haut de la tour vers le bas à travers le garnissage, pendant que le CO<sub>2</sub> gazeux contenant les NOX, traces de MEA et les acétaldéhydes circulent à contre-courant du bas vers le haut. Ce contre-courant élimine les impuretés contenues dans le CO<sub>2</sub>.

### **- Compresseur de CO<sub>2</sub>**

Après avoir traversé le laveur de permanganate, au niveau du compresseur, le CO<sub>2</sub> est comprimé en deux étages. Au premier étage, le gaz est comprimé à environ 2,8 bars. Il en résulte une augmentation de température pouvant atteindre 160°C. Un refroidissement est donc nécessaire avant le second étage de compression. Le gaz est refroidi à 35°C dans un refroidisseur intermédiaire avec de l'eau de refroidissement. Pendant ce refroidissement, de la vapeur d'eau se condense et elle est purgée par la vanne automatique de purge.

Au second étage, le CO<sub>2</sub> est comprimé de 2,8 bars à environ 16 bars. La température atteinte est environ 160°C en fin de compression. Ce gaz est ensuite refroidi à environ 40°C.

### **- Déshydratation :**

Bien que la majeure partie de l'eau contenue dans le CO<sub>2</sub> ait été enlevée par les refroidisseurs intermédiaire et final, il subsiste encore dans le gaz CO<sub>2</sub> une certaine quantité d'eau. Afin d'éliminer le reste de l'eau, le gaz est dirigé vers le déshydrateur qui est constitué de deux cuves remplies de tamis moléculaire. Le principe du tamis moléculaire est que sa surface est poreuse. Le diamètre des pores utilisé est de 3-4 Angstrom. Dans les pores l'eau vient de déposer et on augmente la température, lorsqu'elle est suffisamment élevée, l'eau accumulée s'évapore et s'échappe avec le gaz régénérant.

### **-Filtre à charbon actif**

Le rôle du filtre à charbon actif est d'enlever les odeurs et autres impuretés du CO<sub>2</sub>

gazeux.

### Stockage :

Le CO<sub>2</sub> gazeux provenant du filtre à charbon actif est dirigé vers le condenseur à tube et calandre, avec le CO<sub>2</sub> circulant coté tubes et le réfrigérant coté calandre. A une pression d'environ 15 bars, le CO<sub>2</sub> est condensé à environ  $-27^{\circ}\text{C}$  et s'écoule par gravité vers un réservoir de stockage.

### D'autres unités présentes dans la station de génération du CO<sub>2</sub> liquide

#### *Unité de réfrigération :*

Dans cette unité l'Ammoniac (NH<sub>3</sub>) est utilisé comme fluide réfrigérant. La pression de gaz d'ammoniac est d'environ 0,4 bar, correspondant à une température liquide d'environ  $-27^{\circ}\text{C}$ . La température de gaz dans la ligne d'aspiration devrait être d'environ  $-20^{\circ}\text{C}$ . Cette différence de température est appelée surchauffe à l'aspiration qui doit toujours être positive pour s'assurer que tout l'ammoniac s'est évaporé avant d'entrer dans le compresseur.

Ce gaz est comprimé de 0,4 bar à environ 16 bars. A cette pression de 16 bars, l'ammoniac est condensé (liquéfié) dans le condenseur.

Ce condenseur est un échangeur de chaleur tube/calandre, où l'eau de refroidissement circule dans les tubes et NH<sub>3</sub> coté calandre pour que le NH<sub>3</sub> se liquéfie et s'écoule vers son receveur.

#### *Système d'eau de refroidissement*

Il consiste en une tour de refroidissement avec des ventilateurs et d'une pompe pour la circulation d'eau dans la tour et dans les échangeurs de chaleur de l'installation. Qui consiste à alimenter les différentes installations qui nécessitent l'eau pour son fonctionnement.

L'installation de CO<sub>2</sub> est conçue pour fonctionner 24 heures sur 24,7 jours sur 7, en mettant l'accent sur la performance et la fiabilité.

## 4.4 Les besoins spécifiques de la station de production du Dioxyde de Carbone

Le besoin en CO<sub>2</sub> chez ECCBC varie en fonction du travail des lignes de production. Dans cette évaluation, nous prendrons en compte le cas optimal où les 7 lignes de production fonctionnent en continu pendant 24 heures. Le tableau ci-dessous montre les spécifications auxquelles la station doit répondre :

TAB. 4.1 : Spécifications de l'installation

Besoin	Évaluation
Consommation journalière du CO <sub>2</sub> liquide	28.8 tonnes
Débit massique horaire du CO <sub>2</sub> liquide	1200 kg/h
CO <sub>2</sub> liquide	À une température (-21 et -27°C) et pression entre 16 et 18bar.

Pour satisfaire une capacité de production égale à 1200 kg/h du CO<sub>2</sub> liquide, le tableau ci-dessous présentera les exigences par rapport quelques ingrédients :

TAB. 4.2 : Besoins en ingrédients

Gaz naturel	592.8 Nm <sup>3</sup> /h
MEA (Monoéthanolamine)	3 kg/h
Na CO	0.63 kg/h

### 4.5 Étude de Faisabilité

Cette étude détaillera les différents coûts d'investissement nécessaires pour mettre en place la station de production de CO<sub>2</sub> liquide à partir des données fournies par le manuel technique d'une station d'Union Engineering Company, ainsi que le retour sur investissement attendu pour l'entreprise.

Elle examinera les dépenses initiales, les coûts opérationnels et d'entretien, et mettra en relation ces coûts avec les bénéfices économiques potentiels. Cette analyse permettra à l'entreprise de comprendre les avantages financiers et stratégiques de l'investissement proposé.

### 4.5.1 Coûts d'installation et d'exploitation

TAB. 4.3 : Coûts d'installations et d'exploitation

Description	Coût (DA)
Prix total de l'unité	243692411
Prix de transport et de l'installation	8808159.44
<b>Total</b>	<b>252500570.5</b>

### 4.5.2 Coûts annuels de consommation

TAB. 4.4 : Coûts annuels de consommation

Coûts annuels	Coût (DA)
Consommation énergétique	13705020
Conso du matériels / produits	30206082.43
Coûts d'installation et formation	8613000
<b>Total</b>	<b>52524102.43</b>

Ainsi, notre étude financière indique que notre investissement sera amorti dans une période estimée à presque 2 ans.

### 4.5.3 Production annuelle de la station

TAB. 4.5 : Production annuelle de la station de production

Production de la station	Valeur
Production totale du CO <sub>2</sub> annuel en tonnes	9953.28
Valeur unitaire du CO <sub>2</sub> au marché en DA	218972160
<b>Total</b>	<b>218972160</b>

### 4.5.4 Bénéfice annuel et durée d'amortissement

- **Bénéfice Annuel** : Le bénéfice annuel d'un projet est la différence entre les revenus générés par le projet et les coûts opérationnels associés à ce projet sur une année donnée. Il peut être exprimé par la formule suivante :

$$\text{Bénéfice Annuel} = \text{Revenus Annuel} - \text{Coûts d'Exploitation}$$

- **Revenues Annuel** :
  - Revenus supplémentaires générés par le projet (par exemple, vente de CO<sub>2</sub> excédentaire).
  - Économies réalisées grâce à l'intégration du projet (par exemple, réduction des coûts d'achat de CO<sub>2</sub> externe).

Le tableau ci-dessous présentera ces calculs :

TAB. 4.6 : Calcul de la durée d'Amortissement de l'investissement

Les coûts	Valeur en DA
Investissements	261113570.5
Consommation annuelle	43911102.43
Gain annuel	218972160
Bénéfice annuel	175061057.6
<b>Durée d'amortissement 'ans'</b>	1.491557141

D'après les résultats obtenus des calculs, nous avons un gain annuel de 218 972 160 DA de production de CO<sub>2</sub>, et un bénéfice annuel égal à 175 061 057,6 DA. Ainsi, notre étude financière indique que notre investissement sera amorti dans une période estimée à presque 2 ans.

## 4.6 La valorisation du biogaz

En Algérie, le Décret exécutif n° 06-141 établit les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. L'article 4 de la section 2 stipule que :

*« Toutes les installations générant des rejets d'effluents liquides industriels doivent être conçues, construites et exploitées de manière à ce que ces rejets ne*

*dépassant pas à la sortie de l'installation les valeurs limites de rejets définies en annexe du présent décret et doivent être dotées d'un dispositif de traitement approprié de manière à limiter la charge de pollution rejetée » [53].*

*Entreprise Coca-Cola*, a dû se soumettre à ce décret gouvernemental imposant un traitement des eaux usées industrielles avant leur déversement dans les réseaux d'assainissement publics. Face à cette nécessité, et pour se soustraire aux sanctions potentielles, Coca-Cola a collaboré avec une société voisine disposant de l'espace requis pour installer une station d'épuration anaérobie.

### 4.6.1 Station d'épuration

En collaboration avec l'entreprise voisine, *Entreprise Coca-Cola* a pu installer une station d'épuration anaérobie, le but principal de cette station est de traiter les différents effluents sortant des deux entreprises par la méthanisation ou ce qu'on appelle la digestion anaérobie, et comme décrit en dessus ce type des procédés permet la valorisation des différentes matières organiques présentes dans ces déchets en produisant une source d'énergie propre qui est le biogaz.

Parmi les modes d'utilisations de ce produit est un carburant, par ailleurs le biogaz purifié peut être utilisé comme équivalent au gaz naturel.

### 4.6.2 Comment valoriser le Biogaz ?

Au niveau de cette station d'épuration la production de biogaz diffère d'un jour à l'autre voici un diagramme du débit de biogaz purifié (biométhane) au niveau de l'usine durant le mois du mai 2024 :

Le débit massique de gaz naturel requis pour le fonctionnement de notre station de production du CO<sub>2</sub> est : 592.8 Nm<sup>3</sup>/h

Le débit moyen du biométhane estimé égale à : 103.34 Nm<sup>3</sup>/h

Si on veut calculer le gain énergétique on calcule :

$$\% \text{Gain en énergie} = \frac{103.34}{592.8} 100 = 17.43\% \text{ par jour}$$

Et si on calcule le gain en coûts :

- Sachant que le prix du gaz naturel pour les entreprises est de 0.476 DZD/kWh.

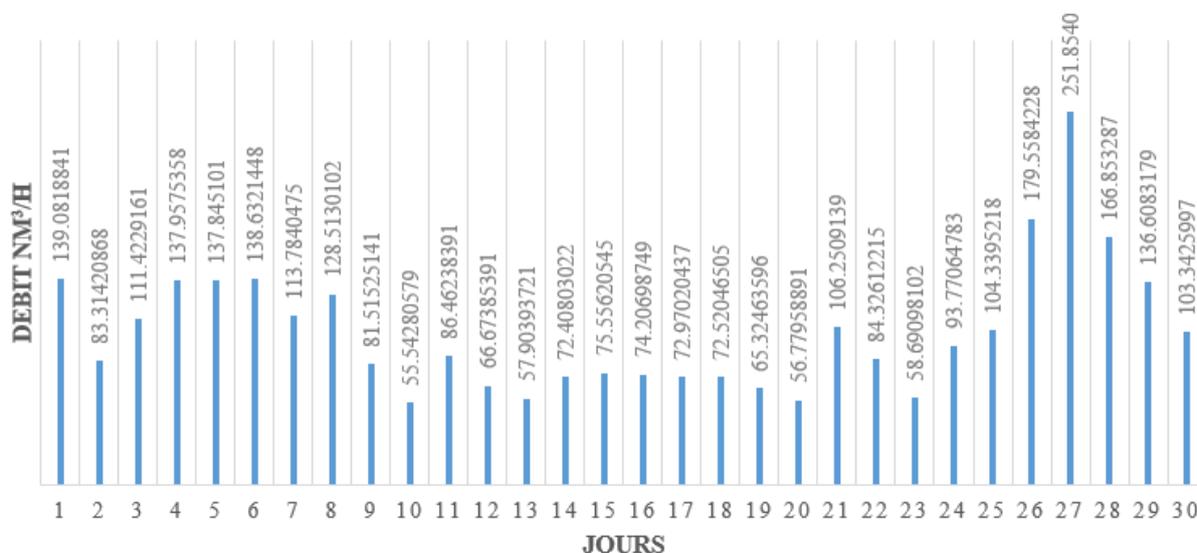


FIG. 4.2 : Débit de biométhane estimé pour le mois de mai 2024

- Sachant que 1 kWh = 1 MJ donc le prix devient 0.132 DZD/MJ
- Sachant que le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel est de 39.8 MJ/kg

**Coût initial du gaz naturel (sans valorisation du biométhane) :**

$$\text{Coût} = \text{débit de gaz naturel} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \text{PCI} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \text{prix DZD/MJ}$$

$$\text{Coût} = 592.839.80.132 = 3114.33 \text{ DZD/h}$$

**Coût réduit du gaz naturel (avec valorisation du biométhane) :**

$$\text{Coût} = (592.8 - 103.34)39.80.132 = 2571.42 \text{ DZD/h}$$

$$\% \text{Gain en coûts} = \frac{3114.33 - 2571.42}{3114.33} 100\% = 17.43\% \text{ par jour}$$

Donc on estime avoir un gain en énergie et en coûts de 17.43 %.

### 4.7 Aspect environnemental

#### 4.7.1 - De la station de production du CO<sub>2</sub>

La production de CO<sub>2</sub> chez *Entreprise Coca-Cola* ne permet pas seulement de réaliser des gains financiers et économiques significatifs au-delà de deux ans, mais elle présente également des avantages environnementaux considérables.

Les technologies de capture et de purification du CO<sub>2</sub> en post-combustion permettent de récupérer le CO<sub>2</sub> des fumées et de le réutiliser, tout en réduisant les autres polluants atmosphériques tels que les oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>). Ces différents processus d'absorption et de purification dégradent ces polluants en molécules moins nocives pour l'atmosphère, contribuant ainsi à la diminution de la pollution atmosphérique et des gaz à effet de serre.

#### - De la valorisation du Biogaz

Contrairement au gaz naturel, qui est une ressource fossile non renouvelable, le biogaz est produit à partir de déchets organiques renouvelables. Donc l'utilisation de ce comme source de CO<sub>2</sub> favorise une économie circulaire où les déchets sont transformés en ressources utiles, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et contribuant à une gestion plus durable des ressources.

Par ailleurs le cycle du carbone est mieux équilibré lorsque le biogaz, qui est une forme de carbone recyclé, est utilisé. Contrairement au gaz naturel, qui libère du carbone stocké depuis des millions d'années.

Enfin L'installation d'une station de production de CO<sub>2</sub> en post-combustion et la valorisation du biogaz purifié pour produire du CO<sub>2</sub> offrent des avantages environnementaux significatifs pour l'entreprise et promouvoir une gestion durable des déchets.

### 4.8 Conclusion :

Pour conclure, notre installation de dioxyde de carbone constitue une solution face aux risques industriels auxquels l'entreprise est exposée en raison de sa dépendance à un seul fournisseur. Cette installation assure une production autonome de CO<sub>2</sub> de 1.2 tonnes/h, garantissant ainsi le fonctionnement continu des lignes de production. En plus des avantages déjà évoqués, ce projet est estimé être amorti après une période de deux ans, ce qui représente un succès majeur pour l'entreprise et son évolution, par ailleurs le gain annuel de ce projet est de 218972160 DA.

## Chapitre 4. Station de production du CO<sub>2</sub>

---

De plus, la récupération et la valorisation du biogaz produit par l'entreprise offrent une nouvelle source de bénéfices économiques par un gain en énergie et en coûts de 17.43% . Cela encourage également des processus alignés avec les objectifs de développement durable. En adoptant ces technologies, Fruital Coca-Cola renforce son engagement envers l'efficacité opérationnelle et la protection de l'environnement, tout en réduisant les coûts et les risques associés à l'approvisionnement en CO<sub>2</sub>.

# Conclusion

## Conclusion

---

Après une analyse approfondie, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont révélé que les améliorations proposées pour la station de stockage du dioxyde de carbone ont des retombées très positives pour l'entreprise. Le remplacement du réservoir 1 en position horizontale nous a permis, en premier lieu, d'augmenter la capacité de stockage du dioxyde de carbone de 50 tonnes, permettant ainsi une meilleure gestion et préservation de notre CO<sub>2</sub> liquide stocké. De plus, l'espace libéré de 50 m<sup>2</sup> a permis l'ajout de deux vaporisateurs sur site.

Les calculs comparatifs entre l'efficacité de 4 et 6 vaporisateurs sur site ont démontré que nous obtiendrons un gain de temps de 10 minutes sur la durée du processus de transformation du CO<sub>2</sub> liquide en gaz, ainsi qu'une diminution de la température nécessaire pour assurer ce transfert par 4°C. Ces améliorations offrent un gain énergétique et une réduction des coûts considérables.

Il convient également de souligner les avantages environnementaux que l'utilisation des vaporisateurs apporte, positionnant l'entreprise sur la voie de processus plus écologiques et renforçant son image en tant qu'entreprise responsable dans le cadre du développement durable.

L'augmentation de la capacité de stockage nous a fait prendre conscience de la dépendance de Fruital Coca-Cola envers un seul fournisseur, ce qui présente un risque industriel à deux niveaux : une perte temporelle et une perte financière. Face à ce risque, l'idée de produire le CO<sub>2</sub> au niveau de l'usine a été envisagée. Après plusieurs recherches et en suivant un manuel technique de l'un des grands fournisseurs d'installations de production de dioxyde de carbone, les différentes étapes de production ont été abordées et les spécifications auxquelles la station doit répondre ont été déterminées.

L'étude financière a conclu que l'investissement dans une station de production de CO<sub>2</sub> d'une capacité de 1,2 tonne/h est un projet viable. Notre étude a révélé un gain annuel de 218 972 160 DA par la production de CO<sub>2</sub>, et un bénéfice annuel de 175 061 057,6 DA, assurant une durée d'amortissement très favorable de 2 ans.

## Conclusion

---

Enfin, nous avons exploré les possibilités de récupération et de valorisation d'une nouvelle source de production : le biogaz. La station d'épuration de Coca-Cola produit quotidiennement un débit considérable de biogaz purifié qui peut être réutilisé à la place du gaz naturel pour produire du CO<sub>2</sub>. L'estimation du débit de biogaz produit pour le mois de mai a donné 103,34 kg/h de biométhane, cette quantité représente un gain de 17,4% en coûts et en énergie pour l'entreprise. Cette valorisation, au-delà de ses avantages cités, favorise une économie circulaire où les déchets sont transformés en ressources utiles, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et contribuant à une gestion plus durable des ressources.

Il est important de souligner que l'impact de cette étude va au-delà des frontières de l'entreprise Fruitall. Les conclusions obtenues ouvrent la voie à des améliorations notables et des gains énergétiques considérables dans l'ensemble de l'industrie. Cette approche holistique de l'optimisation des processus, combinant efficacité énergétique, production in situ et valorisation des déchets, pourrait servir de modèle pour d'autres entreprises du secteur, contribuant ainsi à une industrie plus durable et responsable.

# Bibliographie

- [1] Rizvi, S. S. H. (2014). "Separation, Extraction and Concentration Processes in the Food, Beverage and Nutraceutical Industries". Woodhead Publishing.
- [2] Shachman, M. (2004). "The Soft Drinks Companion : A Technical Handbook for the Beverage Industry". CRC Press.
- [3] Standage, T. (2006). "A History of the World in 6 Glasses". Walker Company.
- [4] Timmerhaus, K. D., Reed, R. P. (2007). "Cryogenic Engineering : Fifty Years of Progress". Springer.
- [5] Guy Puech et Jean-Louis Cuq, "Le CO<sub>2</sub>, gaz maudit ou source de vie?", Montpellier, Académie des Sciences et Lettres, 10 avril 2017, 14p.
- [6] EDF ENR, "Le dioxyde de carbone", <https://www.edfenr.com/lexique/dioxyde-de-carbone-co2/>
- [7] Actu-Environnement, "Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)" [en ligne].
- [8] H. W. Häring, "Industrial Gases Processing", Edition WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2008.
- [9] R. E. Dilgren, "Liquid CO<sub>2</sub> Fracturing : Advantages and Limitations", In : the Journal of Canadian Petroleum Technology, [September 2021].
- [10] Atlas Copso, "Quelles sont les utilisations commerciales et industrielles du dioxyde de carbone?", <https://www.atlascopco.com/fr-dz/compressors/wiki/compressed-air-articles/carbon-dioxide-uses>
- [11] Yousaf Muhammad, "Carbon dioxide utilization : A critical review from multiscale perspective", In : Energy Science Engineering.
- [12] Material Properties, "Dioxyde de carbone", <https://material-properties.org/fr/dioxyde-de-carbone/>

## Bibliographie

---

- [13] Shandong Zhongjie Pressure Equipment Co., Ltd., "Réservoir de stockage du Dioxyde de Carbone liquide".
- [14] Lapesa, "Réservoir cryogénique de stockage de CO<sub>2</sub>", <https://lapesa.es/fr/reservoirs-cryogeniques-pour-le-co2>
- [15] Chart, "Technical manual : carbon dioxide storage tank", Manual #11650869 Rev, Chart industries, Ball ground, USA, 2019.
- [16] Journal officiel de l'Union européenne, "Relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression" [en ligne], 2014/68/UE, 15 mai 2014.
- [17] AFNOR, "Récipients sous pression non soumis à la flamme" [en ligne], EN 13445, Mai 2002, Normes Industrielles Européennes : Comité Européen de Normalisation (CEN), 2002.
- [18] AFNOR, "Récipients cryogéniques - Récipients fixes, isolés sous vide" [en ligne], EN 13448, Septembre 2002, Normes Industrielles Européennes : Commission Européenne et l'Association Européenne de Libre Échange, 2002.
- [19] Richard Taillet, Loïc Villain et Pascal Febvre, "Dictionnaire de physique", De Boeck Supérieur, 23 janvier 2018, 976 p.
- [20] Alouane Dahmane, Soufi Moussa, "Etude de problème de l'encrassement dans un échangeur de chaleur type faisceau-calandre 12x20400", Hydrocarbure, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [21] E. Rouland, "Les Échangeurs Thermiques", Université de Rouen, Master énergie - Parcours Génie des Systèmes Industriels : Maîtrise de l'Énergie, 2020.
- [22] Pr. Said Hamdoui, "Cours des Transferts thermiques", Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Ecole Supérieure de technologie -Fès, Génie mécanique.
- [23] Philippe Marty, "Cours de transferts thermiques : Conduction et rayonnement", Université Joseph Fourier, Grenoble, Génie des procédés, 2012.
- [24] Adeline M., "Échangeur thermique : fonctionnement, types et efficacité", Total Energies, 06 septembre 2022.
- [25] Bontemps A., Guarrigue A., Goubier C., Huetz J., Marvillet C., Mercier P., Vidil R., "Echangeurs de chaleur", Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Références B2340, B2341, B2342, B2343, B2344.
- [26] Weber Christophe, Manificat André, "Les échangeurs de chaleur" [En ligne], Encyclopédie de l'énergie.

## Bibliographie

---

- [27] Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I., "Handbook of Heat Transfer", 3rd Edition – McGraw-Hill.
- [28] Alem Hamza, "Etude des performances thermiques du préchauffeur 200 E-2 au niveau de la raffinerie Raik de Skikda" [en ligne], Mémoire : Génie mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [29] D. Alouane, M. Soufi, "Etude de problème de l'encrassement dans un échangeur de chaleur de type faisceau-calandre 12X20400", Mémoire, Université Kasdi Mer
- [30] Université de M'sila. Génie mécanique. Calcul des échangeurs de chaleur, 2018, 27p.
- [31] Souheila Mellari. Echangeurs de Chaleur en Energies Renouvelables. Université des frères mentouri constantine 1, 2022, 106p.
- [32] Abdallah Haouam. Les échangeurs de chaleur. Université Badji Mokhtar Annaba, 2021, 78 p.
- [33] Rezik Hafied. Étude des transferts de chaleur et de masse de l'ailette humide. Mémoire de fin d'étude. Université de Batna, 2014.
- [34] Dr. Barani Djamel. Transfert de chaleur par des surfaces à ailettes. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 27p.
- [35] ROHSENOW W.M, HARTNETT J.P, CHO Y (1998). Hanbook of Heat. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1501p.
- [36] "Carbon Dioxide Capture and Storage", IPCC, 2005 - Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer (Eds.)
- [37] GEA. Une récupération de CO2 efficace : un facteur de coût de moins.
- [38] Connaissances des énergies. Gazéification.
- [39] Déborah Chery. Approche prévisionnelle de la valorisation électrochimique du CO2 dans les carbonates fondus. Thèse de doctorat : Electrochimie. Paris : Université Pierre et Marie Curie, 2017.
- [40] Commission européenne. Des photocatalyseurs hybrides transforment le CO2 en combustibles solaires respectueux de l'environnement.
- [41] IFP Energies nouvelles. Energies renouvelables, Biogaz.
- [42] Nicolas LOUIS. Optimiser la valorisation du CO2 issu du biogaz pour fabriquer du méthane, 2024. Innovations sectorielles.

## Bibliographie

---

- [43] Connaissances des énergies. Qu'est-ce que le biogaz. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-le-biogaz>
- [44] Mlouki Ismail, Aissaoui Abdelkrim. L'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar. Mémoire de fin d'études : Université d'Adrar, 2017.
- [45] Derbal.K,(2015) digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d'épuration, mémoire doctorat science en génie de l'environnement l'Université Mentouri de Constantine.
- [46] The Coca-Cola Company. (2020). "2020 Business Environmental, Social and Governance Report". The Coca-Cola Company. (2021). "Annual Report 2020".
- [47] Tagnit Hammou Lisa. Optimisation des ratios énergie EUR (Energy Used Ratio) et eau WUR (Water Used Ratio) de l'usine Fruitall/ Coca-Cola en vue de réduire les impacts environnementaux de la chaîne de production. Projet de fin d'étude : génie des procédés et environnement. ENP, 2023, 65p.
- [48] Garcia-Gonzalez, L., et al. (2007). "High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods : The past, the present and the future". International Journal of Food Microbiology.
- [49] Danfoss. (2021). "CO2 Vaporizers for Industrial Refrigeration". Danfoss Technical Paper.
- [50] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2018). "ASHRAE Handbook - Refrigeration". Chapter on CO2 Systems.
- [51] Linde Gas. (2022). "CO2 Vaporization Technologies for the Beverage Industry". Linde Technical Bulletin.
- [52] Weather spark. Climat et moyennes météorologiques tout au long de l'année pour Alger.
- [53] Décret exécutif n° 06-141, JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26.
- [54] Algeria Beverages Consumption Trends and Forecasts Tracker, Q1 2024. GlobalData.

# Annexes

# Annexe A

## L'entreprise Fruitful Coca-Cola

### A.1 Histoire de la boisson COCA-COLA :

En 1885, face à l'interdiction de l'alcool à Atlanta, le Dr John Stith Pemberton, un pharmacien, cherchait un moyen de remplacer les boissons alcoolisées et de répondre à un marché en quête de nouvelles alternatives. En 1886, il créa une boisson à base de sirop pour lutter contre la fatigue, qui fut vendue pour la première fois le 8 mai. C'est là que le sirop, initialement mélangé à de l'eau plate pour des raisons médicinales, fut combiné à de l'eau gazeuse par un serveur, donnant naissance au Coca-Cola.

Franck M. Robinson, comptable de Pemberton, non seulement nomma la boisson "Coca-Cola" mais en créa aussi le premier logo, contribuant ainsi à une identité visuelle forte dès le début. En 1890, Asa G. Candler, un entrepreneur avisé, vit le potentiel de cette boisson et acheta les droits de la formule pour 2300 dollars. Candler finalisa la recette et commença à développer la boisson comme un produit commercial, enregistrant officiellement la marque et le script distinctif de Coca-Cola le 31 janvier 1893.

Coca-Cola est passée d'une invention de pharmacie à une marque mondialement connue. Aujourd'hui, son logo est largement reconnu et la boisson est devenue un élément culturel global, reflétant l'innovation dans l'industrie des boissons gazeuses [42].

### A.2 Entreprise d'accueil Fruitful Coca-Cola

**Fruitful Coca-Cola** Créée en 1993, Fruitful Coca-Cola est spécialisée dans la fabrication de boissons gazeuses non alcoolisées et est devenue le leader du marché avec une part de 50 %. Fruitful produit et commercialise plus de 62 références sous la marque Fruitful

## **Annexe A. L'entreprise Fruital Coca-Cola**

---

Coca-Cola et 57 références sous la marque Coca-Cola, incluant Coca-Cola, Fanta, Sprite, Burn, Schweppes.

Le 15 mars 2006, le groupe espagnol ECCBC (Equatorial Coca-Cola Bottling Company) a acquis 92 % des actions de Fruital SPA, faisant de Fruital l'un des embouteilleurs et distributeurs majeurs de Coca-Cola en Algérie. Fruital importe les concentrés mis au point par The Coca-Cola Company et assure la commercialisation et la distribution à travers des canaux modernes, couvrant 13 wilayas, notamment Alger, Blida, Boumerdès, Tizi-Ouzou, Tipaza, Médéa, Ain Defla, Bouira, BBA, Laghouat, Djelfa, Ghardaïa et Tamanrasset [43].

### **Les Usines de Production en Algérie**

En Algérie, Coca-Cola est produite par trois usines principales :

### **Les Usines de Production en Algérie**

En Algérie, Coca-Cola est produite par trois usines principales :

- Usine Fruital Coca-Cola d'Alger : La plus grande en Algérie.
- Usine de Skikda du groupe Castel.
- Usine d'Oran du groupe Castel.

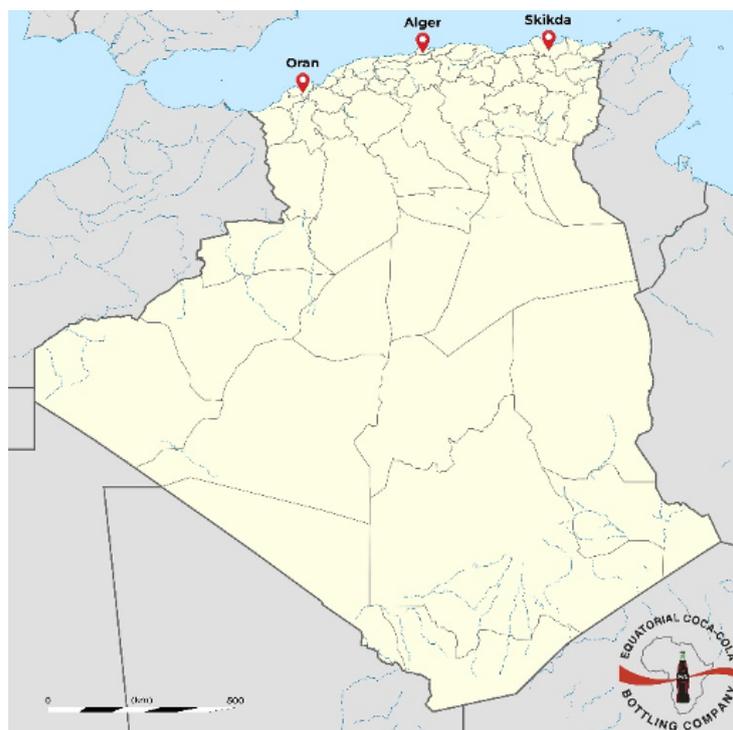


FIG. A.1 : Les usines de Fruitful Coca-Cola en Algérie

### A.3 Description de l'unité fruitful Coca-Cola d'Alger

#### A.3.1 Usine de Rouïba :

Inaugurée en juin 1997, l'usine de Rouïba s'étend sur une superficie de 5 hectares. Dotée d'une capacité de production élevée, cette installation joue un rôle crucial dans les opérations de Fruitful Coca-Cola, non seulement pour répondre à la demande locale, mais également pour l'exportation vers divers pays d'Afrique. La production locale de toutes les boissons commercialisées par Fruitful, telles que Coca-Cola, Fanta, Sprite et Schweppes, est réalisée dans cette usine, garantissant une qualité conforme aux standards internationaux de Coca-Cola.

#### A.3.2 Localisation :

L'entreprise FRUITAL est localisée à la zone industrielle de Rouïba, RN n°5 16013 Rouïba, Alger, Algérie.  
Elle est délimitée par :

- Nord : Route nationale 5.

## Annexe A. L'entreprise Fruital Coca-Cola

---

- Ouest : Établissement ENACTA et plusieurs habitations.
- Sud : Voie ferroviaire.
- Est : Entreprise ABC (TANGO).

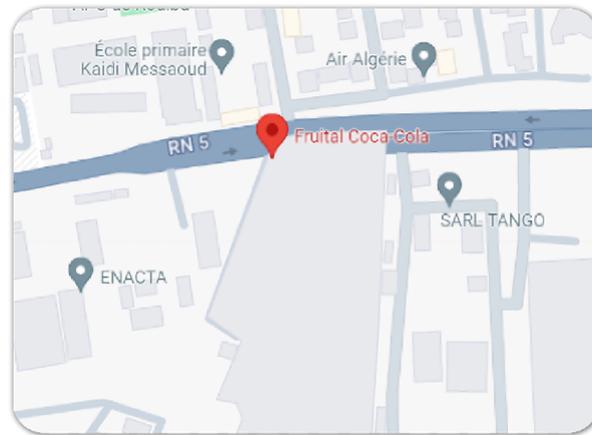


FIG. A.2 : Localisation de l'usine de Fruital Coca-Cola Rouiba sur google map

### A.3.3 Structure organisationnelle :

Pour comprendre comment Coca-Cola coordonne ses opérations, il est essentiel d'examiner sa structure organisationnelle, qui illustre la répartition des divisions et des responsabilités au sein de l'entreprise. Le schéma d'organisation ci-dessous a été spécialement conçu pour gérer efficacement les différentes fonctions de Fruital Coca-Cola :

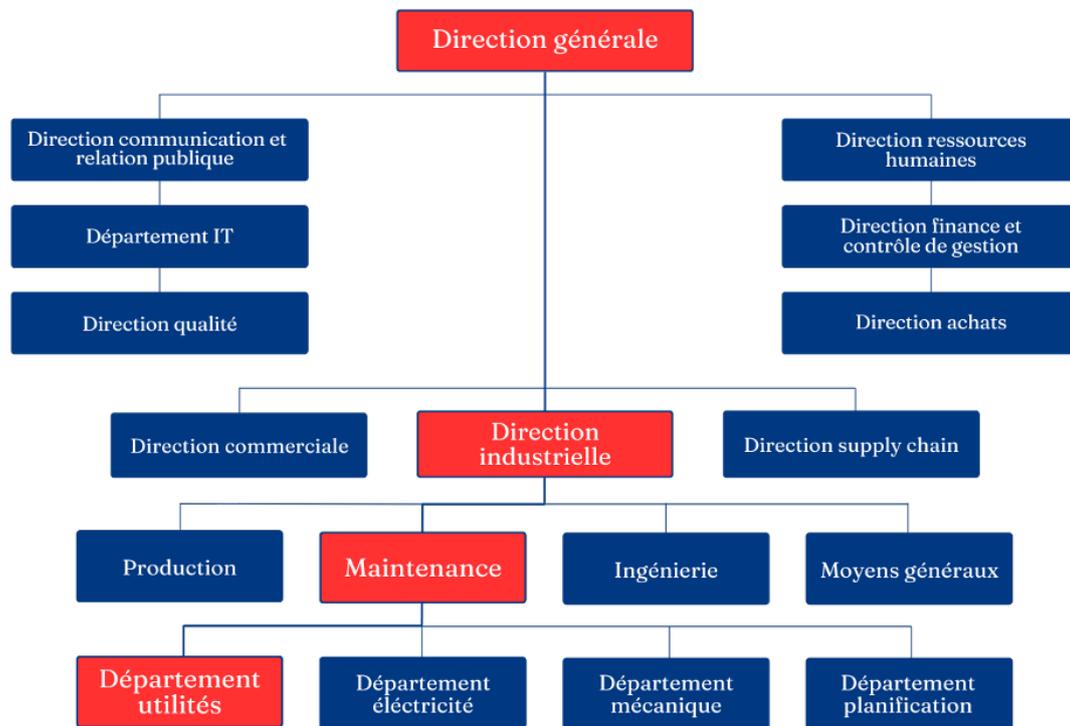


FIG. A.3 : Structure organisationnelle de Fruitful Coca-Cola

### Direction industrielle :

La Direction Industrielle, où j'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage, joue un rôle crucial au sein de Fruitful Coca-Cola. Elle orchestre la production pour atteindre les objectifs prédéfinis tout en garantissant une gestion efficace des opérations de production et de maintenance, et supervise directement et/ou indirectement le département des utilités. Collaborant étroitement avec la direction marketing.

## A.4 Département utilités

Le service utilités est souvent considéré comme le cœur d'une usine, car il est chargé de fournir les différentes énergies et fluides nécessaires au fonctionnement de l'industrie. Au sein de Fruitful Coca-Cola ECCBC, ce département comprend plusieurs installations clés :

- Station de traitement des eaux
- Siroperie
- Lignes de production (remplissage)
- Station de production de vapeur
- Station de froid industrielle
- Station de stockage de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Ci-dessous, nous allons détailler les différentes utilités :

### A.4.1 Station de traitement des eaux

L'eau est essentielle à la production des boissons gazeuses et à diverses opérations au sein de l'usine, telles que le nettoyage du matériel, l'approvisionnement sanitaire, le lavage des bouteilles et la préparation des sirops.

Pour assurer sa qualité et éviter tout impact négatif, elle subit un traitement rigoureux. L'unité de production de Fruitall Coca-Cola à Rouiba s'approvisionne en eau grâce à cinq forages réalisés dans la région. L'eau est prélevée par des pompes et envoyée vers deux réservoirs souterrains via un collecteur. Ensuite, elle est pompée vers les stations de traitement, soit la station 01, soit la station 02, pour des traitements supplémentaires.

Le schéma ci-dessous représente les différentes étapes de ce traitement.

# Annexe A. L'entreprise Fruitall Coca-Cola

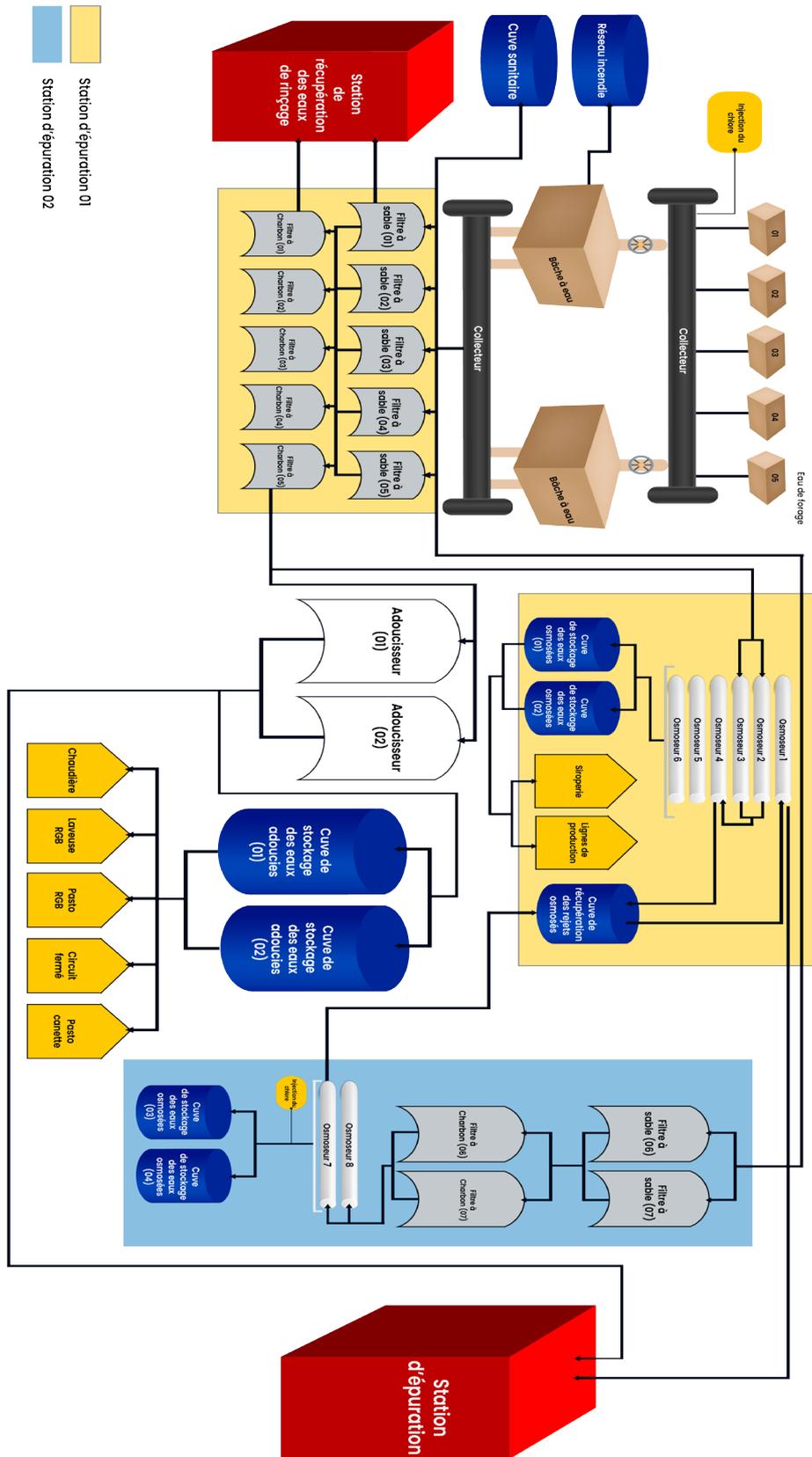


FIG. A.4 : Processus de traitement des eaux chez Fruitall Coca-Cola

### A.4.2 La siroperie

Dans cette station, les ingrédients du sirop, y compris le sucre, les arômes et d'autres additifs, sont mélangés dans des proportions spécifiques pour créer le sirop de base qui donnera à Coca-Cola son goût caractéristique.

### A.4.3 Lignes de production (remplissage)

L'usine de Fruitale Coca-Cola dispose de sept lignes de production, chacune ayant des spécificités en termes de quantité et de qualité produites.

- **Lignes de bouteilles PET :** L'usine possède cinq lignes destinées à produire des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), représentant plus de 80 % de la production en volume.
- **Ligne de canettes :** Cette ligne est dédiée à la production de canettes, représentant environ 15 % de la production.
- **Ligne de bouteilles en verre :** Cette ligne est consacrée au lavage et remplissage des bouteilles en verre, représentant environ 5 % de la production.

### A.4.4 Station de production de vapeur

Composée de trois chaudières de différentes capacités (10 t, 5 t, 3 t), cette station est fondamentale pour assurer les opérations de production de sirop et de nettoyage au sein de l'usine (Clean In Place –CIP-).

La combustion du mazout dans les chaudières produit une flamme qui réchauffe l'eau de la citerne. La vapeur chaude générée est ensuite distribuée vers diverses utilités via des canalisations. L'eau à réchauffer passe d'abord par un dégazeur pour éliminer l'oxygène et prévenir l'oxydation.

### A.4.5 Station de froid industrielle

Le processus de cette station utilise du  $\text{NH}_3$  (ammoniac), le cycle commence par la compression du  $\text{NH}_3$  augmentant ainsi sa pression et sa température. Ensuite, le  $\text{NH}_3$  est dirigé vers un condensateur où il se transforme en liquide. Il passe ensuite par une valve de détente, où sa pression chute de 13 bars ( $36^\circ\text{C}$ ) à 3 bars ( $1^\circ\text{C}$ ). Il est ensuite acheminé vers un décanteur où il se sépare des impuretés par gravité. Le  $\text{NH}_3$  liquide entre alors dans un échangeur de chaleur pour s'évaporer.

Ce cycle de réfrigération recommence ainsi, assurant une production de froid continue et efficace.

# Annexe B

## Table thermodynamique

## Annexe B. Table thermodynamique

Table Thermodynamique R 744 (CO <sub>2</sub> )							
	Liquide	Liquide	Vapeur	Liquide	Vapeur	Liquide	Vapeur
Temperature	Pression	Densité	Densité	Enthalpie	Enthalpie	Entropie	Entropie
(°C)	(bar abs)	(Kg/M <sup>3</sup> )	(Kg/M <sup>3</sup> )	(KJ/Kg)	(KJ/Kg)	(KJ/Kg-K)	(KJ/Kg-K)
-50	6.8234	1154.6	17.925	92.943	432.68	0.57939	2.1018
-49	7.1049	1150.8	18.638	94.922	432.99	0.58813	2.0963
-48	7.3949	1147.1	19.373	96.905	433.29	0.59684	2.0909
-47	7.6937	1143.4	20.131	98.891	433.58	0.60553	2.0855
-46	8.0015	1139.6	20.912	100.88	433.86	0.61418	2.0801
-45	8.3184	1135.8	21.717	102.87	434.13	0.62282	2.0747
-44	8.6445	1132	22.547	104.87	434.39	0.63143	2.0694
-43	8.98	1128.1	23.401	106.87	434.64	0.64001	2.0642
-42	9.3252	1124.2	24.281	108.88	434.88	0.64858	2.0589
-41	9.6801	1120.3	25.187	110.89	435.11	0.65712	2.0537
-40	10.045	1116.4	26.121	112.9	435.32	0.66564	2.0485
-39	10.42	1112.5	27.082	114.92	435.53	0.67413	2.0434
-38	10.805	1108.5	28.071	116.95	435.72	0.68261	2.0382
-37	11.201	1104.5	29.089	118.98	435.9	0.69107	2.0331
-36	11.607	1100.5	30.137	121.01	436.07	0.69951	2.0281
-35	12.024	1096.4	31.216	123.05	436.23	0.70794	2.023
-34	12.452	1092.4	32.326	125.1	436.37	0.71634	2.018
-33	12.891	1088.3	33.469	127.15	436.51	0.72474	2.0129
-32	13.342	1084.1	34.644	129.2	436.62	0.73311	2.0079
-31	13.804	1079.9	35.854	131.27	436.73	0.74148	2.0029
-30	14.278	1075.7	37.098	133.34	436.82	0.74982	1.998
-29	14.763	1071.5	38.378	135.41	436.9	0.75816	1.993
-28	15.261	1067.2	39.696	137.5	436.96	0.76649	1.988
-27	15.77	1062.9	41.051	139.59	437.01	0.77481	1.9831
-26	16.293	1058.6	42.445	141.69	437.04	0.78311	1.9781
-25	16.827	1054.2	43.88	143.79	437.06	0.79141	1.9732
-24	17.375	1049.8	45.356	145.91	437.06	0.79971	1.9683
-23	17.935	1045.3	46.875	148.03	437.04	0.80799	1.9633
-22	18.509	1040.8	48.437	150.16	437.01	0.81627	1.9584
-21	19.096	1036.3	50.045	152.3	436.96	0.82455	1.9535
-20	19.696	1031.7	51.7	154.45	436.89	0.83283	1.9485
-19	20.31	1027	53.402	156.61	436.81	0.8411	1.9436
-18	20.938	1022.3	55.155	158.77	436.7	0.84937	1.9386
-17	21.581	1017.6	56.959	160.95	436.58	0.85765	1.9337
-16	22.237	1012.8	58.816	163.14	436.44	0.86593	1.9287
-15	22.908	1008	60.728	165.34	436.27	0.87421	1.9237
-14	23.593	1003.1	62.697	167.55	436.09	0.88249	1.9187
-13	24.294	998.14	64.725	169.78	435.89	0.89078	1.9137
-12	25.01	993.13	66.814	172.01	435.66	0.89908	1.9086
-11	25.74	988.06	68.967	174.26	435.41	0.90739	1.9036
-10	26.487	982.93	71.185	176.52	435.14	0.91571	1.8985
-9	27.249	977.73	73.471	178.8	434.84	0.92405	1.8934