

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département Génie des Procédés et de l'Environnement.

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Optimisation des ratios énergie EUR (Energy Used Ratio) et eau
WUR (Water Used Ratio) de l'usine Fruital/ Coca-Cola en vue de
réduire les impacts environnementaux de la chaîne de production.**

Présenté par :

TAGNIT HAMMOU Lisa

Sous la direction de :

M. Kamal BITAM (ECCBC)

M. Elias BENAMIRA (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (08/07/2023) devant le jury composé de :

Président	Mr Nabil MAMERI	Professeur	ENP
Encadrant	Mr Elias BENAMIRA	MCA	ENP
Co-encadrant	Mr Kamal BITAM	Ingénieur en maintenace	ECCBC
Examineur	Mr Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département Génie des Procédés et de l'Environnement.

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Optimisation des ratios énergie EUR (Energy Used Ratio) et eau
WUR (Water Used Ratio) de l'usine Fruital/ Coca-Cola en vue de
réduire les impacts environnementaux de la chaîne de production.**

Présenté par :

TAGNIT HAMMOU Lisa

Sous la direction de :

M. Kamal BITAM (ECCBC)

M. Elias BENAMIRA (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (08/07/2023) devant le jury composé de :

Président	Mr Nabil MAMERI	Professeur	ENP
Encadrant	Mr Elias BENAMIRA	MCA	ENP
Co-encadrant	Mr Kamal BITAM	Ingénieur en maintenace	ECCBC
Examineur	Mr Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP

ملخص :

يندرج هذا العمل ضمن إطار تحسين كفاءة الطاقة وتحسين استهلاك الماء في مصنع فروينال كوكاكولا. ومن أجل تحقيق مكاسب طاقة هامة، تم إيلاء اهتمام خاص لإنتاج البخار من خلال البحث عن المعلمات التشغيلية الأمثل للمرجل. تستند هذه المعلمات إلى تحليل متعمق للمبادئ الحرارية، بهدف تقليل استهلاك الغاز الطبيعي مع مراعاة القيود الخاصة للموقع الصناعي. بعد ذلك، تم إيلاء اهتمام خاص لتقليل استهلاك الماء من خلال استكشاف إمكانية استرداد جزء من ناتج العوازل الموجودة في موقع المصنع، دون أن يتسبب ذلك في حدوث تكاثف غير مرغوب فيه. تهدف هذه النهج إلى تحقيق أقصى استخدام فعال للماء مع الحفاظ على المعايير الجودة المطلوبة.

الكلمات الدالة :

تحسين، طاقة، حراري، غلاية صناعية، بخار، ماء، تناضح عكسي، بيئة.

Absract :

This work is part of the energy optimization and improvement of water consumption at the Fruital COCA-COLA factory. In order to achieve significant energy savings, special attention has been given to steam production by seeking optimal operating parameters for the boiler. These parameters are based on a thorough analysis of thermodynamic principles, aiming to minimize natural gas consumption while considering specific constraints of the industrial site.

Subsequently, particular attention has been paid to reducing water consumption by exploring the possibility of recovering a portion of the reject water from the osmosis units on the factory site, without causing undesirable precipitation. This approach aims to maximize efficient water use while maintaining the required quality standards.

Key words :

Optimization, energy, thermodynamic, boiler, steam, water, reverse osmosis, environment

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'optimisation énergétique et de l'amélioration de la consommation d'eau de l'usine de Fruital COCA-COLA. Afin de réaliser des gains d'énergie significatifs, une attention particulière a été portée à la production de vapeur en recherchant les paramètres de fonctionnement optimaux de la chaudière. Ces paramètres reposent sur une analyse approfondie des principes thermodynamiques, visant à minimiser la consommation de gaz naturel tout en tenant compte des contraintes spécifiques du site industriel. Par la suite, une attention particulière a été accordée à la réduction de la consommation d'eau en explorant la possibilité de récupérer une partie des rejets des osmoseurs présents sur le site de l'usine, sans causer de précipitation indésirable. Cette approche vise à maximiser l'utilisation efficace de l'eau, tout en maintenant les normes de qualité requises.

Mots clés :

Optimisation, énergie, thermodynamique, chaudière, vapeur, eau, osmose inverse, environnement.

Dédicace

“

Je dédie ce travail

*À mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur dévouement et leur soutien tout au long de mes études.*

À mes chers frères et sœurs Ghilen & Myriem.

*À la mémoire de ma grand-mère, que Dieu l'accueille dans son
vaste paradis.*

*À mes amis et toutes les personnes qui m'ont aidé pour
arriver où j'en suis aujourd'hui.*

”

- Lisa

Remerciements

Je tenais à remercier Allah le tout-puissant de m'avoir donné la foi, la force, et la patience pour réaliser ce travail.

Je remercie mes chers parents, mes frères et sœurs, ma famille qui a rempli ma vie de joie, de motivation et d'amour.

Je remercie aussi Mr Elias BENAMIRA et Mr Kamal BITAM pour m'avoir encadré et soutenu au long de mon projet ainsi qu'aux membres du jury Mr Abdelmalek CHERGUI et Mr Nabil MAMERI qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Je remercie toute l'équipe de Fruital COCA COLA pour leur accueil et leur aide.

Je remercie plus particulièrement Mr Mohamed BOUBAKEUR, Mr Hocine BENNOUR, Mme Melissa BENAMROUCHE, Mohamed Kadi et Abderraouf KALEM pour leurs précieuses aides.

Je tenais à remercier, surtout, nos collègues, ceux que nous avons croisés durant notre parcours d'études, qui nous ont donné le sentiment d'appartenance, qui nous ont offert de l'aide, du soutien, ou juste du sourire.

Enfin, je remercie toute personne ayant cru en nous, ayant contribué de près ou de loin, avec beaucoup ou avec peu, à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des abréviations

Nomenclature

Introduction générale	11
1 Contexte	12
1.1 Introduction	13
1.2 Histoire de la boisson COCA-COLA	13
1.3 Présentation de l'entreprise Fruital COCA-COLA	13
1.3.1 Structure organisationnelle	14
1.4 Présentation des utilités	15
1.4.1 Station du dioxyde de carbone	15
1.4.2 Chaudière	16
1.4.3 Station de frigorifique	16
1.4.4 Compresseur d'air	16
1.4.5 Traitement des eaux	16
1.4.6 Siroperie	17
1.4.7 Ligne de production	17
1.5 Bilan consommation énergétique de l'usine	18
1.6 Coûts annuels de l'énergie	18
1.7 Conclusion	19
2 Optimisation de la consommation énergétique	20
2.1 Introduction	21
2.2 Partie théorique	21
2.2.1 Généralités sur les chaudières	21
2.2.2 La combustion	23
2.2.3 Bilan thermique	25
2.2.4 L'alimentation en eau	28
2.3 Description des installations présentes sur le site	30
2.3.1 Générateur de vapeur	30
2.3.2 Combustible	32
2.3.3 L'eau d'alimentation	32
2.4 Méthodologie suivie	33
2.4.1 Objectif	33
2.4.2 Contraintes prises en considération	34
2.4.3 Élément d'optimisation	34
2.5 Résultats et interprétation	34
2.5.1 Débit de vapeur à produire	34
2.5.2 Débit de gaz consommé	35

2.5.3	État actuel	40
2.6	Conclusion	40
2.7	Perspectives	41
3	Amélioration du ratio consommation d'eau	42
3.1	Introduction	43
3.2	Partie théorique	43
3.2.1	Situation en Algérie	43
3.2.2	Composition chimique de l'eau	44
3.2.3	Classification des eaux naturelles	44
3.2.4	Le dessalement des eaux	45
3.2.5	La déminéralisation des eaux	45
3.2.6	L'osmose inverse	46
3.3	Description des installations présentes sur le site	49
3.3.1	Processus de traitement	49
3.3.2	Les membranes utilisées	49
3.3.3	Qualité de l'eau	50
3.4	Méthodologie suivie	50
3.4.1	Objectif fixé	50
3.4.2	Matériel et méthode	51
3.5	Résultats et interprétations	52
3.5.1	Volume récupéré	52
3.5.2	Interprétation	52
3.6	Conclusion	52
	Conclusion générale	53
	Bibliographie	56
	Annexe	63

Liste des tableaux

1.1	Évolution de la consommation énergétique	18
2.1	La composition des combustibles	24
2.2	Fiche technique de la chaudière GX 6 000	30
2.3	Fiche technique de la chaudière GX 3 000	31
2.4	Fiche technique de la chaudière GX 2 200	31
2.5	Présentation de mesures des chaudières	32
2.6	Composition du gaz naturel	32
2.7	Consigne sur l'eau d'alimentation	33
2.8	Représentation du besoin théorique de l'entreprise	33
2.9	Tables thermodynamiques des enthalpies	34
2.10	Résultats des débit	35
2.11	Débits d'air et de gaz naturel suivant le régime de fonctionnement	35
2.12	Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 6 000	38
2.13	Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 3 000	38
2.14	Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 2 200	38
2.15	Température des flammes de chaque chaudière	40
2.16	Représentation du gain	40
3.1	Classification des eaux naturelles selon la salinité	45
3.2	Comparaison des membranes d'osmose inverse	47
3.3	Caractéristiques techniques des membranes	50
3.4	Analyse de l'eau	50
3.5	Résultats des expériences	52

Table des figures

1.1	La structure organisationnelle de FRUITAL COCA COLA	15
1.2	Ventilation des coûts par type d'énergie	19
2.1	Représentation graphique de la formation de la vapeur	23
2.2	Schéma de la combustion	23
2.3	Représentation graphique du bilan thermique	26
2.4	Schéma d'un dégazeur physique	29
2.5	Illustration du modèle GX	30
2.6	Illustration de L'ECOM J2KN PRO	32
2.7	Représentation graphique des débits d'air et de gaz naturel dans le foyer de chaque chaudière	37
3.1	L'osmose et l'osmose inverse [1]	46
3.2	Illustration de la membrane [2]	49
3.3	Schéma de la membrane [2]	49
3.4	Schéma simplifié de l'objectif choisi	50
3.5	Mesure de la conductivité	51
3.6	Échantillon avant apparition de sels	51
3.7	Échantillon après apparition de sels	51
8	Schéma détaillé de l'installation d'une chaudière [3]	57
9	Calculs de la température de combustion	59
10	Calculs de la température de combustion	60
11	Calculs de la température de combustion	61
12	Evolution de l'enthalpie des produits des différentes chaudières en fonction de la température	62
13	Processus de traitement des eaux	63

Liste des abréviations

OI	Osmose Inverse
TFM	Thin Film Membrane
TDS	Total Dissolved Solids
<i>GN</i>	Gaz Naturel
<i>PCI</i>	Pouvoir Calorifique Inférieur
PET	polyéthylène téréphtalate
ECCBC	Equatorial COCA COLA Bottling company
CTP	Clean In Place

Nomenclature

α	Coefficient d'excès d'air (%)
$\Delta\bar{h}$	Variation d'enthalpie (kcal/kg)
$\Delta_f\bar{h}^0$	Enthalpie standard de formation (kcal/kg)
\dot{m}_i	Débit des différents gaz constituant les fumées (mole)
\dot{m}_{air}	Débit d'air (kg/h)
\dot{m}_c	Débit du combustible (kg/h)
\dot{m}_{Total}	Débit d'air total
\dot{m}_v	Débit massique de la vapeur (kg/h)
η	Rendement (%)
h_f	Chaleur sensible (kcal/kg)
h_g	Chaleur de vaporisation (kcal/kg)
H_P	Enthalpie des produits (kcal/kg)
H_R	Enthalpie des réactifs (kcal/kg)
h_{el}	Enthalpie de l'eau à l'entrée de chaudière (kcal/kg)
h_{fg}	Chaleur latente (kcal/kg)
h_{sv}	Enthalpie de la vapeur en sortie de chaudière (kcal/kg)
N_P	nombre de moles du produit (mole)
N_R	nombre de moles du réactif (mole)
Q_1	Perte par les fumées (kcal/h)
Q_2	Perte causée par l'humidité (kcal/h)
Q_3	Perte de chaleur par rayonnement ou convection (kcal/h)
Q_4	Perte par la purge de concentration (kcal/h)
Q_5	Pertes non comptabilisées (kcal/h)
$Q_{combustible}$	Quantité de chaleur fournie par le combustible (kcal/h)
Q_{vapeur}	Quantité de chaleur fournie par la vapeur (kcal/h)
T	Température K
yCO_2	Fraction molaire du CO_2
yH_2O	Fraction molaire du H_2O
yN_2	Fraction molaire du N_2
yO_2	Fraction molaire du O_2

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle, l'homme n'a point cessé de redoubler d'ingéniosité pour répondre aux exigences toujours plus élevées de production et de consommation de biens de qualité. Cet objectif a été atteint grâce à l'amélioration constante des outils et des techniques de production. Au fil du temps, ces derniers ont évolué pour se retrouver sous forme d'utilité, et sont devenus l'épine dorsale de toute industrie en tant que fournisseurs d'énergie vitale pour l'ensemble du processus productif.

Cependant, l'urgence climatique et l'impact environnemental considérable de leur utilisation, en particulier leur consommation d'énergie, exigent une optimisation urgente de leur fonctionnement afin de réduire au maximum leur empreinte écologique. Il est donc impératif pour les entreprises de prendre en compte cette problématique cruciale et de contribuer ainsi au bien-être de tous en protégeant notre planète.

C'est là que le génie des procédés émerge comme l'une des disciplines les plus performantes pour optimiser les processus industriels. Le génie des procédés consiste en l'application de principes scientifiques et d'outils techniques avancés afin de concevoir, modéliser, analyser, contrôler et améliorer les opérations industrielles. Cette approche offre une combinaison remarquable d'efficacité et de faisabilité. En effet, elle permet d'agir sur les propriétés et les caractéristiques de chaque composant d'un système industriel, offrant ainsi des solutions sur mesure pour maximiser les performances opérationnelles et minimiser l'impact environnemental.

Le texte décrit le processus de l'étude qui sera entreprise. Il s'agit de comprendre le fonctionnement de deux éléments spécifiques (une chaudière et un traitement des eaux) qui ont été choisis au préalable. Le but est de détecter les paramètres de ces éléments qui pourraient être améliorés. En fin de compte, l'objectif est de fournir le paramètre optimal qui répondra le mieux aux exigences spécifiques.

Cependant, avant de plonger dans les détails de l'étude elle-même, il est considéré comme impératif de faire une introduction succincte de l'entreprise qui sera étudiée. Cette introduction devra mettre en lumière les aspects organisationnels et de consommation de l'entreprise. Cette présentation de l'entreprise est essentielle pour comprendre pleinement la pertinence de l'étude et la manière dont les processus d'utilités (chaudière et traitement des eaux) interviennent dans son fonctionnement.

Chapitre 1

Contexte

1.1 Introduction

Depuis plusieurs années, la boisson gazeuse a acquis une place prépondérante dans la consommation de chacune, quelles que soient leurs origines culturelles.

Les différentes compagnies agroalimentaires rivalisent d'innovation et déploient des moyens toujours plus imposants pour proposer des goûts toujours plus rafraichissants et une mise en valeur de leurs produits toujours plus attractifs. Malgré une concurrence féroce tant au niveau national qu'international, force est de constater qu'une boisson s'est solidement installée au sommet du podium : Coca-Cola.

1.2 Histoire de la boisson COCA-COLA

L'histoire de Coca Cola commence en Géorgie, à Atlanta, en 1886. Dans son laboratoire, John Stith Pemberton, cherche de nouvelles boissons lui permettant de gagner facilement de l'argent. Il a compris, en 1885, qu'il fallait créer un soda du nouveau type. En effet, le 25 novembre 1885, le maire d'Atlanta organise un référendum sur la question de l'interdiction de l'alcool dans la ville.

Atlanta devient une ville « sèche » pour une période d'essai de deux ans, durant lesquels la vente d'alcool est interdite. Ainsi, l'enjeu pour John Pemberton sera d'offrir une boisson sans alcool, tranchant avec les orangeades et procurant les effets du bourbon. Pemberton va développer une version sans alcool de sa boisson. En revanche, toujours avec la coca, son principal ingrédient actif, qui subsistera dans la recette jusqu'à la fin du 19e siècle.

Le 8 mai 1886, le docteur met en vente une boisson révolutionnaire, à base de sirop de cola diluée avec de l'eau gazeuse. Avec la prohibition de l'alcool en vigueur à Atlanta, le succès de cette nouvelle boisson couleur caramel est immédiate

1.3 Présentation de l'entreprise Fruitale COCA-COLA

La société FRUITAL Coca-Cola a été créée en 1993, spécialisée dans la fabrication de boissons gazeuses non alcoolisées et devient ainsi le leader du marché avec 50 % sur sa franchise. Fruitale produit et commercialise plus de 62 références sous tutelle Fruitale Coca-Cola et 57 références sous la marque Coca-Cola : COCACOLA, FANTA, SPRITE, BURN, SCHWEPPE, VIMTO...

Le 15 Mars 2006, le groupe espagnol ECCBC (Equatorial Coca-Cola Bottling Company) entre dans l'actionnariat de la société Fruitale SPA et rachète 92 % de ses actions pour qu'elle devienne l'un des embouteilleurs et distributeurs de coca-cola en Algérie, (le plus important des trois embouteilleurs et distributeurs). Elle importe des concentrés mis au point par The Cola Company et assure la commercialisation et la distribution à travers ses canaux de distribution modernes permettant de satisfaire les demandes de tous les clients et consommateurs.

Son réseau couvre toute la partie centrale du territoire national. Les régions Est et Ouest sont couvertes par d'autres groupes. Ainsi, Fruitale opère dans 13 wilayas dont : Alger, Blida, Boumerdes, Tizi-Ouzou, Tipaza, Médéa, Ain Defla, Bouira, BBA, Laghouat, Djelfa, Ghardaïa, Tamanrasset.

En juillet 2022, ECCBC a fusionné son activité de boissons non alcoolisées avec le groupe Castel pour créer un leader du marché unifié, opérant comme une seule entreprise dans le pays et étant ECCBC le partenaire majoritaire.

ECCBC Algérie possède trois usines de production, dont une à Alger et deux autres entre Skikda et Oran. L'effectif global est d'environ 2000 employés répartis entre les trois sites.

1.3.1 Structure organisationnelle

Le schéma d'organisation présenté ci-dessous a été conçu pour gérer efficacement les différentes fonctions de Fruital COCA-COLA. Les missions correspondantes sont également résumées ci-dessous :

- **Direction Générale** : Elle chapeaute les principales directions qui pilotent et assurent le bon fonctionnement de l'entreprise représentée par un directeur général.
- **Direction Commerciale** : Elle s'occupe de la commercialisation et la promotion des produits de Fruital SPA en déterminant les plans d'action pour la maximisation du CA ainsi que les prévisions des volumes de vente à réaliser sur le marché.
- **Direction des Ressources Humaines** : Elle est chargée de la gestion du personnel du Fruital Coca-Cola en plus de la rémunération, le recrutement, la formation et l'administration).
- **Direction Finance et Contrôle de Gestion** : Sa mission principale est d'optimiser la gestion de sources capitales et la maîtrise des risques ainsi que la préparation des prévisions budgétaires et la fixation des objectifs. La préparation du budget se fait en collaboration avec les contrôleurs de gestion. L'amélioration de la performance de l'entreprise à travers les TDB.
- **Direction Qualité** : Dans l'agroalimentaire, il existe beaucoup de normes et d'obligations légales liées à la sécurité alimentaire. La direction Qualité est chargée de vérifier et de conduire la conformité des processus industriels au regard de ces normes et des contraintes réglementaires en vigueur. Cela permet de garantir la qualité et la conformité des produits.
- **Direction Industrielle** : Direction où j'ai pu effectuer ce stage. Elle est chargée de la mise en œuvre de la fabrication des produits en répondant aux objectifs planifiés et assumant la responsabilité des opérations de production et de maintenance.

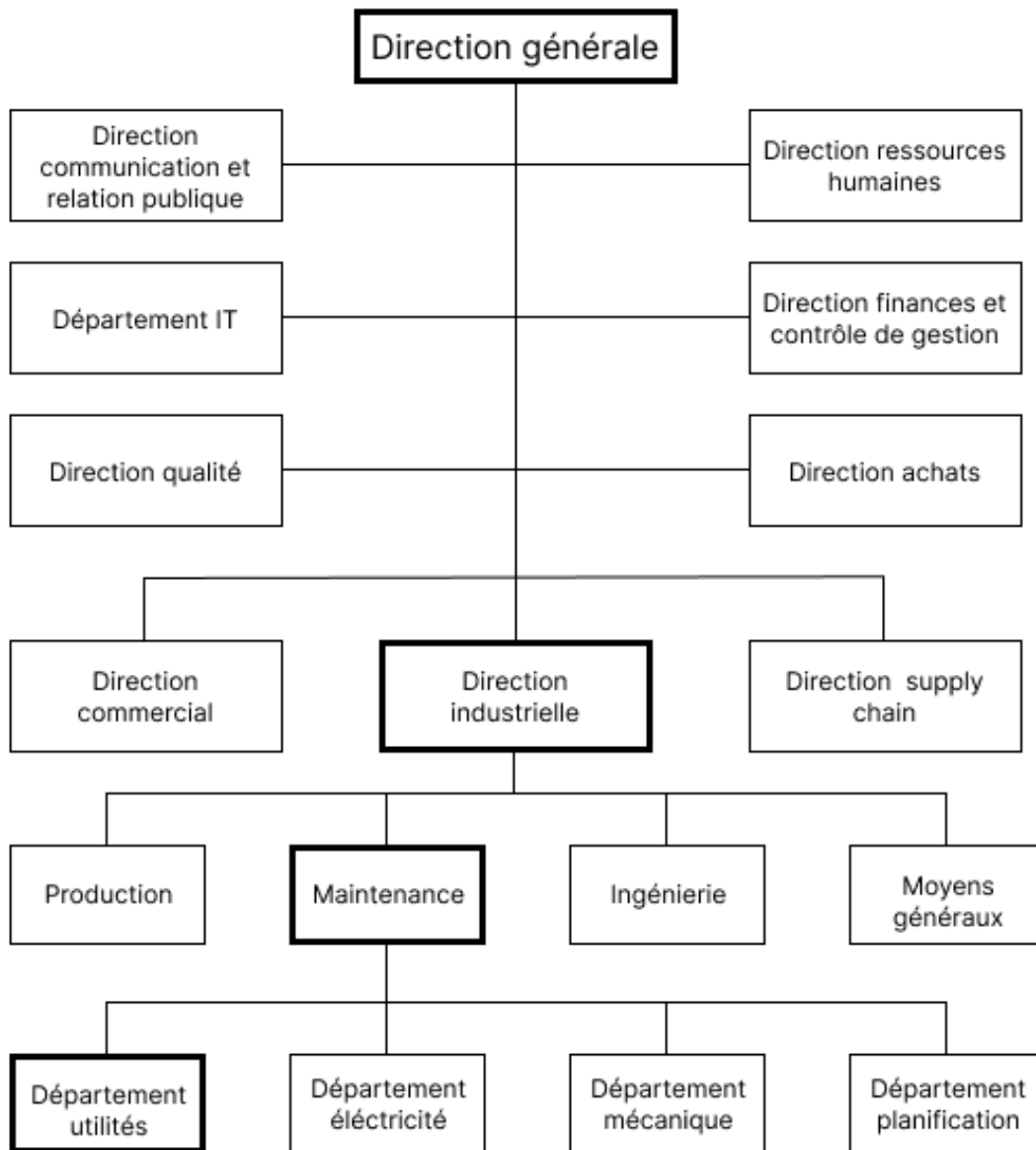


FIGURE 1.1 – La structure organisationnelle de FRUITAL COCA COLA

1.4 Présentation des utilités

Nous allons détailler les différentes utilités présentes sur l’usine, qui toutes participent directement ou indirectement au processus de fabrication et production des boissons gazeuses.

1.4.1 Station du dioxyde de carbone

Objectif : L’ajout du CO_2 à la boisson nous permet de générer une émulsion lors de son ouverture.

Process : On stock d’abord le CO_2 sous-forme liquide dans des cuves isothermes ($-30^{\circ}C$), puis transformer en gaz, on retrouve trois méthodes différentes du stockage du gaz :

- **Atmosphérique** : L’échangeur, où est contenu le CO_2 , est exposé à température ambiante. En raison de la différence de température, un échangeur de chaleur se produit, et donc le CO_2 passe de la phase liquide à la phase gazeuse.
- **Carbovapeur** : On chauffe notre liquide stocké dans des tanks, grâce à la vapeur produite par les chaudières.

- **Électrique** : Cette méthode nous permet de chauffer notre liquide grâce aux résistances contenue dans une installation électrique

1.4.2 Chaudière

Objectif : Ces machines nous permettent de produire de la vapeur d'eau, dans le but de :

- Dissoudre le sucre pour qu'il devienne du sirop.
- Chauffer les bains dans lesquels les verres sont lavés.
- CTP (Clean In Place), chauffer de la soude pour nettoyer les conduites lors de la production de différentes boissons.

Process : On retrouve trois chaudières de différents poids (10 t, 5 t, 3 t), ou l'eau déjà chaude est chauffée à haute température. Ensuite, ces vapeurs sont collectés dans des tuyaux pour être envoyés vers les différentes utilités.

On retrouve également un dégazage de l'eau en premier lieu, pour éviter son oxydation.

1.4.3 Station de frigorifique

Objectif : Produire du froid nous sert à refroidir la boisson dans le but de stabiliser cette dernière (n'entraînant aucune réaction chimique à l'intérieur de la boisson).

Process : On réussit à produire du froid grâce à du NH_3 qui est stocké dans un compresseur sous forme gazeuse, plusieurs étapes se succèdent pour satisfaire notre besoin, qui est :

- D'abord, le NH_3 subit un changement d'état vers le liquide grâce à un condensateur pour être stocker dans un compresseur haute pression (HP).
- Ensuite, une détente se produit ou le NH_3 passe de 13 bar (36 °C) à trois bar (1 °C) pour arriver au compresseur basse pression (BP).
- Par la suite, il est acheminé vers un décanteur ou le liquide, par effet de gravité, passe vers l'échangeur de chaleur.
- Enfin, le NH_3 refroidie de l'eau chaude par conduction à contre-courant.

NB : On note la présence de trois installations de froid, identique sauf pour le condenseur qui est à piston, les autres sont à vis.

1.4.4 Compresseur d'air

Objectif : Les bouteilles en plastiques sont présentes sous forme de préforme, qui prennent la forme souhaitée à l'intérieur de moule en y insufflant de l'air comprimé.

Process : De l'air est aspiré par des compresseurs à plusieurs étages, ces derniers sont constitués de cylindres à pression croissante, passant de 3 bar à 36 bar.

1.4.5 Traitement des eaux

Objectif : Un traitement des eaux de forage est primordial pour assurer la qualité de l'eau, et éviter d'impacter négativement les machines.

Process : L'eau passe par plusieurs traitements physico-chimiques, ci-dessus un schéma simplifié des différentes installations.

1.4.6 Siroperie

Objectif : Préparation du sirop pour la boisson

Process : La préparation se fait sur 2 étapes :

- **Sirop initiale** : L'eau et le sucre sont fondus à une température de 65 °C pour avoir une solution de 61.5 g/l, il est ensuite filtré de ses impuretés, pour être refroidie grâce à un échangeur et passer à température ambiante avec de l'eau glacée (4 °C – 10 °C). Enfin, ce sirop est stocké dans des cuves.
- **Sirop final** : on ajoute au sirop initial une liste d'ingrédients (solide et/ou liquide), le brix (Le degré Brix correspond à la quantité de sucre (en g) dissous dans 100 g de sirop.) final du sirop peut être régulé, mais pas celui de la boisson.

1.4.7 Ligne de production

L'usine de Fruital possède 7 lignes de production, toutes distincts en termes de quantité ou de qualité produite, plus précisément, on retrouve :

Ligne bouteille de PET :

On retrouve 5 lignes destinées à produire des lignes en polyéthylène téréphtalate (PET), chacune ayant une vitesse de production différente, toutefois le processus de fabrication demeure le même pour chaque ligne :

- **Souffleuse** : où les préformes PET (matière première) sont chauffées dans un four électrique puis soufflées pour devenir des bouteilles
- **Soutireuse** : la boisson est préparée avec le sirop provenant de la siroperie avec une incorporation du CO_2 ; les bouteilles reçues de la souffleuse sont remplies
- **Fardeuse** : les bouteilles sont mises en fardeaux (en fonction du format par 8, 6, 12 ou 24) et consolidées avec un film transparent qui est chauffé dans un four électrique.
- **Palettiseur** : c'est là où est constituée la palette avec les fardeaux en fonction d'un schéma de palettisation prédéfini.
- **Banderoleuse** : la palette constituée des fardeaux est filmée sur tout le long.

Les lignes de PET représentent plus de 80 % de la production (% en litres de boisson produite).

Ligne bouteille de cannette :

Les boîtes vides sont reçues, remplies, puis transférer vers un réchauffeur (chauffé à la vapeur) pour éliminer la condensation, puis mises en fardeau et palette comme c'est le cas pour les PET.

Celle-ci représente environ 10 % de la production avec une seule ligne.

Ligne bouteille de verre :

- **Dépalettiseur** : Les caisses de bouteilles de verre sont d'abord séparées, passent par un dépalettiseur.
- **Décaissage** : on sépare ici les bouteilles des caisses
- **Laveuse** : Les caisses sont lavées à l'eau, et les bouteilles passent par trois bains de différentes température et concentration en NaOH. On ajoute du chlore pour rincer la soude à la fin.

- **Inspectrice** : On inspecte certains paramètres de qualité de la bouteille (présence de corps étranger, type de bouteille, présence de fractures).
- **Soutireuse** : La boisson est remplie
- **Bouchonneuse** : Les bouteilles préalablement remplies sont fermées avec des bouchons.
- **Palettiseur** : c'est là où est constituée la palette avec les fardeaux en fonction d'un schéma de palettisation prédéfini.
- **Banderoleuse** : la palette constituée des fardeaux est filmée sur tout le long.

Cette dernière représente environ 5 % de la production avec une seule ligne.

1.5 Bilan consommation énergétique de l'usine

La consommation énergétique en gaz naturel et en électricité moyenne du site Fruitall s'élève à 3000 Tep/a. La consommation énergétique au cours des trois dernières années a connu une diminution importante de l'ordre de 9% en 2020 par rapport à l'année de base 2018, comme montré sur le tableau ci-dessous.

TABLE 1.1 – Évolution de la consommation énergétique

	unité	2018	2019	2020
Electricité	(kWh)	20 462 555,00	22 073 163,00	23 083 948,00
	(Tep)	1 759.78	1 898.29	1 985.22
Gaz naturel	(thermie)	16041072.69	13244250.98	10056627.96
	(Tep)	1 379.53	1 139.01	864.87

1.6 Coûts annuels de l'énergie

Le montant de la dépense énergétique annuel d'achat d'électricité a augmenté de 8 % au cours des trois dernières années, tandis que celui du Gaz Naturel a diminué sensiblement de 25 %.

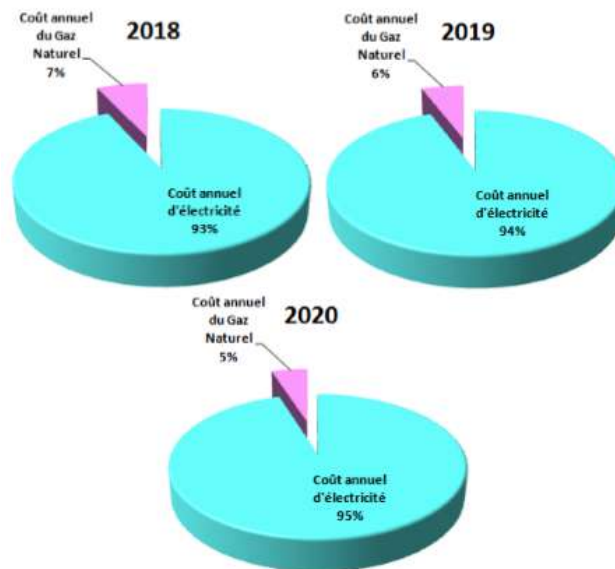


FIGURE 1.2 – Ventilation des coûts par type d'énergie

1.7 Conclusion

En analysant l'évolution de la consommation énergétique au sein de l'entreprise, nous constatons une baisse significative de - 25 % en GN. C'est alors dans cette optique que notre étude se concentre sur la réduction de la consommation du gaz naturel pour continuer sur la même lignée, déjà commencée par l'entreprise. Par ailleurs, compte tenu de l'importance et de la rareté des ressources en eau, la gestion de celles-ci représente un projet d'envergure au sein de l'entreprise. C'est pourquoi une partie de notre étude est spécifiquement dédiée à cette question.

Chapitre 2

Optimisation de la consommation énergétique

2.1 Introduction

L'industrie utilise couramment la vapeur comme énergie nécessaire à la réalisation de nombreux et variés procédés. La vapeur est un fluide caloporteur disponible en grande quantité, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur demande l'utilisation d'un combustible et l'utilisation d'un générateur de vapeur (chaudière).

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi une approche méthodique qui nous a permis d'analyser les différentes composantes du système de production de vapeur de Fruital COCA-COLA. Nous avons pris en compte les contraintes et les objectifs spécifiques liés à l'efficacité énergétique et à la réduction des coûts.

Enfin, nous présenterons une discussion des résultats obtenus à la suite de notre processus d'optimisation. Nous discuterons également des éventuelles limitations ou des domaines nécessitant davantage de recherche pour une optimisation plus poussée du système de production de vapeur. Ce chapitre vise à fournir une base solide de connaissances et d'informations pour comprendre les aspects techniques et pratiques liés à l'utilisation de la vapeur comme source d'énergie dans l'industrie.

2.2 Partie théorique

2.2.1 Généralités sur les chaudières

La chaudière représente un dispositif d'échange thermique unique, ou un ensemble d'échangeurs, qui a été spécialement conçu pour convertir de l'eau en vapeur en utilisant une source de chaleur prédéfinie, dans le but de chauffer le fluide caloporteur à une température précise.

Types de chaudières

La classification des chaudières se fait sur la base de huit critères :

- La gamme de puissance : supérieure ou inférieure à 70 KW,
- Le système d'installation : sol ou mural,
- L'utilisation : domestique, collective, industrielle, centrale,
- Le type de fluide caloporteur : eau, vapeur,
- La construction : à tubes de fumées ou à tubes d'eau,
- Le type de circulation : naturelle, assistée, forcée,
- L'architecture : chaudière à deux passes, à tour, à trois passes,
- La source de chaleur : combustion, récupération, électrique.

La source de chaleur est la classification la plus souvent utilisée en industrie [4]. Cette classification nous permet de distinguer trois types de chaudières :

1. **Chaudières par récupération** : Ce sont généralement des chaudières industrielles sophistiquées. Elles fonctionnent en récupérant la chaleur d'un circuit primaire générateur d'une forte source de chaleur. La source doit être assez forte pour être conduite vers un circuit secondaire. Chaudière de récupération est dans la centrale électrique à cycle combiné, où les gaz d'échappement de la turbine à gaz alimentent la chaudière de récupération pour générer de la vapeur qui alimentera la turbine à vapeur.

2. **Chaudières électriques** : Les chaudières électriques sont des systèmes adaptés tant aux besoins industriels qu'aux besoins domestiques. Il est possible de distinguer trois principes de chauffe électriques : Chaudières électriques à résistances, Chaudières électriques à effet joule, Chaudières électriques ioniques.
3. **Chaudières par combustion** : Il est possible de distinguer deux types de chaudières à combustion : les chaudières à combustion liquides ou gazeux : gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, fioul. - Chaudières à tube foyer traversant et boîte de fumées extérieure. - Chaudières à boîte de fumées immergée. - Chaudière à boîte de fumées refroidie, constituée de tubes d'eau. - Chaudière ambitubulaire.
4. **Chaudières à combustion solides** : à grilles, à lit fluidisé, à charbon pulvérisé.

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des chaudières à vapeur fait appel aux connaissances de thermodynamique et de transfert de chaleur.

Bien que les différents types de chaudières semblent présenter des différences notables dans leur construction, toutes partagent fondamentalement la même structure : une chambre de combustion où la chaleur est directement transmise depuis la flamme par rayonnement, et des passages de gaz de combustion où la chaleur est principalement transmise par convection à l'eau en cours de chauffage.

Dans cette ingénieuse orchestration thermique, les deux tiers du transfert de chaleur s'opèrent au sein même de la chambre de combustion, tandis que le tiers restant s'accomplit dans les méandres des passages de gaz de combustion. Cependant, il convient de souligner que toute chaleur non transférée se perd irrémédiablement, prenant ainsi différentes formes évanescences.

L'enthalpie

L'enthalpie, également appelée contenue thermique, représente la somme totale d'énergie interne et externe d'un fluide ou d'une vapeur, ses changements sont représentés dans la figure 2.1, résultant à la fois de sa pression et de sa température. On la retrouve sous différentes formes :

- **Chaleur sensible** : La chaleur sensible se réfère à la quantité de chaleur qui provoque un changement de température dans une substance sans modifier son état physique. On la désigne sous le nom de "chaleur sensible" car son effet sur le transfert thermique peut être observé par une élévation de la température de l'eau. Lorsque la température initiale de l'eau d'alimentation de la chaudière est plus élevée, la quantité de chaleur sensible requise pour amener l'eau à son point de saturation diminue, notée h_f [5].
- **Chaleur latente** : Il s'agit de la quantité de chaleur nécessaire pour transformer de l'eau à une température et une pression donnée en vapeur à la même température et à la même pression. Elle est exprimée par le symbole h_{fg} et sa valeur n'est pas constante et varie en fonction de la variation de la pression. Celle-ci est disponible dans les tables thermodynamiques. Lorsque la vapeur saturée est chauffée au-delà de son point de saturation, elle devient surchauffée et ne contient plus de gouttelettes d'eau liquide. La surchauffe de la vapeur est réalisée dans des chaudières spécialement conçues, où la vapeur saturée est exposée à un chauffage supplémentaire. Ce chauffage supplémentaire élève la température de la vapeur au-delà de sa température de saturation à une pression donnée [5].
- **Chaleur de vaporisation** : On la retrouve aussi sous le nom de "chaleur latente de condensation". Elle représente la quantité de chaleur ajoutée ou retirée pour assurer un changement de phase entre le liquide et la vapeur, notée h_g [6].

- **Enthalpie standard de formation** : L'enthalpie standard, notée $\Delta_f \bar{h}^0$ de formation d'une substance, est la variation d'enthalpie standard qui se produit lors de la formation du composé à partir de ses éléments constitutifs dans leurs états de référence respectifs. L'état de référence d'un élément représente sa forme la plus stable à une température et une pression spécifiques (généralement 1 bar). Par exemple, à 298 K, l'azote se trouve sous forme d'un gaz composé de molécules de N_2 , le mercure est à l'état liquide, le carbone est sous forme de graphite et l'étain est dans sa forme blanche (métallique) [6].

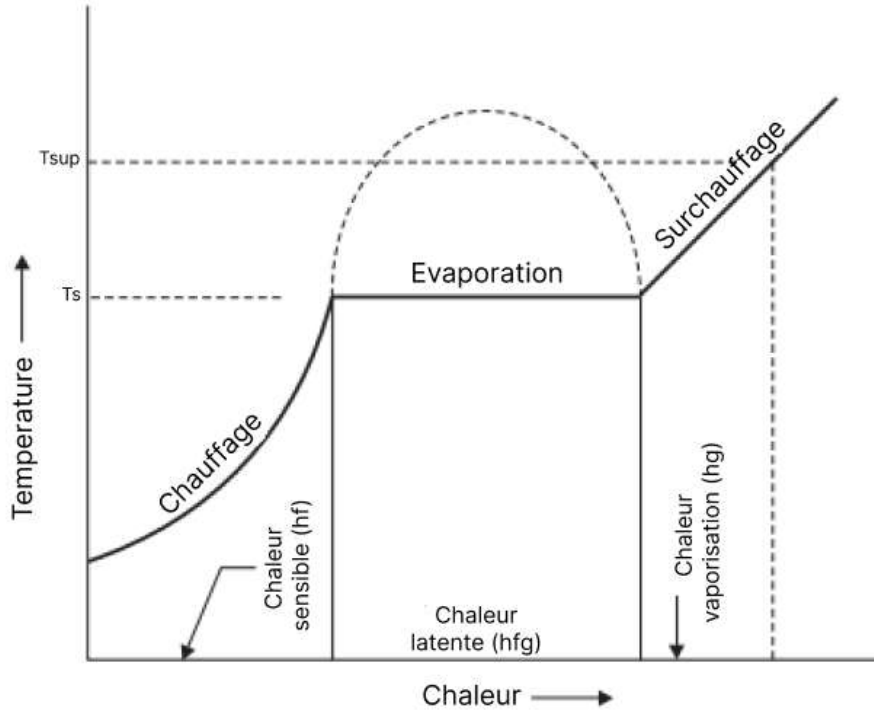


FIGURE 2.1 – Représentation graphique de la formation de la vapeur

2.2.2 La combustion

La combustion est une réaction chimique qui se produit entre deux substances, entraînant la libération de chaleur et de lumière. Elle est caractérisée par une réaction exothermique, connue sous le nom d'oxydation, entre un combustible (solide, liquide ou gaz) et un comburant, généralement de l'oxygène ou de l'air.

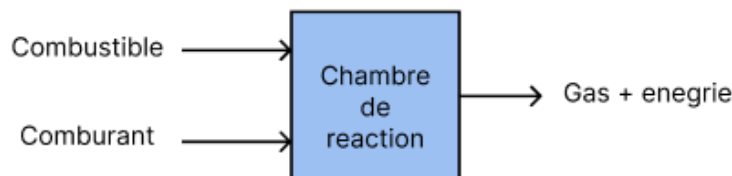


FIGURE 2.2 – Schéma de la combustion

Au cours de la combustion, les liaisons moléculaires du combustible se rompent, puis se reforment avec les molécules du comburant, formant ainsi des molécules plus stables telles que le CO_2 , H_2O , SO_2 et N_2 . Cette réaction nécessite une énergie d'activation, telle qu'une étincelle ou une flamme, pour être initiée.

Caractéristiques des combustibles

La composition chimique : La composition des combustibles communs est donnée dans le tableau suivant :

TABLE 2.1 – La composition des combustibles

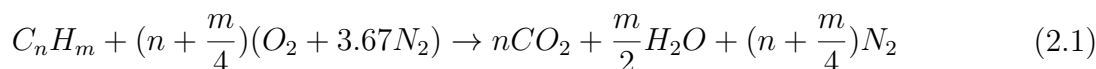
	Combustibles solides	Combustibles liquides	Combustibles Gaz hydrocarbures
Combustibles communs	Charbons, Bois, ...	Essence, gasoil, fiouls, ...	Gaz naturel, butane, propane, gaz de ville, ...
Constituants	C, H_2O , Cendres	C, H_2 , S, O, N	C_nH_m , N_2 , CO_2

Le pouvoir calorifique : Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible (soit 1 kg pour un combustible solide ou liquide ou 1 m^3 - volume mesuré dans les conditions normales - pour les gaz) [7].

Types de combustions

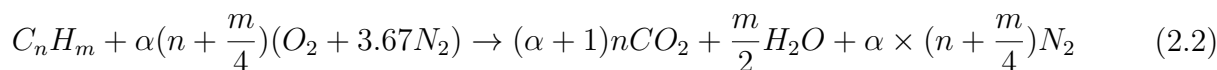
Combustion stœchiométrique : L'air nécessaire au maintien d'une combustion complète de tous les éléments combustibles, tels que le carbone, l'hydrogène et d'autres éléments susceptibles de s'oxyder, est connu sous le nom "d'air théorique", c'est donc de rajouter autant d'air que de combustible mis en jeu. Elle est dite "théorique", car il n'y a que dans un cas idéal qu'une composition stœchiométrique donne une combustion complète. Lorsque la combustion est réalisée avec la quantité d'air théorique, les produits ne contiennent pas d'oxygène. [8]

Considérons la réaction de combustion d'un hydrocarbure C_nH_m avec une quantité d'air théorique :



Combustion en excès d'air : Dans les faits, il est observé que pour atteindre une combustion complète, il est nécessaire de fournir légèrement plus d'air que la quantité théorique, représenté par un symbole α . Ainsi, lorsque l'on parle de 150 % d'air théorique, cela signifie que la quantité d'air réellement fournie est 1.5 fois supérieure à la quantité d'air théorique. [8]

La réaction de combustion devient alors :



Combustion en défaut d'air : Lorsque a quantité d'air fournie pour la combustion d'une unité de combustible est inférieure à la quantité stœchiométrique d'oxygène, cela entraîne la formation de plusieurs gaz polluants tels que le monoxyde de carbone (CO).

Température de combustion

Dans un processus de combustion adiabatique, sans travail ni changement d'énergie cinétique ou potentielle, la température des produits est appelée "température de la flamme adiabatique". Cependant, il est important de souligner les points suivants :

- La température maximale atteinte lors d'une combustion complète adiabatique dépend du type de réaction et du pourcentage d'air théorique fourni. Une augmentation du rapport air-carburant entraîne une diminution de la température maximale.
- Pour un combustible donné, une pression et une température des réactifs donnés, la température maximale de la flamme adiabatique est atteinte avec un mélange stœchiométrique.
- La température adiabatique de la flamme peut être contrôlée en ajustant la quantité d'air excédentaire utilisée.

Ces points soulignent que la température de la flamme adiabatique dépend de plusieurs facteurs, tels que le rapport air-carburant et la quantité d'air excédentaire, qui peuvent être ajustés pour contrôler la température maximale atteinte lors de la combustion adiabatique [9].

La température de cette flamme peut être déterminée suivant le premier principe de la thermodynamique, dont la formule est la suivante :

Enthalpie des réactifs = enthalpie des produits

$$H_R = H_P$$

$$\sum N_R(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h}) = \sum N_P(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h}) \quad (2.3)$$

$$\sum N_R(\bar{h}_f^0 + [\bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{ref}, P_{ref})]) = \sum N_P(\bar{h}_f^0 + [\bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{ref}, P_{ref})]) \quad (2.4)$$

Tel que :

N_R, N_P : représentent le nombre de moles du réactif r et du produit p, respectivement.

\bar{h}_f^0 : Enthalpie de formation standard du composant à partir de ses éléments stables

$\Delta\bar{h}$: Variation d'enthalpie pour le même composant lorsque sa température passe de la valeur standard T_{ref} à la valeur T.

Une fois que les réactifs et leurs états sont spécifiés, il est facile de déterminer l'enthalpie des réactifs, H_R . Cependant, le calcul de l'enthalpie des produits, H_P , n'est pas aussi simple, car la température des produits n'est pas connue avant les calculs. [10]

Par conséquent, afin de déterminer la température adiabatique de la flamme, une technique itérative doit être utilisée, à moins que les équations pour les changements d'enthalpie sensible des produits de combustion ne soient disponibles.

On suppose une température pour les gaz produits, et H_P est déterminée pour cette température. Si elle ne correspond pas à H_R , les calculs sont répétés avec une autre température. En utilisant ces deux résultats, la température adiabatique de la flamme est ensuite déterminée par interpolation. [10]

2.2.3 Bilan thermique

Le calcul d'un bilan thermique d'une chaudière, représenté dans la figure 2.3, consiste à calculer les apports énergétiques transmis à la chaudière. La chaleur utile de la vapeur ou de l'eau surchauffée et enfin les pertes de chaleur de la chaudière qui se résument dans les pertes par les fumées, les pertes par rayonnement et convection et les pertes par les purges.

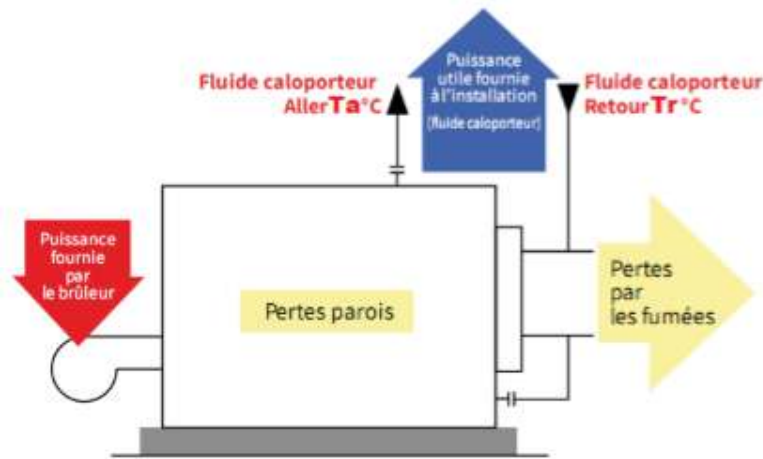


FIGURE 2.3 – Représentation graphique du bilan thermique

L'énergie fournie à la chaudière est composée de :

1. L'énergie apportée par le combustible,
2. L'énergie d'eau d'alimentation,
3. La chaleur sensible de l'air de combustion.

Les pertes dans une chaudière

1. Perte par les fumées Q_1

La chaleur se perd dans les produits de combustion « secs » qui ne propagent que la chaleur sensible étant donnée qu'ils ne subissent aucun changement d'état. Ces produits sont le gaz carbonique (CO_2), le monoxyde de carbone (CO), l'oxygène (O_2), l'azote (N_2) et le dioxyde de soufre (SO_2). En général, le SO_2 et le CO ne figurent que dans des concentrations correspondantes à des parties par million dont on peut ne pas tenir compte, du point de vue perte thermique. La réduction de l'excès d'air au minimum permet de diminuer les pertes de gaz.

2. Perte causée par l'humidité provenant de la combustion d'hydrogène Q_2

L'hydrogène contenu dans le combustible quitte la chaudière sous forme de vapeur d'eau, entraînant l'enthalpie, où la chaleur totale correspond à ses conditions de température et de pression. La pression de la vapeur est très faible, mais sa température est élevée et la plus grande partie de son enthalpie se situe dans la chaleur de vaporisation.

3. Perte de chaleur par rayonnement ou convection Q_3

Cette perte provient des surfaces externes d'une chaudière en marche. La perte est constante pour toute chaudière utilisée à une température de fonctionnement donnée. Exprimée selon le pourcentage du rendement thermique d'une chaudière, la perte augmente à mesure que le rendement diminue. Ainsi, faire fonctionner la chaudière à pleine charge permet de réduire le pourcentage de perte. Comme l'étendue de la surface d'une chaudière se rapporte à son volume, la perte relative d'une grosse chaudière est inférieure à la perte d'une chaudière plus petite (effet d'échelle).

4. Perte par la purge de concentration Q_4

Pour limiter la concentration de sels dans l'eau de la chaudière, une partie de cette eau doit être purgée de façon à réaliser un équilibre dans la concentration en sels dissous. La purge se fait :

- Soit de manière discontinue et donc le taux de purge dépend de l'exploitant.
- Soit de manière continue, le réglage du robinet de purge détermine le taux de purge.

Les pertes par les purges consistent alors dans les pertes de chaleur contenues dans l'eau de purge qui sort à des températures très élevées.

5. Pertes non comptabilisées Q_5

Pour les motifs mentionnés précédemment, utiliser une valeur de perte présumée de 0.1 % pour les chaudières alimentées au gaz naturel et de 0.2 % pour les chaudières alimentées au mazout.

Rendement

Afin de pouvoir calculer les performances d'une chaudière, on peut suivre deux approches :

Méthode directe Dans cette approche, le rendement de la chaudière se calcule comme suit [10] :

$$\eta(\%) = \frac{Q_{vapeur}}{Q_{combustible}} \times 100 = \frac{\dot{m}_v \times (h_{sv} - h_{el})}{\dot{m}_c \times PCI} \times 100 \quad (2.5)$$

Avec :

- \dot{m}_v = débit massique de la vapeur, exprimé en (kg/h).
- \dot{m}_c = débit du combustible mis en jeu, exprimé en (kg/h).
- h_{sv} = enthalpie de la vapeur en sortie de chaudière, exprimé en (kcal/kg).
- h_{el} = enthalpie de l'eau à l'entrée de chaudière, exprimé en (kcal/kg).

Méthode indirecte Dans ce cas, le rendement de la chaudière se calcule en retranchant de l'unité les différentes fractions représentant les pertes :

$$\eta(\%) = 100 - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \quad (2.6)$$

L'évaluation des différentes pertes se base sur l'utilisation de formules empiriques qui ne sont pas toujours disponibles. Bien que cette méthode permette de quantifier les pertes par catégorie et d'identifier les types de pertes qui affectent le rendement et doivent être réduites en priorité, elle fournit une estimation moins précise du rendement par rapport à la méthode directe. Par conséquent, nous choisirons d'utiliser la méthode directe dans la suite de notre étude afin d'obtenir une valeur de rendement plus précise.

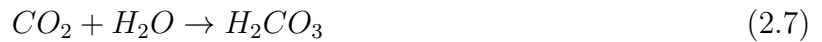
2.2.4 L'alimentation en eau

Généralement, l'eau disponible au niveau des usines est une eau brute qui contient plusieurs impuretés (comme le tartre), ces impuretés peuvent impacter aussi bien la chaudière en elle-même que les canalisations de distribution de vapeur. Le traitement de cette eau est donc primordial pour augmenter le rendement et la durée de vie des installations. L'adoucissement et le dégazage se distinguent comme étant les traitements adaptés contre le tartre.

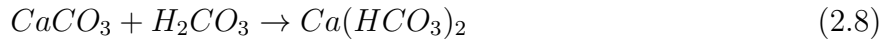
L'adoucissement

Le calcium et le magnésium se trouvent dissous dans l'eau sous forme d'ions et sont connus pour leur contribution à la dureté de l'eau. Lorsque la chaudière est en fonctionnement et que la chaleur est présente, ces éléments ont tendance à se précipiter sous forme de tartre, créant ainsi des dépôts solides sur les surfaces de chauffe. Malheureusement, ces dépôts entravent les transferts thermiques des fumées vers l'eau. Cela se traduit initialement par une augmentation des températures des fumées, ce qui entraîne une dégradation du rendement de la chaudière. Plus ces dépôts s'épaississent, plus les surfaces d'échange qui ne sont pas refroidies subissent une détérioration progressive [11].

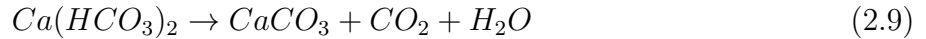
Le dioxyde de carbone se mélange à l'eau pour former de l'acide carbonique.



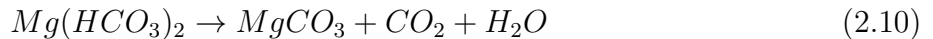
Le calcaire (carbonate de calcium) est dissous par l'acide carbonique pour former le bicarbonate de calcium.



Dans la chaudière, on a la réaction suivante :



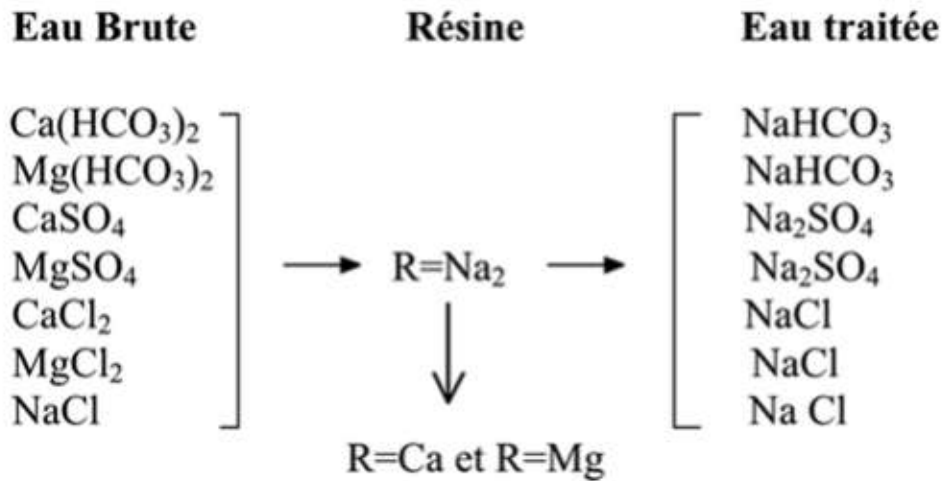
De la même façon, la magnésite (carbonate de magnésium) est dissoute par l'acide carbonique pour former du bicarbonate de magnésium



Le dioxyde de carbone entraîné par la vapeur se dissout dans le condensat pour former l'acide carbonique.

L'adoucissement consiste donc à éliminer les minéraux dissous, notamment le tartre, présents dans l'eau brute. Cela permet de réduire la formation de dépôts et de prolonger la durée de vie des équipements. Ce traitement peut être réalisé à l'aide d'un système d'échange d'ions. Les résines échangeuses d'ions sont des substances, qui se présentent sous l'aspect de très fines billes, dont la constitution chimique est essentiellement un polymère possédant de très nombreuses ramifications ou des terminaisons radicalaires. Suivant la « forme » de la terminaison radicalaire, on aura :

- Des « acides forts » : $R - SO_3H$ (résine cationique forte)
- Des « acides faibles » : $R - CO_2H$ (résine cationique faible)
- Des « bases fortes » : $R - OH$ (résine anionique forte)
- Des « bases faibles » : $R - NH_3 + OH$ (résine anionique faible)



Dégazage

Lorsqu'une canalisation subit une réaction d'oxydation, cela entraîne le phénomène de corrosion, qui se caractérise par une détérioration des matériaux. Ce phénomène engendre une perte thermique considérable, pour pallier ce problème, l'élimination de l' O_2 passe par différentes méthodes :

1. **Dégazage chimique** : on injecte un produit chimique (produit non renseigné par l'entreprise par raison de confidentialité) à l'aide d'une pompe doseuse dans l'eau.
2. **Dégazage thermique** : L'eau froide est introduite dans la partie supérieure du dôme de dégazage, où elle est pulvérisée sous forme de fines gouttelettes dans un environnement vapeur. En cédant sa chaleur latente de vaporisation à l'eau, la vapeur se condense, ce qui fait rapidement monter la température de l'eau à plus de 80°C . Ce processus permet d'extraire une grande partie des gaz présents dans l'eau. Ensuite, l'eau s'écoule à travers un remplissage en acier inoxydable, en contre-courant avec la vapeur injectée depuis le bas du dôme de dégazage, ce qui permet d'éliminer les dernières traces d'oxygène résiduel et de dioxyde de carbone [12].

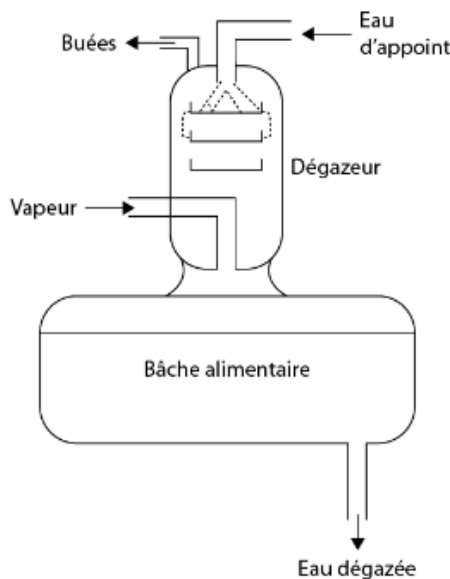


FIGURE 2.4 – Schéma d'un dégazeur physique

2.3 Description des installations présentes sur le site

2.3.1 Générateur de vapeur

On retrouve au niveau de l'usine de COCA COLA 3 chaudières à vapeur GX, figure 2.5 construites par ICI CALDAIE, de différents poids :

- Chaudière 3t (GX 2200).
- Chaudière 5t (GX 3000).
- Chaudière 10t (GX 6000).

Les détails de l'installation se trouvent dans l'annexe 3.6



FIGURE 2.5 – Illustration du modèle GX

Les caractéristiques techniques des différentes chaudières sont présentées dans les tableaux suivants :

TABLE 2.2 – Fiche technique de la chaudière GX 6 000

Désignation	Chaudière GX 6 000 - 10 t
Marque	ICI CALDAIE Tube de fumées
Production	vapeur saturée
Capacité de production	10 240 kg/h
Température (min et max) de service	10 °C – 191.7 °C
Combustible	Gaz naturel
Année de fabrication	2015
Timbre	22.5 bars
Pression de service	12 bars
Type de brûleur	Brûleur à gaz de type GBA

TABLE 2.3 – Fiche technique de la chaudière GX 3 000

Désignation	Chaudière GX 3 000 - 5t
Marque	ICI CALDAIE Tube de fumées
Production	vapeur saturée
Capacité de production	5 100 kg/h
Température (min et max) de service	10 °C – 191.7 °C
Combustible	Gaz naturel
Année de fabrication	2019
Timbre	22.5 bars
Pression de service	9 bars
Type de bruleur	Bruleur à gaz de type GBA

TABLE 2.4 – Fiche technique de la chaudière GX 2 200

Désignation	Chaudière GX 2 200 - 3 t
Marque	ICI CALDAIE Tube de fumées
Production	vapeur saturée
Capacité de production	3 200 kg/h
Température (min et max) de service	10 °C – 191.7 °C
Combustible	Gaz naturel
Année de fabrication	2019
Timbre	22.5 bars
Pression de service	8.5 bars
Type de bruleur	Bruleur à gaz de type GBA

Equipement de mesures

Une campagne de mesures a été réalisée sur les trois chaudières à vapeur. Grâce à un analyseur de combustion ECOM J2KN PRO, 2.6. L'ECOM J2KN PRO est un analyseur de combustion moderne, il inclut différents programmes rendant son utilisation facile sur tous types de chaudières.

L'ECOM J2KN PRO est un analyseur qui se caractérise par l'intégration des dernières technologies de mesure et d'utilisation. Il est constitué de deux parties principales : la base et le boîtier de commande. Ces deux composants interagissent entre eux grâce à un système de communication sans fil utilisant la LIAISON RADIO 868 MHz.

La première partie, la base, est destinée à être placée au point de mesure. C'est probablement l'endroit où se trouvent les éléments à analyser ou à contrôler. La base est responsable de collecter les données et de réaliser les mesures en fonction de ce qui est requis pour le processus ou l'analyse en cours.

La deuxième partie, le boîtier de commande, est mobile et peut être déplacée vers le point de réglage. Cette partie est probablement utilisée pour configurer ou ajuster les paramètres de mesure ou de contrôle, ou pour effectuer des actions spécifiques en fonction des résultats obtenus par la base.

Un étui magnétique est également mentionné, ce qui permet de fixer le boîtier de commande devant soi. Cela offre une certaine commodité pour l'utilisateur, qui peut ainsi garder le boîtier de commande à portée de main tout en se déplaçant ou en effectuant des réglages.



FIGURE 2.6 – Illustration de L'ECOM J2KN PRO

L'instrument peut contenir jusqu'à 6 capteurs électrochimiques (O_2 , CO , NO , NO_2 , SO_2 , CO , H_2S , NH_3 , HCL) plus un banc infrarouge pouvant mesurer 3 paramètres au maximum (CO , CO_2 , C_xH_y).

Les mesures du tableau 2.5 ont permis à l'entreprise de régler les trois chaudières pour un rendement qui puisse satisfaire leurs exigences.

TABLE 2.5 – Presentation de mesures des chaudières

Chaudière	GX 6 000, 10 t	GX 3 000, 5 t	GX 2 000, 3 t
Excès d'air (%)	1.63	1.5	1.76
Rendement (%)	89.6	92.8	89.8

2.3.2 Combustible

Les chaudières sont alimentées au gaz naturel, dont la composition, qui se trouve dans le tableau 2.6, est la suivante :

TABLE 2.6 – Composition du gaz naturel

Constituant	Formule	Composition massique (%)	Masse molaire (kg/kmole)	PCI (kcal/kg)
Méthane	CH_4	84	74.73	11 952.677
Ethane	C_2H_6	9.98	16.26	11 348.948
Propane	C_3H_8	1.11	2.65	11 078.633
Isobutane	C_4H_{10}	0.04	0.12	10 925.908
n-butane	C_4H_{10}	0.03	0.08	10 839.149

Son pouvoir calorifique :

$$PCI = 0.84 \times 11952.677 + 0.08 \times 11348.948 + 0.0697 \times 11078.633 + 0.009 \times 10925.908 + 0.0013 \times 10839.149$$

$$PCI = 11\ 833 \text{ kcal/kg} = 229\ 118 \text{ kcal/ kmole de GN}$$

2.3.3 L'eau d'alimentation

L'entreprise dispose de 4 puits de forage. L'eau extraite des nappes phréatiques est stockée dans des bâches, à l'intérieur de ces dernières, l'eau brute se mélange avec une certaine quantité

d'eau récupérée de l'usine. On retrouve au niveau de l'usine de COCA COLA les deux types de traitements précédemment cités (adoussissement et dégazage).

Pour les chaudières GX la réglementation prescrit des points de consigne pour certaines grandeurs spécifiques de l'eau dans la chaudière. Ces valeurs sont énumérées dans le tableau 2.7 qui suit.

TABLE 2.7 – Consigne sur l'eau d'alimentation

Caractéristiques	Unité de mesure	Pression \leq 15 Bars
pH		7 ÷ 9.5
Dureté total	mg/l $CaCO_3$	10
Oxygène	mg/l O_2	0.1
Anhydride carbonique libre	mg/l CO_2	0.2
Fer	mg/l Fe	0.1
Cuivre	mg/l Cu	0.1
Substance huileuse	mg/l	1
Aspect	claire, limpide, sans mousses persistantes	

Dans l'optique d'améliorer le rendement des chaudières, l'eau d'alimentation est préchauffée grâce à une partie de la vapeur produite à 97°C.

2.4 Méthodologie suivie

2.4.1 Objectif

Dans le but d'amorcer notre étude avec la rigueur et la précision requises, il est impératif de définir préalablement un objectif à atteindre, lequel se matérialise dans notre cas par la nécessité de fournir à l'usine une quantité adéquate d'énergie transmise par la vapeur d'eau, aussi bien en période de transition (au moment du démarrage) qu'en régime permanent. Cette valeur, exprimée en kilocalories par heure, est consignée dans le tableau ci-dessous :

TABLE 2.8 – Représentation du besoin théorique de l'entreprise

Machine	Régime transitoire (kcal/h)	Régime continu (kcal/h)
Ligne prod 1	120 3481	324 720
Ligne prod 2	0	640 000
Siroperie	3 576 000	3 576 000
Utilité	1 216 000	1 216 000
Ligne prod 3	851 260	372 000
Total	6 846 741	6 128 720
Avec 25 % de perte	8 558 426.25	7 967 336

Ces données représentent un besoin théorique, qui a pu être calculé par l'un des ingénieurs de l'entreprise. Ces chiffres représentent la capacité maximale de l'usine, car en réalité les différentes machines ne travaillent pas toutes au même moment.

Cependant, il est à noter que l'utilité 'chaudière' est en marche 365J/365, 24h/24 pour suivre le même rythme de production de la boisson gazeuse. Donc, la phase transitoire n'est en place que dans d'éventuelles occasions ou une machine passe à l'arrêt et redémarre (par exemple lors d'une maintenance).

2.4.2 Contraintes prises en considération

La vapeur produite est accumulée dans des cuves de stockage, et envoyé aux différentes machines au travers d'une canalisation de 125 mm de diamètre. Il est essentiel de noter que la pression de service des chaudières doit impérativement se situer entre 6.8 bar et 7.2 bar (intervalle imposé par l'entreprise).

Dans notre étude, nous avons travaillé avec :

1. Des pressions prédéfinies, ce qui a une incidence sur la quantité de vapeur à produire.
2. Un rendement fixe, qui influe sur la quantité de combustible utilisée.

NB : Les pertes présentes au niveau de la tuyauterie, notamment les pertes par les purgeurs, les pertes thermiques (relatif à l'épaisseur de l'isolation) et les pertes de charge (caractéristique des canalisations), n'ont pas pu être calculées en raison d'un manque de documentation.

2.4.3 Élément d'optimisation

Comme précédemment évoqué, il est crucial de souligner que l'énergie transmise par la vapeur est étroitement liée aux conditions de pression et de température auxquelles elle est soumise. Ainsi, notre attention se concentrera spécifiquement sur ces deux paramètres afin de déterminer avec précision la quantité de vapeur requise.

À l'heure actuelle, l'entreprise produit de la vapeur à une température de 176 °C. Selon les données fournies par les tables thermodynamiques [9], pour la plage de pression spécifiée (entre 6.8 et 7.2 bar), cette température correspond à un état de surchauffe. Par conséquent, nous procéderons à une comparaison entre les avantages procurés par une température de saturation et ceux associés à une température de surchauffe.

2.5 Résultats et interprétation

2.5.1 Débit de vapeur à produire

D'abord, nous avons déterminé la quantité de vapeur à produire pour faire fonctionner toutes les machines, tout en prenant en considération les contraintes imposées.

TABLE 2.9 – Tables thermodynamiques des enthalpies

Pression (bar)	Température (°C)	Enthalpie (kcal/kg)		
		h_f	h_{fg}	h_g
6.8	163.787	165.37	494.65	660.02
6.9	164.373	165.98	494.19	660.17
7	164.95	166.59	493.72	660.31
7.1	165.526	167.18	493.28	660.46
7.2	166.092	167.78	492.82	660.60

Les débits de vapeur à produire seraient donc de :

$$Q = \dot{m}_v \times hg \tag{2.11}$$

TABLE 2.10 – Résultats des débit

Pression (bar)	Débit massique (kg/h)	Régime transitoire (kcal/h)	Débit massique (kg/h)	Régime continu (kcal/h)
6.8	13 100	8 646 260.02	12 100	7 986 242
6.9	13 100	8 648 201.23	12 100	7 988 057
7	13 100	8 650 111.13	12 100	7 989 751
7.1	13 100	8 651 989.71	12 100	7 991 566
7.2	13 100	8 653 836.99	12 100	7 993 260

Étant donné que l’entreprise opère actuellement à une pression de 7 bars, il est judicieux de sélectionner cette même pression de travail pour avoir un bon comparatif

2.5.2 Débit de gaz consommé

La quantité de gaz naturel à consommer se calcule suivant l’équation 2.5 :

En régime transitoire : Pour garantir le démarrage, nous avons besoin d’un débit de 13.1 t/h. Par conséquent, la mise en service des chaudières de 10 tonnes et de 5 tonnes est nécessaire. Débit du gaz naturel :

- On alimente la chaudière GX 6 000 (10t) avec un débit d’eau de 9.1 t/h, dans ce cas, nous avons besoin d’introduire un débit de 388 kg/h de gaz naturel.
- On alimente la chaudière GX 3 000 (5t) avec un débit d’eau de 4 t/h, dans ce cas, nous avons besoin d’utiliser un débit de 177 kg/h de gaz naturel.

En régime continu : Lorsqu’on passe en régime continu, notre besoin baisse d’environ un demi-million de kcal/h par rapport au régime transitoire, ce qui fait un débit moins important, environs 12.1 t/h d’eau, pour cela la mise en fonctionnement de la chaudière GX 2 200 (3t) à la place de la GX 3 000 (5t) est suffisante.

Débit du gaz naturel :

- On alimente la chaudière GX 6 000 (10t) avec un débit d’eau de 9.1 t/h, dans ce cas, nous avons besoin d’introduire un débit de 388 kg/h de gaz naturel.
- On alimente la chaudière GX 2 200 (3t) avec un débit d’eau de 3 t/h, dans ce cas, nous aurons besoin d’utiliser un débit de 129 kg/h de gaz naturel.

TABLE 2.11 – Débits d’air et de gaz naturel suivant le régime de fonctionnement

	Régime transitoire		Régime continu	
	Débit d’eau	Débit de gaz	Débit d’eau	Débit de gaz
	(kg/h)	(kg/h)	(kg/h)	(kg/h)
Chaudière GX 6 000	9 100	388	9 100	388
Chaudière GX 3000	4 000	177	0	0
Chaudière GX 2200	0	0	3 000	129

Analyse de la combustion

D’après le tableau (2.6), les réactions de combustion stœchiométriques pour les différents constituants du gaz naturel sont données ci-dessous pour 1 kilo mole de gaz.

Méthane :



Ethane :



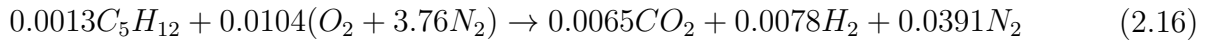
Propane :



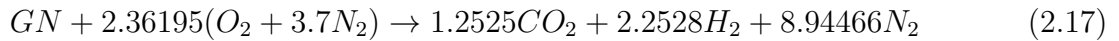
Butane :



Pentane :

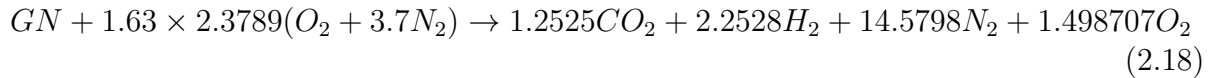


La réaction globale sera donc, dans le cas où nous utilisons 100% d'air théorique pour 100 mol de [GN] :



Ensuite, en multipliant le facteur de l'air par :

1. 1.63 pour la chaudière GX 6000, pour tenir compte des 63 % d'excès d'air. On obtient :

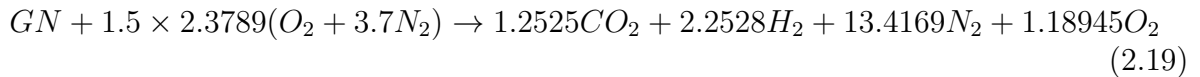


Cet excès se traduit en réalité par une quantité de :

$$\dot{m}_{combustible} = 388kg/h = 485Nm^3/h$$

$$\dot{m}_{air} = 632.44kg/h = 527Nm^3/h$$

2. 1.50 pour la chaudière GX 3000, pour tenir compte des 50 % d'excès d'air. On obtient :

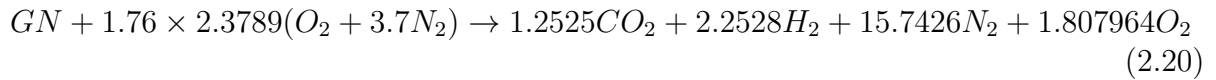


Cet excès se traduit en réalité par une quantité de :

$$\dot{m}_{combustible} = 177kg/h = 221.25Nm^3/h$$

$$\dot{m}_{air} = 265.5kg/h = 221.25Nm^3/h$$

3. 1.76 pour la chaudière GX 2200, pour tenir compte des 76% d'excès d'air. On obtient :



Cet excès se traduit en réalité par une quantité de :

$$\dot{m}_{combustible} = 128kg/h = 160Nm^3/h$$

$$\dot{m}_{air} = 225.28kg/h = 187.73Nm^3/h$$

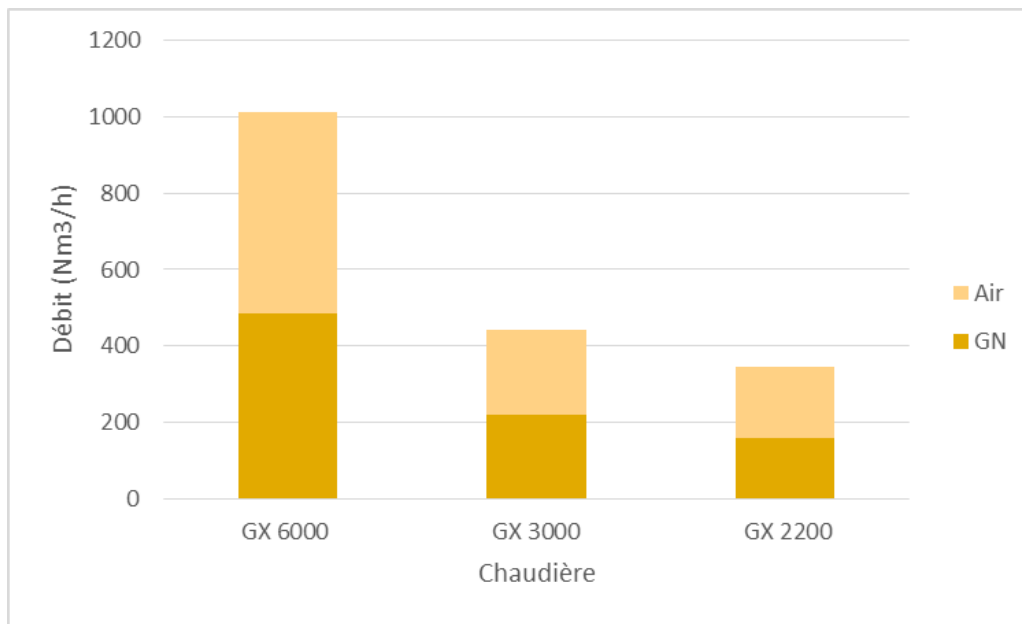


FIGURE 2.7 – Représentation graphique des débits d'air et de gaz naturel dans le foyer de chaque chaudière

Détermination de la composition des fumées Le débit des gaz à la sortie de la chambre de combustion, $\dot{m}_{fumées} = \sum \dot{m}_i$, (i) se référant aux différents gaz constituant les fumées. On a donc d'après la réaction ci-dessus :

1. **Chaudière GX 6000 :**

$$\dot{m}_{Total} = 1.2525 + 2.2528 + 14.5798 + 1.498707 = 19.583807 \text{ mol de fumées/mol de GN brûlé}$$

Ceci nous permet de déterminer la composition molaire des produits de combustion, soit :

$$[yCO_2] = \dot{m}_{CO_2} / \dot{m}_{Total} = 1.2525 / 19.583807 = 6.39 \%$$

$$[yH_2O] = \dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_{Total} = 2.2528 / 19.583807 = 11.51 \%$$

$$[yN_2] = \dot{m}_{N_2} / \dot{m}_{Total} = 14.5798 / 19.583807 = 74.44 \%$$

$$[yO_2] = \dot{m}_{O_2} / \dot{m}_{Total} = 1.498707 / 19.583807 = 7.66 \%$$

TABLE 2.12 – Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 6 000

Les composants	CO_2	H_2O	N_2	O_2
Fraction molaire (%)	6.39	11.51	74.44	7.66

2. Chaudière GX 3000 :

$\dot{m}_{Total} = 1.2525 + 2.2528 + 13.4169 + 1.18945 = 18.11165$ mol de fumées/mol de GN brûlé

Ceci nous permet de déterminer la composition molaire des produits de composition, soit :

$$[yCO_2] = \dot{m}_{CO_2} / \dot{m}_{Total} = 1.2525 / 18.11165 = 6.91 \%$$

$$[yH_2O] = \dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_{Total} = 2.2528 / 18.11165 = 12.44 \%$$

$$[yN_2] = \dot{m}_{N_2} / \dot{m}_{Total} = 13.4169 / 18.11165 = 74.08 \%$$

$$[yO_2] = \dot{m}_{O_2} / \dot{m}_{Total} = 1.18945 / 18.11165 = 6.57 \%$$

TABLE 2.13 – Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 3 000

Les composants	CO_2	H_2O	N_2	O_2
Fraction molaire (%)	6.91	12.44	74.08	6.57

3. Chaudière GX 2200 : $\dot{m}_{Total} = 1.2525 + 2.2528 + 15.7426 + 1.807964 = 21.055864$ mol de fumées/mol de GN brûlé

Ceci nous permet de déterminer la composition molaire des produits de composition. soit :

$$[yCO_2] = \dot{m}_{CO_2} / \dot{m}_{Total} = 1.2525 / 21.055864 = 5.95 \%$$

$$[yH_2O] = \dot{m}_{H_2O} / \dot{m}_{Total} = 2.2528 / 21.055864 = 10.70 \%$$

$$[yN_2] = \dot{m}_{N_2} / \dot{m}_{Total} = 15.7426 / 21.055864 = 74.68 \%$$

$$[yO_2] = \dot{m}_{O_2} / \dot{m}_{Total} = 1.807964 / 21.055864 = 8.58 \%$$

TABLE 2.14 – Composition des fumées résultant de la combustion de la GX 2 200

Les composants	CO_2	H_2O	N_2	O_2
Fraction molaire (%)	5.95	10.70	74.68	8.58

Température des flammes

D'après le premier principe thermodynamique :

$$H_R = H_P \sum N_R(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h}) = \sum N_P(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})$$

Les valeurs des enthalpies sont prises des tables [13] :

1. Chaudière GX 6000 : Le combustible est introduit dans le foyer à 25°C pour être brûlé avec 1.63 d'excès d'air à 27°C :

Énergie générée par les réactifs :

$$H_R = 0.84 \times \bar{h}_{fCH_4}^0 + 0.08 \times \bar{h}_{fC_2H_6}^0 + 0.0697 \times \bar{h}_{fC_3H_8}^0 + 0.009 \times \bar{h}_{fC_4H_{10}}^0 + 0.0013 \times \bar{h}_{fC_5H_{12}}^0 + 3.877607[\Delta\bar{h}_{O_2}(300k)] + 14.5798[\Delta\bar{h}_{N_2}(300K)]$$

$$H_R = 0.84 \times (-74873) + 0.08 \times (-84667) + 0.0697 \times (-103847) + 0.009 \times (-208447) + 0.0013 \times (-146760) + 3.877607 \times (8736 - 8682) + 14.5798 \times (8723 - 8669)$$

$$H_R = -77974.92692 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

L'enthalpie des produits nous indiquera la température nécessaire à atteindre durant la combustion :

$$H_P = 1.2525 \times (\hbar_{fCO_2}^0 + \Delta\hbar_{CO_2}) + 2.2528 \times (\hbar_{fH_2O}^0 + \Delta\hbar_{H_2O}) + 14.5798 \times (\hbar_{fN_2}^0 + \Delta\hbar_{N_2}) + 1.498707 \times (\hbar_{fO_2}^0 + \Delta\hbar_{O_2})$$

$$\text{\AA } T = 1700 \text{ K} : H_P = -81419.38381 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

$$\text{\AA } T = 1720 \text{ K} : H_P = -66294.88892 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

Par interpolation linéaire, on trouve une température approximative de : $T = 1705 \text{ K}$

2. **Chaudière GX 3 000** : Le combustible est introduit dans le foyer à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ pour être brûlé avec 1.5 d'excès d'air à $27 \text{ }^\circ\text{C}$:

Énergie générée par les réactifs :

$$H_R = 0.84 \times \hbar_{fCH_4}^0 + 0.08 \times \hbar_{fC_2H_6}^0 + 0.0697 \times \hbar_{fC_3H_8}^0 + 0.009 \times \hbar_{fC_4H_{10}}^0 + 0.0013 \times \hbar_{fC_5H_{12}}^0 + 3.56835[\Delta\hbar_{O_2}(300k)] + 13.416996[\Delta\hbar_{N_2}(300K)]$$

$$H_R = 0.84 \times (-74873) + 0.08 \times (-84667) + 0.0697 \times (-103847) + 0.009 \times (-208447) + 0.0013 \times (-146760) + 3.56835 \times (8736 - 8682) + 13.416996 \times (8723 - 8669)$$

$$H_R = -78054.41822 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

L'enthalpie des produits nous indiquera la température nécessaire à atteindre durant la combustion :

$$H_P = 1.2525 \times (\hbar_{fCO_2}^0 + \Delta\hbar_{CO_2}) + 2.2528 \times (\hbar_{fH_2O}^0 + \Delta\hbar_{H_2O}) + 13.4169 \times (\hbar_{fN_2}^0 + \Delta\hbar_{N_2}) + 1.18945 \times (\hbar_{fO_2}^0 + \Delta\hbar_{O_2})$$

$$\text{\AA } T = 1800 \text{ K} : H_P = -78459.43355 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

$$\text{\AA } T = 1820 \text{ K} : H_P = -64283.3134 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

Par interpolation linéaire, on trouve une température approximative de : $T = 1801 \text{ K}$

3. **Chaudière GX 2 200** : Le combustible est introduit dans le foyer à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ pour être brûlé avec 1.76 d'excès d'air à $27 \text{ }^\circ\text{C}$:

Énergie générée par les réactifs :

$$H_R = 0.84 \times \hbar_{fCH_4}^0 + 0.08 \times \hbar_{fC_2H_6}^0 + 0.0697 \times \hbar_{fC_3H_8}^0 + 0.009 \times \hbar_{fC_4H_{10}}^0 + 0.0013 \times \hbar_{fC_5H_{12}}^0 + 4.186854[\Delta\hbar_{O_2}(300k)] + 15.7426[\Delta\hbar_{N_2}(300K)]$$

$$H_R = 0.84 \times (-74873) + 0.08 \times (-84667) + 0.0697 \times (-103847) + 0.009 \times (-208447) + 0.0013 \times (-146760) + 4.186854 \times (8736 - 8682) + 15.7426 \times (8723 - 8669)$$

$$H_R = -77895.44 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

L'enthalpie des produits nous indiquera la température nécessaire à atteindre durant la combustion :

$$H_P = 1.2525 \times (\bar{h}_{fCO_2}^0 + \Delta\bar{h}_{CO_2}) + 2.2528 \times (\bar{h}_{fH_2O}^0 + \Delta\bar{h}_{H_2O}) + 15.7426 \times (\bar{h}_{fN_2}^0 + \Delta\bar{h}_{N_2}) + 1.807964 \times (\bar{h}_{fO_2}^0 + \Delta\bar{h}_{O_2})$$

$$\text{\AA } T = 1620 \text{ K : } H_P = -78459.43355 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

$$\text{\AA } T = 1640 \text{ K : } H_P = -64283.3134 \text{ kJ/kmol de combustible}$$

Par interpolation linéaire. on trouve une température approximative de : $T = 1620,4 \text{ K}$
 Les détails des calculs se trouvent dans l'annexe 3.6

TABLE 2.15 – Température des flammes de chaque chaudière

Chaudière	GX 6 000	GX 3 000	GX 2 200
Température (K)	1 705	1 801	1 620.4

2.5.3 État actuel

Il a été préalablement mentionné que l'usine produit de la vapeur à $176 \text{ }^\circ\text{C}$, en suivant le même cheminement, on retrouve :

TABLE 2.16 – Représentation du gain

Pression (bar)		7	7
Température ($^\circ\text{C}$)		176	164.95
Enthalpie (kcal/kg)		664.701	660.31
Débit de vapeur (kg/h)	Régime transitoire	13 000	13 100
	Régime continu	12 000	12 100
Débit de gaz (kg/h)	GX 6000	386.81	388.085
	GX 3 000	178.056	176.58
	GX 2 200	129.22	128.15
Gain		1.1 kg/h	

Grace à notre étude, l'entreprise économise jusqu'à 1.1 kg/h en gaz naturel, ce qui équivaut à $1.375 \text{ Nm}^3/\text{h}$ $33 \text{ Nm}^3/\text{j} = 990 \text{ Nm}^3/\text{mois}$), cette quantité représente un gain financier de $115\,520.5$ de dinar par mois ($1\,386\,246$ de dinars sur toute l'année). Les principaux avantages de cette optimisation sont : le gain en gaz naturel, économie en capital, la réduction des rejets. Cependant, il existe des inconvénients associés à cette approche, tels qu'une consommation accrue en ressources hydriques et une dépendance à une chaudière de 10 tonnes. En cas de panne de celle-ci, seulement la moitié du besoin peut être satisfait.

2.6 Conclusion

Pour résumer, en mettant en place les réglages suivants : une pression de 7 bars pour les chaudières et des températures de 1705 K , 1801 K et 1620 K respectivement pour les foyers de

10 t, 5 t et 3 t, l'entreprise sera en mesure de réaliser une économie mensuelle de 990 Nm^3 de gaz naturel. Ce choix stratégique se traduira par un gain financier conséquent, soit 115 520,5 dinars par mois.

2.7 Perspectives

Les résultats obtenus permettent à l'entreprise de réaliser un gain, même si celui-ci est minime. Afin d'optimiser davantage les performances, il est nécessaire d'entreprendre les actions suivantes :

- Effectuer un dimensionnement des canalisations pour déterminer la pression idéale et garantir un débit de vapeur constant.
- Fixer un besoin plus représentatif de la réalité.
- Travailler sur les paramètres de la combustion pour augmenter le rendement des chaudières.

Chapitre 3

Amélioration du ratio consommation d'eau

3.1 Introduction

L'eau pure, telle que définie par les chimistes, est une notion abstraite. Elle représenterait une eau ne contenant que des molécules d'eau, sans aucune autre substance. Cependant, une telle eau n'existe pas naturellement en raison de la capacité de l'eau à dissoudre de nombreux composés.

En tant que solvant efficace, l'eau est capable de dissoudre de nombreuses substances solides ou gazeuses. Tout au long de son parcours, que ce soit lorsqu'elle tombe en pluie, s'écoule sur les sols, s'infiltré dans le sol ou s'écoule le long des pentes, elle se charge en éléments solubles. Naturellement, en l'absence d'intervention humaine, elle contient une grande variété de matières dissoutes, qu'elles soient inertes ou vivantes, telles que des gaz, des substances minérales ou organiques, ainsi que des micro-organismes tels que des bactéries, des virus ou du plancton.

Le traitement de l'eau est donc crucial, car il permet de disposer d'une source d'eau propre et sûre qui répond aux exigences des besoins humains, industriels et agricoles. Cependant, la rareté de cette ressource précieuse constitue un défi majeur auquel nous faisons face. Bien que la Terre regorge d'eau en abondance, seule une petite fraction est disponible sous forme d'eau douce, adaptée à la consommation humaine. De plus, la pollution, le gaspillage et le changement climatique contribuent à aggraver cette rareté en réduisant la disponibilité et la qualité de l'eau. Par conséquent, il est impératif de gérer cette ressource de manière responsable et durable.

L'objectif du présent chapitre est de condenser les notions nécessaires pour la compréhension du traitement des eaux, plus précisément le dessalement, suivi d'une description des installations présentes sur le site de l'entreprise, la méthodologie suivie et les éléments sélectionnés pour arriver à notre optimisation. Enfin, une discussion des résultats obtenus.

3.2 Partie théorique

3.2.1 Situation en Algérie

En Algérie, les ressources en eau sont limitées, vulnérables et réparties de manière inégale. Malgré des potentialités estimées à 19 milliards de mètres cubes, une population d'environ 40 millions d'habitants et une dotation par habitant de $500 \text{ m}^3/\text{an}$, l'Algérie se classe parmi les pays où la disponibilité en eau est en dessous du seuil critique fixé par la Banque Mondiale à 1000 mètres cubes par habitant et par an. Avec une production d'eaux usées estimée actuellement à 1.2 milliard m^3/an et une capacité de traitement de 0.8 milliard m^3 , l'Algérie réutilise aujourd'hui 0.1 milliard m^3/an . [14]

Toutefois, au cours des trois dernières décennies, les changements climatiques observés à l'échelle mondiale se sont également fait ressentir en Algérie. Cela s'est traduit par :

- une augmentation des températures minimales et maximales moyennes dans toutes les stations du nord de l'Algérie depuis le milieu des années 60.
- Une tendance à la sécheresse et une perturbation spatio-temporelle des régimes pluviométriques. Cette perturbation se caractérise par l'alternance de périodes de précipitations intenses et abondantes avec de longues périodes de sécheresse.

C'est pourquoi donc il est indispensable d'essayer de récupérer au maximum d'eau afin de pouvoir pallier ce manque qui ne cesse de croître.

3.2.2 Composition chimique de l'eau

L'eau renferme divers gaz dissous, principalement de l'oxygène et du gaz carbonique, ainsi que de l'azote et parfois du méthane. La solubilité de ces gaz varie et diminue à mesure que la température augmente. En outre, l'eau contient des substances minérales et organiques, présentes soit en solution soit en suspension. Alors que les substances minérales se limitent à environ une centaine de composés, les substances organiques sont extrêmement nombreuses, allant de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions, et leur identification individuelle est très complexe [15].

Matière organique

Les matières organiques peuvent se trouver soit dissoutes, comme les glucides, les acides humiques, les pigments et les composés d'origine artificielle tels que les hydrocarbures, les solvants chlorés ou les pesticides, soit en suspension, comme les déchets végétaux et le plancton. Elles proviennent principalement de la décomposition de la matière organique présente dans l'environnement ou dans les sols, qui est dégradée par les précipitations (décomposition des plantes et des animaux). Elles peuvent également provenir de composés issus des activités humaines. Leur concentration est minime dans les eaux profondes, mais peut atteindre quelques dizaines de milligrammes par litre dans les eaux de surface [15].

Matière minérale

L'eau renferme une variété d'ions dissous, parmi lesquels figurent principalement le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les carbonates (CO_3^{2-}), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorure (Cl^-)s et les nitrates (NO_3^-). Ces ions proviennent principalement de l'érosion des sols par les eaux de pluie, et leur concentration dépend directement de la composition des roches dans le bassin versant. Elle peut varier de quelques milligrammes à plusieurs grammes par litre pour les eaux les plus salées.

En plus faible concentration (de l'ordre du $\mu g/L$ au mg/L), l'eau contient également des éléments nutritifs tels que l'azote (sous forme d'ammoniac, de nitrites et de nitrates), le phosphore (sous forme de phosphates) et la silice, ainsi que du fer et du manganèse.

D'autres éléments ne sont présents qu'en traces (de 0.1 à 100 $\mu g/L$), comme l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le zinc, le cobalt, le plomb, qui proviennent à la fois des roches et parfois des activités industrielles et domestiques.

Par ailleurs, l'eau contient également des matières minérales en suspension, telles que des particules argileuses et des limons [15].

3.2.3 Classification des eaux naturelles

Salinité

Les données présentées dans le tableau ci-dessous classifient les eaux en fonction de leurs niveaux de matières dissoutes. Les eaux saumâtres, généralement issues des nappes d'eau souterraines, contiennent fréquemment entre 2 000 et 10 000 mg/L de matières dissoutes. Il convient de noter que l'effluent d'une usine d'épuration soumis à un traitement biologique contient environ 750 mg/L de matières dissoutes.

TABLE 3.1 – Classification des eaux naturelles selon la salinité

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 - 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 - 15 000
Eau très saumâtre	15 000 - 35 000
Eau de mer	35 000 - 42 000
Saumure	40 000 - 300 000

Dureté

Une eau est considérée dure lorsqu'elle renferme une quantité élevée de sels dissous, notamment des sels de calcium tels que le carbonate de calcium, également connu sous le nom de calcaire, ainsi que des sels de magnésium. À l'inverse, une eau est qualifiée de douce lorsqu'elle contient peu de ces sels. La dureté de l'eau peut varier dans la nature [16].

Teneur en sels minéraux

Il existe une variation significative entre les différentes eaux disponibles. Elles peuvent être classées en trois catégories distinctes en fonction de la quantité de résidus solides restants après évaporation.

- **Les eaux faiblement minéralisées** : sont caractérisées par un TDS (Total Dissolved Solids - Total des solides dissous) inférieur à 500 ppm selon les normes du Canada et de l'Europe, et inférieur à 250 ppm aux États-Unis.
- **Les eaux moyennement minéralisées** : affichent un TDS compris entre 500 et 1 500 ppm pour le Canada et l'Europe, et supérieur à 250 ppm aux États-Unis.
- **Les eaux fortement minéralisées** : sont celles dont le TDS dépasse 1 500 mg par litre d'eau.
- **Les eaux purifiées** : sont caractérisées par un TDS inférieur à 10 ppm.

Cette classification permet de mieux comprendre les niveaux de minéralisation présents dans chaque type d'eau [16].

3.2.4 Le dessalement des eaux

Le dessalement de l'eau est un procédé visant à purifier l'eau salée ou saumâtre en éliminant le sel qu'elle contient, transformant ainsi l'eau en une ressource douce et potable. L'osmose inverse est la méthode principalement utilisée pour réaliser le dessalement. Cette technique repose sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable qui sépare les ions et les molécules de sel de l'eau. Le dessalement joue un rôle crucial dans les régions où l'eau douce est rare, en offrant une source alternative vitale grâce à l'eau salée, comme l'eau de mer [17].

3.2.5 La déminéralisation des eaux

La déminéralisation de l'eau est un processus qui vise à éliminer les minéraux et les sels dissous présents dans l'eau, tels que le calcium, le magnésium, les carbonates, les sulfates, et d'autres substances similaires. Cette méthode utilise diverses techniques, notamment l'échange d'ions, l'osmose inverse ou la distillation, pour atteindre cet objectif. Elle est largement utilisée dans des contextes industriels où une faible concentration en minéraux est requise, par

exemple dans les chaudières, les systèmes de refroidissement ou encore pour produire de l'eau déminéralisée dans les laboratoires [18].

3.2.6 L'osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel où un fluide, généralement de l'eau, se diffuse à travers une membrane semi-perméable d'une solution à faible concentration de soluté vers une solution à concentration plus élevée jusqu'à atteindre un équilibre de concentration. La différence de pression entre les deux côtés de la membrane est appelée pression osmotique. En utilisant une pression supérieure à la pression osmotique, on peut inverser le processus d'osmose, appelé osmose inverse. Dans l'osmose inverse, de l'eau pure est séparée de la solution en la faisant passer à travers une membrane semi-perméable qui permet le passage de l'eau mais pas des solutés. Cela permet de filtrer et de purifier l'eau [1].

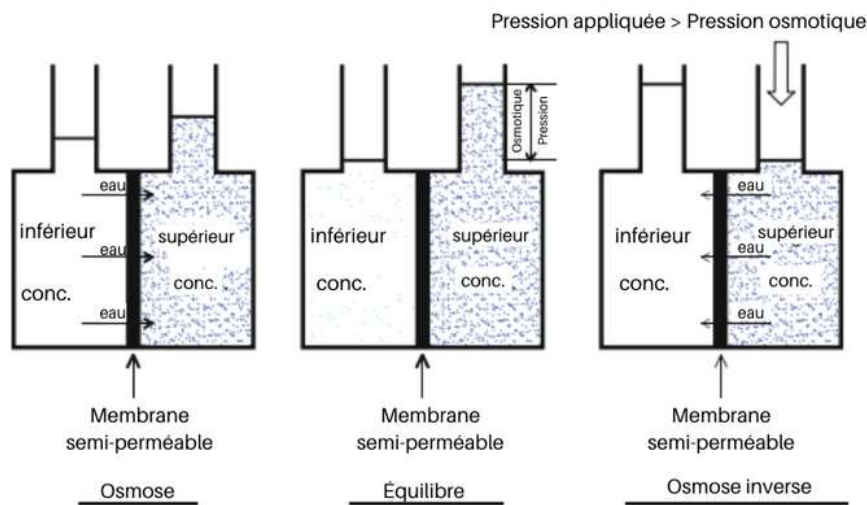


FIGURE 3.1 – L'osmose et l'osmose inverse [1]

Type de membrane d'osmose inverse

Une membrane d'osmose inverse doit présenter plusieurs propriétés essentielles : une perméabilité élevée à l'eau, une imperméabilité importante aux solutés et une résistance aux pressions de fonctionnement élevées. Idéalement, elle devrait également être capable de tolérer de larges variations de pH et de température, tout en étant résistante aux attaques chimiques telles que celles du chlore libre et des bactéries. De plus, elle devrait être résistante à l'encrassement et à la contamination par les impuretés présentes dans l'eau d'alimentation. Les membranes d'osmose inverse se déclinent en trois types principaux : cellulosique, polyamide totalement aromatique et composite à film mince [19].

Le tableau 3.2 présente une comparaison des caractéristiques des trois types de membranes.

TABLE 3.2 – Comparaison des membranes d'osmose inverse

Type	Cellulosique	Polyamide aromatique	Composite à film mince
Rejet des substances organiques de faible poids moléculaire	F	M	E
Flux d'eau	M	F	E
pH admis	4 - 8	4 - 11	2 - 11
Température admise	Maximum 35 °C	Maximum 35 °C	Maximum 45 °C
Tolérance aux oxydants	E	F	F
Tendance au compactage	E	E	F
Biodégradabilité	E	F	F
Prix	F	M	E

F = Faible, M = Moyen, E = Élevé

Membrane cellulosique Dans les années 1950, les membranes d'acétate de cellulose ont été utilisées pour démontrer le concept de l'osmose inverse (OI). Ces membranes sont constituées d'une couche mince et dense en surface et d'une sous-structure poreuse plus épaisse. Elles sont fabriquées à partir d'acétate de cellulose, ce qui les rend abordables et faciles à produire.

Cependant, ces membranes présentent certaines limitations. Leur structure asymétrique les rend sensibles à la compaction sous des pressions de fonctionnement élevées, en particulier à des températures élevées. La compaction se produit lorsque la couche dense fusionne avec la sous-structure poreuse, réduisant ainsi le flux du produit. De plus, les membranes d'acétate de cellulose sont vulnérables à l'hydrolyse et ne peuvent être utilisées que dans une plage de pH limitée. Elles se dégradent également à des températures supérieures à 35 °C et sont sensibles aux attaques bactériennes. Bien qu'elles aient une perméabilité élevée à l'eau, elles rejettent mal les contaminants de faible poids moléculaire.

Pour améliorer les performances, des membranes de triacétate de cellulose ont été développées. Elles offrent de meilleurs résultats en termes de rejet du sel, de résistance au pH, aux températures élevées et aux attaques microbiennes. Cependant, ces membranes ont une perméabilité à l'eau inférieure à celles d'acétate de cellulose. Afin de combiner les caractéristiques souhaitables des deux types de membranes, des mélanges de triacétate [19].

Membrane à polyamide aromatique Les membranes en polyamide aromatique, développées par DuPont, sont principalement utilisées dans une configuration de fibres creuses. Elles sont similaires aux membranes cellulaires, avec une structure asymétrique comprenant une fine couche externe dense et une structure poreuse en dessous. Comparées aux membranes cellulaires, les membranes en polyamide sont plus résistantes à l'hydrolyse et aux attaques biologiques. Elles peuvent fonctionner dans une large plage de pH, mais une utilisation prolongée aux extrêmes de cette plage peut causer une dégradation irréversible. Elles peuvent supporter des températures plus élevées que les membranes cellulaires, bien qu'elles soient sujettes à la compaction à des pressions et des températures élevées. Les membranes en polyamide ont de meilleures propriétés de rejet du sel et des substances organiques solubles dans l'eau que les membranes cellulaires. Cependant, elles sont sensibles à la dégradation causée par les oxydants, tels que le chlore libre [19].

Membrane de composite à film mince Ces membranes sont appelées membranes composites à film mince (TFM) et sont constituées d'une fine couche de surface qui rejette les solutés

et repose sur une structure poreuse. Les matériaux et les processus de fabrication des deux couches peuvent varier pour optimiser le flux d'eau élevé et la faible perméabilité aux solutés. La couche de surface détermine principalement le flux d'eau et le rejet des solutés, avec une épaisseur allant de 0.01 à 0.1 mm.

Différents types de membranes TFM ont été développés, tels que le polyamide aromatique, le polyurée/polyamide alkyl-aryl et le cyanurate de polyfurane. La sous-couche poreuse de support est généralement composée de polysulfone. Les membranes TFM en polyamide, tout comme les membranes asymétriques en polyamide, sont sensibles à la dégradation par les oxydants, notamment le chlore libre. Il est donc essentiel de maintenir régulièrement les systèmes TFM, en particulier l'élément de préfiltration au charbon, pour éliminer le chlore libre et éviter d'endommager prématurément la membrane TFM. Des améliorations ont été apportées pour renforcer la stabilité des membranes vis-à-vis du chlore libre, mais il est toujours préférable de minimiser l'exposition aux oxydants [19].

3.3 Description des installations présentes sur le site

3.3.1 Processus de traitement

On retrouve au niveau de l'usine une station de traitement des eaux dont le processus présent sur la figure 13 En résumé, le processus de traitement de l'eau brute comprend les étapes suivantes :

1. Désinfection par ajout de chlore : L'eau brute est traitée en ajoutant du chlore pour éliminer les bactéries, les virus et autres micro-organismes présents.
2. Filtration à travers un filtre à sable : L'eau désinfectée passe à travers un filtre à sable qui retient les particules solides et les impuretés plus grosses.
3. Filtration à travers un filtre à charbon : L'eau provenant du filtre à sable est ensuite filtrée à travers un filtre à charbon qui élimine les substances organiques, les produits chimiques et les odeurs indésirables.
4. Adoucissement de l'eau : une partie de l'eau est adoucie pour être utilisée dans les installations de chauffage, comme les chaudières, afin de prévenir l'accumulation de dépôts de calcaire.
5. Déminéralisation des eaux : l'autre partie de l'eau passe par des osmoseurs pour enlever les sels présents dans l'eau. cette eau est distribution vers les lignes de production.

Ce processus de traitement de l'eau garantit que l'eau brute est désinfectée, purifiée et adaptée à différentes utilisations, en fonction des besoins spécifiques de chaque zone d'utilisation.

3.3.2 Les membranes utilisées

L'entreprise dispose de 6 osmoseurs, de membrane BW30-400



FIGURE 3.2 – Illustration de la membrane [2]

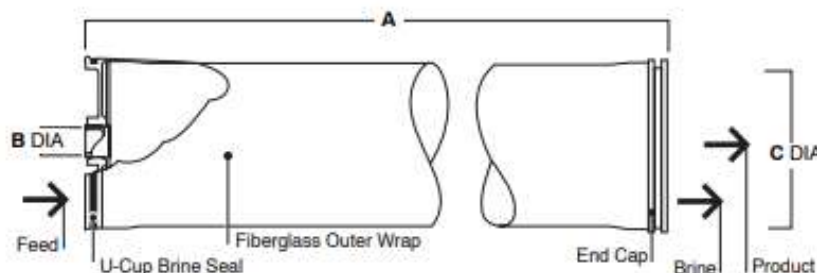


FIGURE 3.3 – Schéma de la membrane [2]

Dont les caractéristiques sont les suivantes :

TABLE 3.3 – Caractéristiques techniques des membranes

Type	Composite à film mince
Température maximale	45 °C
Pression maximale	41 bar
Perte de charge maximale	1 bar
pH en service	2 - 11
pH en nettoyage	1 - 13
Débit maximal	19 m ³ /h

3.3.3 Qualité de l'eau

L'entreprise produit en moyenne 1980 m³/jours et effectue une analyse physico-chimique de son eau après chaque quatre heures afin de garantir la qualité de l'eau produite et de surveiller les performances de ses machines. Les résultats de cette analyse sont résumés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 3.4 – Analyse de l'eau

Eau brute		Eau osmosé	
TAC	189	TAC	51
TDS	473	TDS	136
Turbidité	0.31	Turbidité	0.17
pH	7.57	pH	7.09

3.4 Méthodologie suivie

3.4.1 Objectif fixé

Dans le cadre de cette étude, nous souhaitons examiner la possibilité pour l'entreprise de récupérer une quantité spécifique d'eau pendant le processus de traitement. Plus précisément, nous nous concentrons sur les rejets des osmoseurs, qui contiennent une quantité importante de sels minéraux. Notre objectif est de déterminer la quantité d'eau à récupérer sans provoquer de précipitation pour ne pas affecter la conductivité d'entrée de l'eau brute.

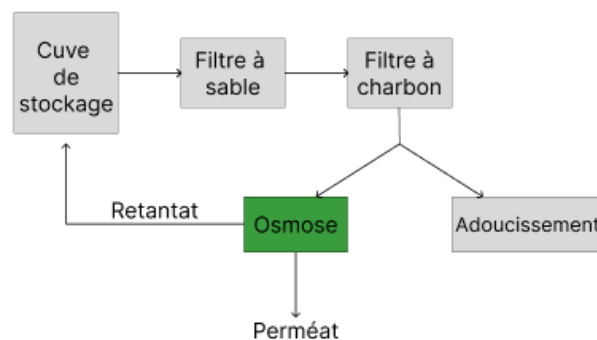


FIGURE 3.4 – Schéma simplifié de l'objectif choisi

3.4.2 Matériel et méthode

Nous avons effectué une série de trois expériences sur 4 échantillons. Pour chaque expérience, nous avons :

1. mesuré la conductivité de l'échantillon, grâce à un conductimètre HI8733,
2. rempli un bécher avec 500 ml de rétentat,
3. porté à ébullition, grâce à l'utilisation d'une résistance, à une température de 100°C jusqu'à l'apparition de sels dans l'eau,
4. laissé le bécher refroidir à température ambiante et mesuré le volume d'eau perdu.

Cette méthodologie a été mise en place afin de garantir la précision et l'exploitation de nos résultats.



FIGURE 3.5 – Mesure de la conductivité



FIGURE 3.6 – Échantillon avant apparition de sels



FIGURE 3.7 – Échantillon après apparition de sels

3.5 Résultats et interprétations

3.5.1 Volume récupéré

Ci-dessous, vous trouverez un tableau récapitulant les résultats des différentes expériences :

TABLE 3.5 – Résultats des expériences

Échantillon	Conductivité (mS)	Volume (ml)
1	2.17	71.2
	2.17	70.3
	2.17	70.6
2	2.23	68.7
	2.23	69.1
	2.23	70
3	1.98	72.2
	1.98	71.5
	1.98	71.8
4	1.75	75.4
	1.75	74.2
	1.75	74.7

3.5.2 Interprétation

Suite à l'analyse des résultats obtenus, il a été observé qu'en moyenne un volume de 70 ml peut être récupéré à partir de 500 ml, représentant ainsi 14 % d'un litre. L'entreprise rejete quotidiennement une quantité moyenne de 500 mètres cubes d'eau. Sur cette base, il est estimé qu'elle pourrait récupérer jusqu'à 77 m^3 d'eau par jour.

Cependant, étant donné la nature de l'expérience qui présente une certaine imprécision, ainsi que par souci de précaution, il est recommandé de viser une récupération de 70 mètres cubes par jour, soit une moyenne de 3 mètres cubes par heure.

3.6 Conclusion

Pour conclure, suite à notre analyse au laboratoire, nous préconisons à l'entreprise de récupérer 70 m^3/j . Toutefois, étant limité par le nombre d'échantillons, il serait judicieux de réitérer l'expérience au minimum un mois pour avoir des résultats plus représentatifs de la qualité de l'eau et donc apporter plus de précisions quant au volume à réinjecter dans le cycle de traitement.

Conclusion générale

Après une analyse approfondie, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont révélé l'importance d'une différence de seulement 11 °C dans la production de vapeur, s'avère être un avantage majeur pour l'entreprise. Cette modification relativement simple a entraîné des économies substantielles, tant sur le plan énergétique que financier. En effet, nous avons pu économiser une quantité considérable de 990 $Nm^3/mois$ en termes d'énergie, ce qui se traduit par une réduction significative des coûts. Sur le plan financier, cela représente une économie mensuelle de 115520, 5DA, ce qui renforce la rentabilité de l'entreprise.

Il est important de souligner que l'impact de cette étude va au-delà des frontières de l'entreprise Fruital. Les conclusions obtenues et les mesures mises en place peuvent être facilement appliquées dans d'autres entreprises, ouvrant ainsi la voie à des améliorations notables des ressources hydriques et énergétiques dans l'ensemble du pays. Cette simplicité d'exécution permet une diffusion plus large des bonnes pratiques et des solutions identifiées, ce qui peut entraîner des avantages considérables pour le secteur industriel dans son ensemble.

Il convient de souligner que l'étude de certains paramètres physiques et la mise en œuvre de mesures efficaces ont un impact non seulement sur le système de production, mais aussi sur l'environnement. En réduisant notre consommation, nous réduisons également notre empreinte environnementale, contribuant ainsi à une utilisation plus durable des ressources naturelles. Les économies réalisées en matière d'énergie et de ressources hydriques permettent de préserver ces ressources précieuses, contribuant ainsi à une gestion plus responsable et respectueuse de l'environnement.

De surcroît, cette étude a mis en évidence un aspect crucial, à savoir la valorisation de l'eau. Une simple analyse de l'eau a révélé une opportunité de valoriser une quantité extrêmement importante, soit 70 m^3/j . En explorant davantage cette possibilité, il est possible d'optimiser l'utilisation de l'eau, en la réutilisant de manière efficace et en minimisant les pertes. Cela contribue non seulement à la préservation des ressources hydriques, mais aussi à une utilisation plus rationnelle et durable de cette ressource vitale.

En conclusion, les résultats de cette étude démontrent clairement l'importance de l'optimisation des paramètres physiques dans la production de vapeur. Les économies réalisées en termes d'énergie et de coûts financiers sont significatives, mais elles ne représentent qu'une partie de l'impact global. En partageant ces connaissances et en mettant en œuvre des solutions similaires dans d'autres entreprises, nous pouvons contribuer à une amélioration substantielle des ressources hydriques et énergétiques à l'échelle nationale. L'accent mis sur la valorisation de l'eau souligne également l'importance d'une approche holistique en matière de gestion des ressources, qui prend en compte à la fois les aspects économiques, environnementaux et sociaux. En adoptant ces pratiques durables, nous pouvons progresser vers un avenir plus responsable et résilient sur le plan énergétique et environnemental.

Bibliographie

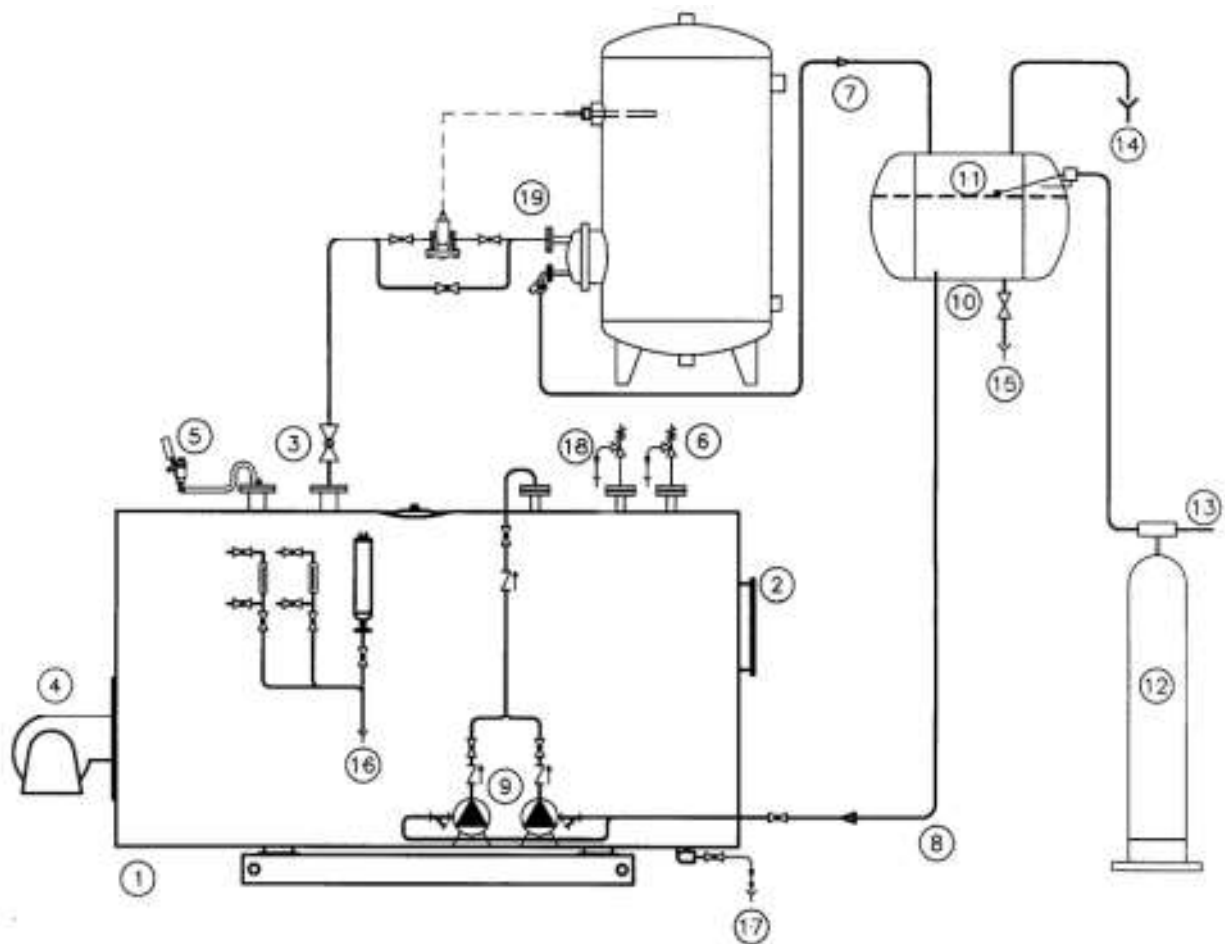
- [1] Wang, Lawrence K, Jiaping Paul Chen, Yung Tse Hung, Nazih K Shammass et Humana Press Inc: *Membrane and Desalination Technologies*. Totowa Humana Press, 2016.
- [2] DOW: *Information sur le produit BW30-400*. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-BW30-400.pdf>.
- [3] MTCB: *Notice technique, Générateur de vapeur*, 2015. https://www.mtcbsa.com/wp-content/uploads/2015/08/FR_GX2.pdf.
- [4] GARNIER, Alin: *Classification, évolution et rendement*, 25/11/2015. <https://formation.xpair.com/essentiel-genie-climatique/lire/classification-des-chaudieres.htm>.
- [5] Smith, Joseph Mauk, Hendrick C Van Ness, Michael M Abbott et Mark Thomas Swihart: *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw-Hill Singapore, 1949.
- [6] Atkins, Peter, Peter William Atkins et Julio de Paula: *Atkins' physical chemistry*. Oxford university press, 2014.
- [7] Beriach, M'hamed: *Thermodynamique appliquée*, 01/05/2014. https://www.researchgate.net/publication/309188235_Thermodynamique_Appliquee.
- [8] Marangwanda, Garikai T, Daniel M Madyira, Patrick G Ndungu et Chido H Chihobo: *Combustion characterisation of bituminous coal and pinus sawdust blends by use of thermogravimetric analysis*. *Energies*, 14(22) :7547, 2021.
- [9] Rajput, RK: *Engineering thermodynamics : A computer approach (si units version)*. Jones & Bartlett Publishers, 2009.
- [10] Yunus A. Çengel y et Michael A. Boles: *Thermodynamics : An Engineering Approach, 5th edition*. McGraw-Hill, 2005.
- [11] Maurel, Alain: *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. Éditions Tec & Doc, 2001.
- [12] R. Gicquel, Ecole des mines ParisTech: *Cours en ligne et simulateur de thermodynamique appliquée*, 2023. <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thoip/fr/co/seance-s25-cycles.html>, visité le 2023-06-28.
- [13] University, Wayne State: *Thermodynamics Tables and Charts*. https://engineering.wayne.edu/mechanical/pdfs/thermodynamic-_tables-updated.pdf.
- [14] PROGRESS, Bureau d'étude: *Etude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie*, décembre 2016. http://projet.oss-online.org/maghreb-eau/sites/default/files/2020-01/Rapport-GIZ-Final_ALGERIE_0%20%283%29.pdf, visité le 2023-06-27.
- [15] Mosher, Michael et Paul Kelter: *An Introduction to Chemistry*. Springer Nature, mars 2023.
- [16] Boyd, Claude E: *Water Quality*. Springer Science & Business Media, décembre 2012.
- [17] Scott, K: *Handbook of industrial membranes*. Elsevier Advanced Technology, 2006.

- [18] Zaidi, Syed Javaid et Haleema Saleem: *Reverse Osmosis Systems*. Elsevier, décembre 2021.
- [19] Escobar, Isabel C et Andrea I Schafer: *Sustainable Water for the Future : Water Recycling Versus Desalination (Sustainability science and engineering, v. 2)*. Elsevier, 2010.
- [20] Khezzane Anouar, Ahmouda Ilies, Souda El Mekki: *Etude des propriétés du gaz naturel traité destiné Aux procédés de liquéfaction de ce gaz*. Mémoire de maîtrise, Université Echahid Hamma Lakhdar. EL Oued. Faculté de Technologie, 2021.
- [21] Desjardins, R.: *Le traitement des eaux*. Presses internationales Polytechnique, 1997, ISBN 9782553006432. <https://books.google.dz/books?id=i3Jnfi13pQwC>.

Annexes

Annexe A

Schéma de l'installation de la chaudière



LEGENDE

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Chaudière | 10. Bûche récupération condensats |
| 2. Cheminée | 11. Niveau eau |
| 3. Prélèvement vapeur | 12. Dépurateur d'eau |
| 4. Brûleur | 13. Réseau hydraulique |
| 5. Pressostats | 14. Purgeur |
| 6. Clapets de sûreté | 15. Purgue bûche récupération condensats |
| 7. Retour condensat | 16. Purgue indicateurs de niveau |
| 8. Alimentation électropompe | 17. Purgue chaudière |
| 9. Pompes alimentaire | 18. Purgue clapets de sûreté |
| | 19. Exemple d'utilisation |

FIGURE 8 – Schéma détaillé de l'installation d'une chaudière [3]

Annexe B

Calculs de la température de combustion

Les cases rouges représente les valeurs des H_P inférieurs aux valeurs recherchées, celles-ci doivent être supérieures ou égales au H_R afin d'avoir une approximation de la température des flammes.

T	CO2	H2O	N2	O2	GX 6000	GX 3000	GX 2200
220	6601	7295	6391	6404	-1083639,2	-1080285,6	-1086992,6
230	6938	7628	6683	6694	-1077775,0	-1074850,7	-1080699,1
240	7280	7961	6975	6984	-1071904,6	-1069409,5	-1074399,5
250	7627	8294	7266	7275	-1066040,9	-1063974,2	-1068107,4
260	7979	8627	7558	7566	-1060156,4	-1058519,3	-1061793,4
270	8335	8961	7849	7858	-1054277,8	-1053069,3	-1055486,1
280	8697	9296	8141	8150	-1048374,7	-1047596,2	-1049153,2
290	9063	9631	8432	8443	-1042479,8	-1042130,3	-1042829,3
298	9364	9904	8669	8682	-1037674,2	-1037674,2	-1037674,2
300	9431	9966	8723	8736	-1036582,3	-1036661,8	-1036502,8
310	9807	10302	9014	9030	-1030671,1	-1031179,9	-1030162,3
320	10186	10639	9306	9325	-1024737,8	-1025677,4	-1023798,3
330	10570	10976	9597	9620	-1018812,8	-1020182,1	-1017443,7
340	10959	11314	9888	9916	-1012877,8	-1014677,0	-1011078,7
350	11351	11652	10180	10213	-1006923,0	-1009153,6	-1004692,5
360	11748	11992	10471	10511	-1000970,4	-1003631,6	-998309,4
370	12148	12331	10763	10809	-995001,8	-998094,7	-991909,1
380	12552	12672	11055	11109	-989020,7	-992545,9	-985495,7
390	12960	13014	11347	11409	-983032,3	-986989,9	-979075,0
400	13372	13356	11640	11711	-977021,3	-981413,0	-972629,9
410	13787	13699	11932	12012	-971020,4	-975844,8	-966196,4
420	14206	14043	12225	12314	-964996,2	-970254,6	-959738,0
430	14628	14388	12518	12618	-958962,9	-964656,1	-953270,0
440	15054	14734	12811	12923	-952920,9	-959049,2	-946793,0
450	15483	15080	13105	13228	-946860,5	-953425,0	-940296,5
460	15916	15428	13399	13525	-940802,6	-947800,9	-933804,9
470	16351	15777	13693	13842	-934710,0	-942148,2	-927272,3
480	16791	16126	13988	14151	-928608,5	-936485,3	-920732,3
490	17232	16477	14285	14460	-922472,2	-930789,9	-914155,0
500	17678	16828	14581	14770	-916342,6	-925100,4	-907585,4
510	18126	17181	14876	15082	-910217,6	-919415,0	-901020,9
520	18576	17534	15172	15395	-904074,0	-913712,4	-894436,3
530	19029	17889	15469	15708	-897907,6	-907988,2	-887827,7
540	19485	18245	15766	16022	-891733,7	-902256,7	-881211,3
550	19945	18601	16064	16338	-885537,1	-896504,5	-874570,6
560	20407	18959	16363	16654	-879319,0	-890731,8	-867907,1
570	20870	19318	16662	16971	-873095,9	-884954,4	-861238,2
580	21337	19678	16962	17290	-866848,0	-879154,0	-854542,8
590	21807	20039	17262	17609	-860594,0	-873347,5	-847841,3
600	22280	20402	17563	17929	-854315,7	-867518,2	-841114,1
610	22754	20765	17864	18250	-848034,6	-861686,5	-834383,7
620	23231	21130	18166	18572	-841729,2	-855831,9	-827627,6
630	23709	21495	18468	18895	-835421,1	-849974,8	-820868,4
640	24190	21862	18772	19219	-829074,0	-844081,4	-814067,6
650	24674	22230	19075	19544	-822734,0	-838194,3	-807274,8
660	25160	22600	19380	19870	-816356,4	-832272,1	-800441,6
670	25648	22970	19685	20197	-809974,7	-826346,3	-793604,2
680	26138	23342	19991	20524	-803571,4	-820400,0	-786744,0

FIGURE 9 – Calculs de la température de combustion

690	26631	23714	20297	20854	-797159,9	-814446,4	-779874,6
700	27125	24088	20604	21184	-790728,1	-808473,6	-772983,7
710	27622	24464	20912	21514	-784273,4	-802479,1	-766068,8
720	28121	24840	21220	21845	-777814,7	-796481,0	-759149,6
730	28622	25218	21529	22177	-771332,9	-790461,2	-752205,8
740	29124	25597	21839	22510	-764831,5	-784423,3	-745241,0
750	29629	25977	22149	22844	-758322,6	-778378,2	-738268,4
760	30135	26358	22460	23178	-751795,6	-772316,2	-731276,5
770	30644	26741	22772	23513	-745244,3	-766231,3	-724258,8
780	31154	27125	23085	23850	-738671,9	-760127,1	-717218,2
790	31665	27510	23398	24186	-732097,5	-754020,6	-710175,9
800	32179	27896	23714	24523	-725471,9	-747866,7	-703078,6
810	32694	28284	24027	24861	-718882,7	-741746,0	-696021,0
820	33212	28672	24342	25199	-712260,7	-735594,8	-688928,1
830	33730	29062	24658	25537	-705619,5	-729425,6	-681814,9
840	34251	29454	24974	25877	-698967,1	-723245,8	-674689,9
850	34773	29846	25292	26218	-692282,7	-717036,7	-667530,4
860	35296	30240	25610	26559	-685592,6	-710821,9	-660365,0
870	35821	30635	25928	26899	-678899,3	-704603,5	-653196,8
880	36347	31032	26248	27242	-672166,5	-698348,9	-645985,8
890	36876	31429	26568	27584	-665431,5	-692091,8	-638772,9
900	37405	31828	26890	27928	-658659,8	-685800,9	-631520,4
910	37935	32228	27210	28272	-651913,7	-679533,4	-624295,9
920	38467	32629	27532	28616	-645133,8	-673234,3	-617035,2
930	39000	33032	27854	28960	-638348,1	-666929,4	-609768,6
940	39535	33436	28178	29306	-631525,5	-660590,6	-602462,3
950	40070	33841	28501	29652	-624715,2	-654262,9	-595169,4
960	40607	34247	28826	29999	-617869,4	-647902,4	-587838,4
970	41145	34653	29151	30345	-611024,0	-641541,9	-580508,1
980	41685	35061	29476	30692	-604170,0	-635173,2	-573168,9
990	42226	35472	29803	31041	-597275,8	-628767,2	-565786,5
1000	42769	35882	30129	31389	-590397,5	-622375,7	-558421,5
1020	43859	36709	30784	32088	-576571,9	-609527,9	-543618,1
1040	44953	37542	31442	32789	-562680,9	-596618,9	-528745,2
1060	46051	38380	32101	33490	-548759,2	-583680,3	-513840,4
1080	47153	39223	32762	34194	-534787,5	-570695,0	-498882,4
1100	48258	40071	33426	34899	-520755,5	-557653,2	-483860,3
1120	49369	40923	34092	35606	-506674,9	-544565,7	-468786,6
1140	50484	41780	34760	36314	-492547,3	-531433,9	-453663,3
1160	51602	42642	35430	37023	-478374,0	-518259,0	-438491,7
1180	52724	43509	36104	37734	-464123,2	-505011,9	-423237,2
1200	53848	44380	36777	38447	-449872,4	-491764,2	-407983,4
1220	54977	45256	37452	39162	-435571,9	-478469,8	-392676,9
1240	56108	46137	38129	39877	-421228,5	-465134,8	-377325,2
1260	57244	47022	38807	40594	-406852,3	-451768,8	-361938,8
1280	58381	47912	39488	41312	-392418,3	-438348,8	-346490,9
1300	59522	48807	40170	42033	-377948,9	-424895,5	-331005,5
1320	60666	49707	40853	42753	-363451,5	-411415,0	-315491,2
1340	61813	50612	41539	43475	-348892,3	-397876,8	-299911,1

FIGURE 10 – Calculs de la température de combustion

1360	62963	51521	42227	44198	-334289,6	-384297,8	-284284,8
1380	64116	52434	42915	44923	-319671,2	-370703,7	-268642,2
1400	65271	53351	43605	45648	-305012,2	-357071,2	-252956,6
1420	66427	54273	44295	46374	-290339,1	-343425,1	-237256,6
1440	67586	55198	44988	47102	-275608,7	-329725,7	-221495,3
1460	68748	56128	45682	47831	-260847,3	-315996,8	-205701,4
1480	66911	57062	46377	48561	-249817,0	-306000,5	-193637,3
1500	71078	57999	47073	49292	-231243,8	-288462,8	-174028,7
1520	72246	58942	47771	50024	-216382,8	-274639,8	-158129,7
1540	73417	59888	48470	50756	-201496,6	-260792,9	-142204,3
1560	74590	60838	49168	51490	-186610,5	-246945,5	-126279,6
1580	76767	61792	49869	52224	-170414,2	-231791,3	-109041,1
1600	76944	62748	50571	52961	-156699,2	-219120,7	-94282,0
1620	78123	63709	51275	53696	-141691,9	-205159,3	-78228,7
1640	79303	64675	51980	54434	-126652,9	-191168,4	-62141,7
1660	80486	65643	52686	55172	-111591,1	-177155,8	-46030,8
1680	81670	66614	53393	55912	-96503,7	-163119,5	-29892,4
1700	82856	67589	54099	56652	-81419,4	-149085,0	-13758,3
1720	84043	68567	54807	57394	-66294,9	-135013,3	2418,9
1740	85231	69550	55516	58136	-51143,3	-120915,7	18624,4
1760	86420	70535	56227	58880	-35953,8	-106783,1	34870,7
1780	87612	71523	56938	59624	-20753,8	-92640,0	51127,6
1800	88806	72513	57651	60371	-5513,1	-78459,4	67428,4
1820	90000	73507	58363	61118	9722,0	-64283,3	83722,4
1840	91196	74506	59075	61866	24972,4	-50092,2	100032,0
1860	92394	75506	59790	62616	40274,3	-35853,8	116397,3
1880	93593	76511	60504	63365	55572,6	-21617,4	132757,5
1900	94793	77517	61220	64116	70906,6	-7348,3	149156,3

FIGURE 11 – Calculs de la température de combustion

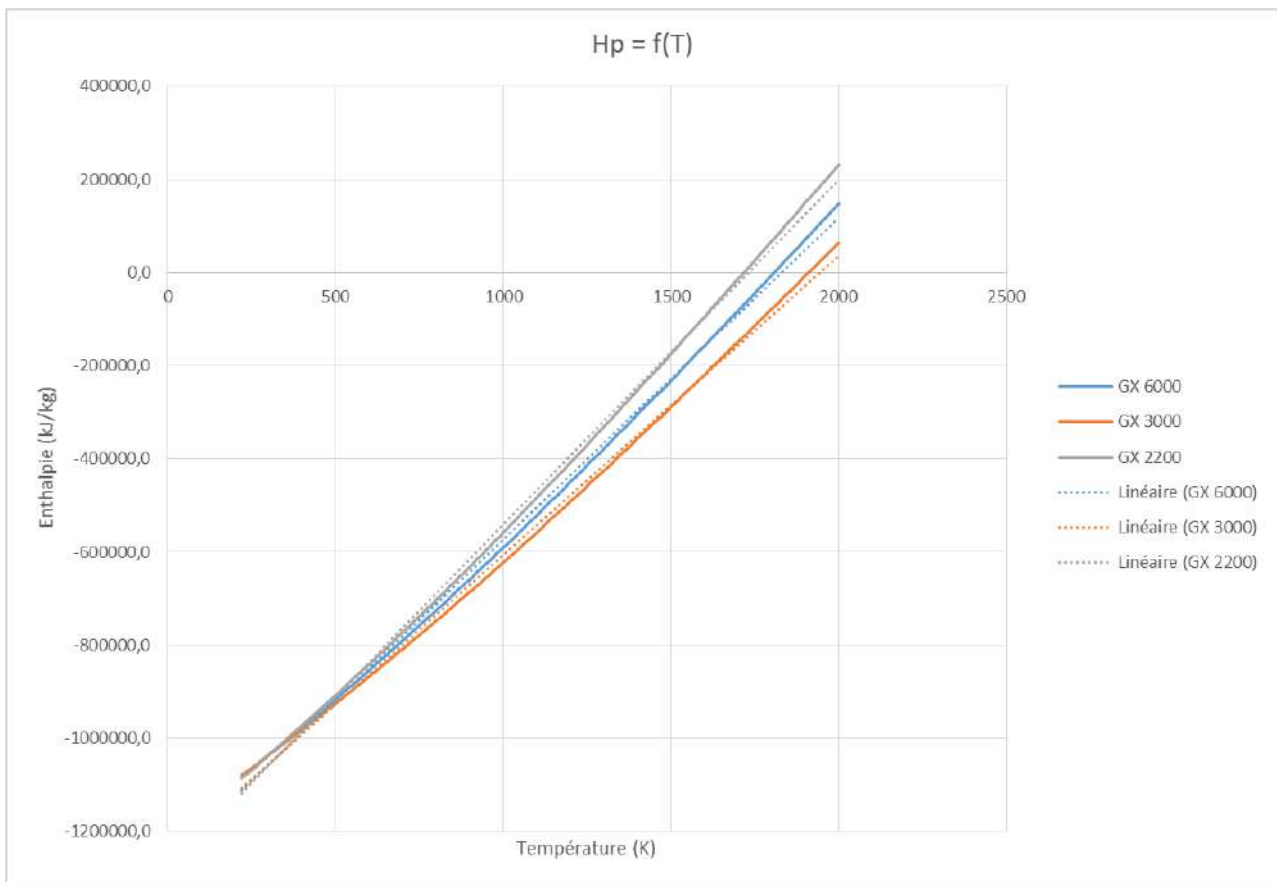


FIGURE 12 – Evolution de l’enthalpie des produits des différentes chaudières en fonction de la température

Annexe C

Schéma de l'installation traitement des eaux

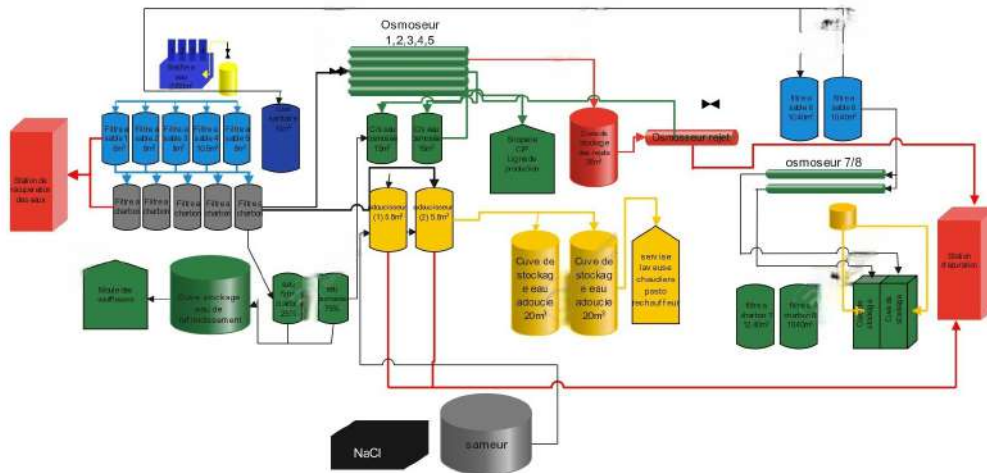


FIGURE 13 – Processus de traitement des eaux