



Année Universitaire : 2020-2021



Licence Sciences et Techniques en Génie Industriel

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
Pour l'Obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

# Calcul du rapport calorifique d'un échangeur thermique

Lieu : Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord  
Référence : 18/21-LST

Présenté par:

**EL ALAMI EL FERRICHA Oualid**

Soutenu Le 06 Juillet 2021 devant le jury composé de:

- Mr. **CHERKANI HASSANI Mohammed** (encadrant FST Fès)
- Mr. **BELKACEM Lahbouj** (encadrant Société)
- Mr. **SQALLI HOUSSAINI Driss** (examineur FST Fès)

## *Avant – propos :*

Dans le cadre de notre formation à la Faculté des Sciences et Techniques Fès, filière Génie Industriel, nous sommes amenés à effectuer des stages techniques, pratiques et projets de fin d'étude, au sein des différentes entreprises, pour enrichir nos connaissances théoriques acquises pendant nos études

Grâce à son rôle essentiel au développement économique du Maroc et sa réputation internationale, la Compagnie de Boissons Gazeuses du Nord était mon favorable choix pour passer ce stage.

## *Dédicace :*

Je profite de cette occasion pour dédier ce travail :

A mes chers parents qui ne cessent de m'encourager, j'espère que mon travail sera le témoignage de mes sentiments les plus respectueux pour eux

A mon encadrant Mr Belkacem Lahbouj et toutes personnes de la compagnie des boissons gazeuses du Nord.

A mes collègues, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et qui ont aidé la réussite de mon stage

## *Remerciement*

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon professeur et mon encadrant Mr Mohammed Cherkani Hassani pour son écoute et ses conseils qui m'ont permis de bien avancer.

Je tiens à remercier vivement mon encadrant de stage à la Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN), Mr Kacem lahbouj Chef de production au sein de la compagnie des boissons gazeuses du nord pour son accueil, son encadrement et le partage de son expérience. Grâce aussi à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Il fut d'une aide précieuse.

Je remercie également le membre du jury, le Professeur Sqalli pour sa présence et pour l'examen de mon rapport de stage ainsi que les remarques qui donnera lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail

D'une façon générale, je tiens à remercier tous les profs qui m'ont formé durant ces trois ans de licence, je tiens aussi à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance à tout le personnel de la CBGN, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils m'ont fait vivre durant cette période de stage

## Sommaire :

### Introduction générale

### CHAPITRE I : Présentation de la Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN)

<b>Introduction</b> .....	10
1. Historique de la CBGN .....	10
2. Organigramme de la CBGN .....	11
3. Fiche technique .....	11
4. Services de la CBGN .....	12
5. Activités de l'entreprise .....	13
<b>Conclusion</b> .....	14

### Chapitre II : Production à la CBGN

<b>Problématique</b> .....	15
<b>1-Etapes de production à la CBGN</b> .....	15
1.1 Traitement des eaux à la CBGN .....	15
2.2 Procédé de traitement d'eau à la CBGN .....	16
<b>2-Préparation du sirop au sein de la CBGN</b> .....	18
2.1 Préparation du sirop simple .....	18
2.2 Préparation du sirop fini .....	19
<b>3-Mixage</b> .....	20
3.1 Fabrication de la boisson à travers la ligne de verre .....	20
3.2 Fabrication de la boisson à travers la ligne pet .....	22
<b>Conclusion</b> .....	23

### Chapitre III : Le rapport calorifique d'un échangeur thermique

<b>1-Introduction</b> .....	24
<b>2-Généralités</b> .....	24
2.1-Transfert Thermique .....	24
2.2-Définition .....	24
2.3-Modes de transfert thermique .....	24
<b>3-Echangeur de chaleur</b> .....	25

3.1-Definition.....	25
3.2-Types d'échangeur de chaleur .....	25
<b>4-Conditions de fonctionnement des échangeurs de chaleur .....</b>	<b>26</b>
4.1- Hypothèses .....	26
4.2- Distribution de la température dans l'échangeur de chaleur .....	27
<b>5-Description de l'échangeur U225 .....</b>	<b>28</b>
<b>6-Bilan thermique de l'échangeur.....</b>	<b>28</b>
6.1-But de calcul.....	28
6.2-Equation fondamentale.....	29
6.3-Calcul thermique de l'échangeur .....	29
6.4-Calcul de la différence logarithmique moyenne de température $\Delta T_{lm}$ .....	31
6.5-Correction de la différence logarithmique moyenne de température $\Delta T_{lm}$ .....	31
6.6-Calcul du flux échangé.....	32
6.7-Calcul du coefficient d'échange global $U_o$ .....	32
6.8-Calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi $h_f$ .....	33
6.9- Calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi $h_c /$ .....	35
<b>7- Calcul de l'efficacité de l'échangeur.....</b>	<b>36</b>
<b>8-Calcul du rendement de l'échangeur.....</b>	<b>37</b>
<b>9- Elaboration Du modèle de calcul de l'échangeur sur Excel .....</b>	<b>37</b>
9.1- Calcul de l'efficacité sans tubes bouchant .....	39
9.2- Calcul de l'efficacité avec tubes bouchant .....	40
9.3-Interprétation du résultat .....	40
<b>Conclusion.....</b>	<b>40</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>41</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>42</b>

## *liste des figures*

- Figure 1 : L'organigramme de la Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN)
- Figure 2 : Processus de la production à la CBGN
- Figure 3 : Procédé de traitement d'eau à la CBGN
- Figure 4 : Etape de préparation de sirop simple
- Figure 5 : Etape de préparation de sirop fini
- Figure 6 : Etape de production pour la ligne de verre
- Figure 7 : Echangeur à tubes et à calandre
- Figure 8 : Echangeur à plaques
- Figure 9 : Graphe d'écoulement d'échangeur à courant parallèle et à contre-courant
- Figure 10 : Schéma d'échangeur de forme U
- Figure 11 : Graphe de facteur de correction
- Figure 12 : Graphe de facteur de correction obtenu à l'aide d'un abaque
- Figure 13 : schéma de principe d'un échangeur de chaleur
- Figure 14 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité  $\epsilon$  sans tubes bouchés
- Figure 15 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité  $\epsilon$  avec tubes bouchés

## *liste des tableaux*

- Tableau 1 : Catégorie de traitement selon l'eau concerné
- Tableau 2 : Tableau des caractéristiques des fluides
- Tableau 3 : Tableau des caractéristiques de l'échangeur faisceau calandre
- Tableau 4 : Tableau de calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi  $h_f$
- Tableau 5 : Tableau de calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi  $h_c$

## *Liste d'abréviation*

P : le pas triangulaire

B : espacement des chicanes

ec : épaisseur des chicanes

Cp : Chaleur spécifique du fluide chaud

$\mu_c$  : viscosité dynamique coté calandre

$\lambda_c$  : conductivité thermique coté calandre (fluide chaud)

$\rho$  : masse volumique

De : le diamètre extérieur des tubes

Re : Nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement des fluides

Pr : Nombre de Prandtl caractérise l'influence de la nature du fluide sur le transfert de chaleur par convection

$\lambda_f$  : conductivité thermique coté tube (fluide froid)

cp : Chaleur spécifique du fluide froid

M : débit massique du fluide froid

Di : Diamètre intérieur des tubes

$\mu_f$  : viscosité dynamique coté tube

Nu : le nombre de Nusslet

## *Introduction générale :*

Ce stage a été effectué au sein de la Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN)

Le projet se porte sur le calcul du rapport calorifique d'un échangeur thermique afin de contrôler le rendement énergétique des différentes installations et mettre en place certains aspects d'amélioration

Ce rapport est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre décrira le contexte général du projet et présentera l'organisme d'accueil où je vais décrire brièvement les différentes unités de l'usine de production des boissons gazeuses.

-Le deuxième chapitre fera l'objet d'une description générale sur le processus de fabrication et les principales phases de la chaîne de production.

-Le troisième chapitre décrira en générale des échangeurs thermiques, de présenter l'échangeur en question dans mon étude, d'en faire une étude calorifique et d'émettre des propositions sur certains points d'améliorations au niveau de l'installation, des équipements et de l'exploitation.

-Une conclusion générale résumera les résultats de travail

## Chapitre I

:

Présentation de la Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN)

## **Introduction :**

La Compagnie des boissons gazeuses du nord (CBGN) est une société anonyme qui a été créée en 1952, composée de 7 directions, elle présente plusieurs services, et parmi ces derniers il y a le service production qui nous intéresse pour notre projet.

### **1-Historique de la CBGN :**

- ❖ La CBGN (Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord) est une société qui a pour activité principale la production et le conditionnement des boissons gazeuses. Sa première mise en place à Fès était en 1952 à la place actuelle de l'hôtel Sofia, après 19 ans une nouvelle unité construite au quartier industriel Sidi Brahim.
- ❖ De 1952 à 1989, la Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord limite sa production au Coca-cola et Fanta orange mais après, et pour augmenter sa part du marché, la compagnie a décidé la diversification de ses produits, elle a commencé de produire Fanta Lemon, Hawaiï tropical et Sprite.
- ❖ En 1992, la CBGN a lancé les bouteilles plastiques PET, elle a même acheté une nouvelle machine avec une grande capacité (plus de 6000 bouteilles par heure, rapide et qui effectue plusieurs tâches au même temps (soufflage, rinçage, soutirage, bouchage et datage).
- ❖ En 1997, elle acquiert la (Société Industrielle Marocaine) SIM principale concurrent lui permettant ainsi d'augmenter sa capacité de production et d'élargir sa gamme de produits.
- ❖ En 2002, la CBGN devient filiale de l'Equatorial Coca-Cola Bottling Compagnie (ECCBC) et par la suite de Coca-Cola Holding.
- ❖ En 2013/2014, la CBGN arrête la production des bouteilles en plastiques PET

[1]

## 2-Organigramme :

La figure 1 représente l'organigramme de la CBGN :

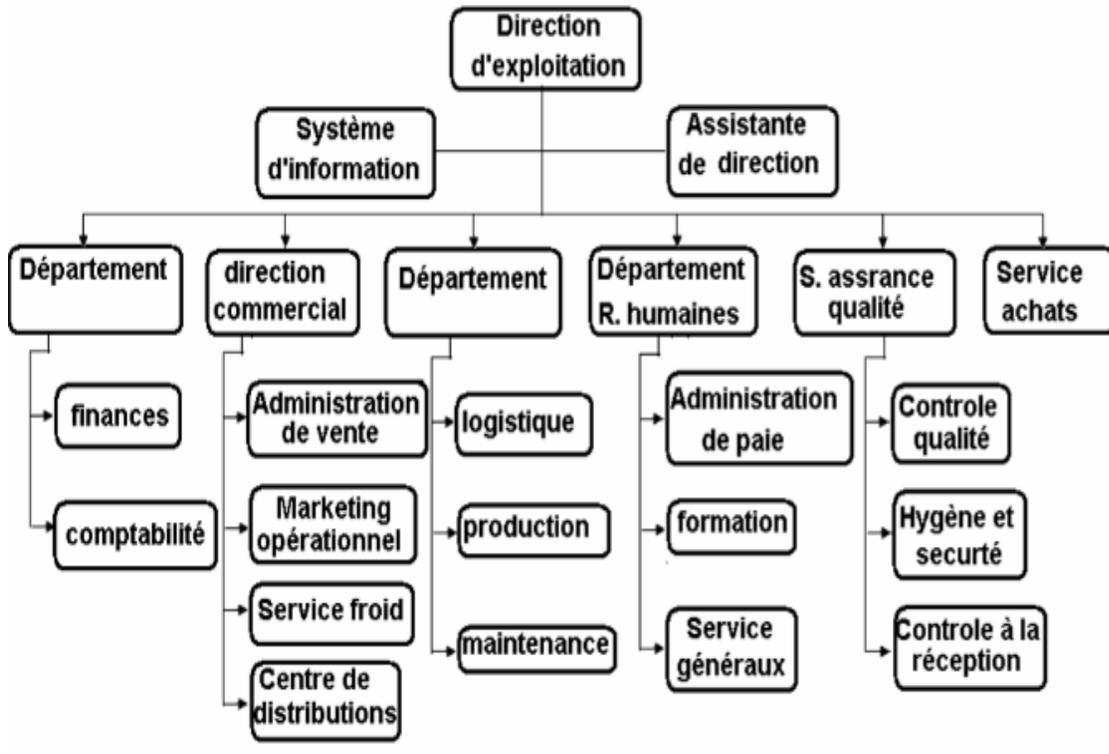


Figure 1 : L'organigramme de la CBGN

## 3-Fiche technique :

La fiche suivante représente la fiche technique de la société CBGN

- ✓ Raison social : Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord
- ✓ Forme juridique : Société anonyme
- ✓ Capital social : 3 720 000 DH
- ✓ Activité : Embouteillage et distribution des boissons Gazeuses non alcoolisées
- ✓ Secteur d'activité : Agroalimentaire
- ✓ Adresse : Q. I Sidi Brahim – Fès
- ✓ Téléphone : 0535 96 50 00
- ✓ Fax : 0535 96 50 25
- ✓ Date de création : 26 juin 1953
- ✓ Patente : 13245421
- ✓ Identifiant fiscale : 102054

- ✓ N°RC : 11 286 N° CNSS : 1349952
- ✓ Effectif de la CBGN :

[1]

#### 4-Services de la CBGN :

La répartition des départements selon les services est détaillée comme suit :

- Département Administratif : Services Informatique, Comptabilité, Financier et Achats.
- Département Technique : Services Contrôle de Qualité, Production et Maintenance.
- Département Commercial : Services Opérations, Administration des Ventes, et Magasin et Articles Publicitaires.
- Département des Ressources Humaines : Services Paie, Personnel et Formation.

#### 5-Activités de la CBGN :

L'activité principale de la CBGN est constituée par la production et la distribution des boissons gazeuses. A cet effet, nous avons jugé judicieux de donner quelques éclaircissements sur ces deux composantes principales de cette société :

- **La production** : Au Maroc, NABC dispose de 05 unités de production regroupant des lignes de verres ; de PET ; de boîtes ; de post-mix. Ces produits sont distribués dans : Le Nord (territoire de Fès) ; le centre (territoire de Casablanca) ; le sud du Maroc (territoire de Marrakech) ; et la Mauritanie.
- **La distribution** : la distribution est organisée autour de deux systèmes :
  - **Le système conventionnel** : Dans ce système, les livreurs visitent les points de ventes pour la distribution des produits et la prise de commande.
  - **Le système de la prévente** : Les tâches de prise de commandes et la livraison sont séparées.

En général, l'activité de la CBGN peut être résumée comme suite :

- ☞ L'achat concentré des boissons gazeuses telles que Coca-Cola, SPRITE
- ☞ La production et la mise en bouteilles.
- ☞ La commercialisation et la distribution des produits. [1]

## **Conclusion:**

Les différents services et activités cités dans le premier chapitre montre que la compagnie des boissons gazeuses du nord est une structure bien organisée sur tous les niveaux.

C'est une entreprise qui produit l'une des marques les plus connues sur à l'échelle mondiale, c'est pour cela que la CBGN doit suivre un certain nombre de normes de qualité et de production

## Chapitre II

:

Production à la Compagnie des boissons gazeuses du  
nord

## Problématique

Notre échangeur est alimenté par de la vapeur d'eau provenant de la chaudière.

La chaudière est un échangeur de chaleur qui permet de transformer l'eau en vapeur en utilisant la combustion comme source de chaleur.

Au sein de la CBGN la chaudière consomme du fioul qui un combustible dérivé de pétrole pour transformer l'eau en vapeur. Cette vapeur passe par des tubes jusqu'à l'arrivée à l'entrée de l'échangeur qui permet le transfert de chaleur à l'autre liquide.

Plusieurs paramètres peuvent faire varier l'efficacité de l'échangeur qui a un rôle primordial dans la production au sein de la CBGN comme par exemple, l'isolation des tuyauteries, l'âge de l'échangeur ou même son taux d'utilisation.

Le but de notre étude est de déterminer le rapport calorifique de cet échangeur afin de mieux situer son efficacité et estimer le bon fonctionnement de l'installation.

### 1-Etapes de la production :

Le processus de fabrication des boissons gazeuses à la CBGN passe par trois étapes principales comme le montre la figure 2

\*Traitement d'eau / recyclage

\*préparation du sirop

\*embouteillage en verre/pet

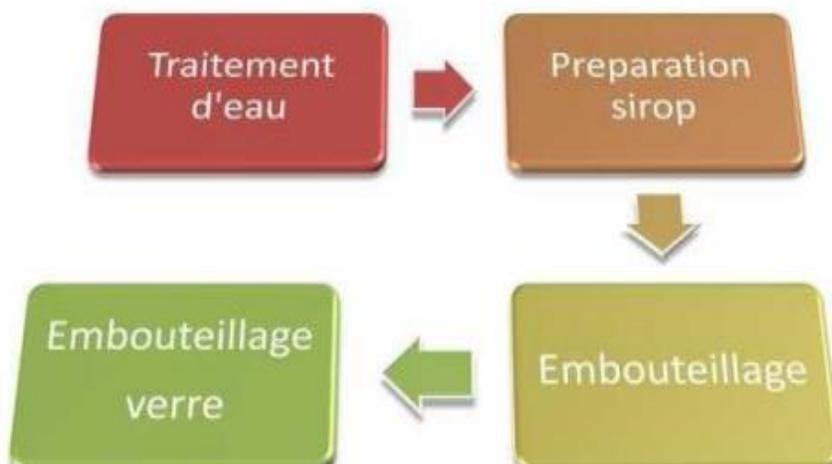


Figure 2 : Processus de la production à la CBGN

## 1,1-Traitement des eaux à la CBGN :

L'intérêt du traitement d'eau dans la production des boissons gazeuses est d'éliminer tous les constituants ayant un rôle dans l'impureté susceptible d'affecter le goût et l'aspect du produit. Parmi les constituants de l'eau qui joue un rôle nuisible à la qualité des boissons, on trouve :

**-MES (matières en suspension) :** ce sont les microparticules indésirables susceptible de provoquer une baisse rapide de la carbonatation et une formation de mousse lors du remplissage

**-Les matières organiques :** les eaux chargées de matières organiques peuvent entraîner la formation de collerette ou de floc dans la boisson quelques heures ou après la fabrication

**-Composés phosphorés :** Le phosphore est l'un des composants essentiels de la matière vivante.

**-L'alcalinité :** les bicarbonates, les carbonates ou les hydroxydes, peuvent donner un goût anormal au produit fini.

Afin de transformer l'eau de ville en une eau convenable à la production de la boisson, il faut la faire passer par plusieurs étapes de traitement.

## 1.2-Procédé de traitement d'eau dans la CBGN :

Cette préparation se fait en plusieurs étapes :(Figure 3)

On distingue trois catégories de traitement selon l'eau concerné comme le montre le tableau 1 :

Types d'eau	Utilisations
Eau traitée	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Préparation du sirop</li><li>➤ Préparation du produit fini</li><li>➤ Stérilisation et sanitation des équipements</li></ul>
Eau adoucie	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Lavage des bouteilles (verre et pet)</li><li>➤ Alimentation du compresseur de refroidissement</li></ul>
Eau recyclée	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Bain de soude</li><li>➤ Nettoyage de l'usine</li></ul>

Tableau 1 : Catégorie de traitement selon l'eau concerné

En ce qui concerne l'eau traitée, la CBGN dispose d'une installation importante qui est destinée au traitement d'eau, cette installation comprend :

Des bassins de chloration, des filtres à sable, un décarbonateur, des filtres polisseurs, des pompes pour la circulation de l'eau

En ce qui concerne l'eau adoucie, on peut dire que les laveuses des bouteilles et bien d'autres machines consomment des quantités importantes d'eau sous des températures relativement élevées, donc si on utilise l'eau de ville, ça va provoquer du tartre qui va empêcher le bon fonctionnement de ces équipements, pour cela il faut traiter ces eaux afin d'éviter la formation du tartre.

C'est l'opération d'adoucissement de l'eau, ça consiste en une permutation des ions  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  par  $Na^+$ , pour ce faire, on fait circuler l'eau à travers des résines cationiques de type  $Na_2R$ . Après une certaine durée d'utilisation, la résine se retrouve saturée, et nécessite par conséquent une régénération par une solution concentrée de  $NaCl$ .

La figure 3 représente le procédé de traitement d'eau au sein de la CBGN [1]

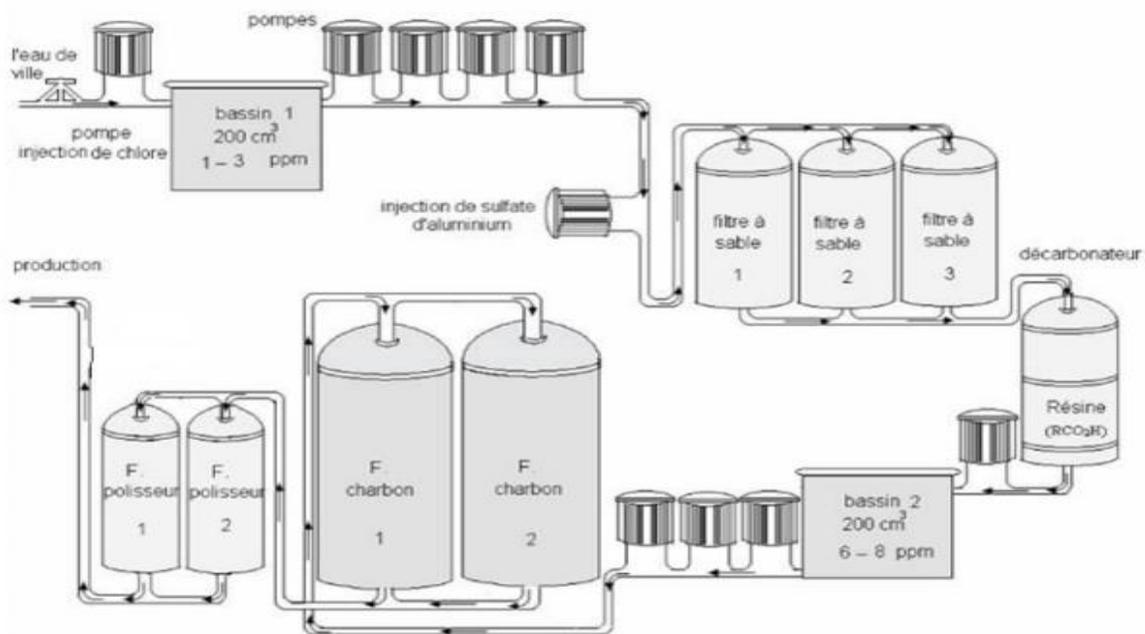


Figure 3 : Procédé de traitement d'eau dans la CBGN

## 2-Préparation du sirop :

Après avoir traité l'eau, on passe à une deuxième étape qui est la production de la boisson gazeuse, c'est la siroperie qui peut être subdivisée en 2 grandes parties :

La préparation du sirop simple et la préparation du sirop fini

### 2.1-Préparation du sirop simple :

Cette préparation s'effectue en plusieurs étapes : (Figure 4)

- **Tamissage** : le sucre utilisé sera tamisé pour éliminer les grands granules de sucre et laisser passer seulement le sucre poudre
- **Dissolution du sucre** : on mélange de l'eau chaude à une température de 60°C avec le sucre. Après on réalise une pasteurisation de ce mélange à une température de 85°C par l'effet d'échange thermique
- **Refroidissement du sirop simple** : le sirop simple subira un refroidissement progressif pour éviter l'éclatement des plaques en réalisant un échange thermique, le chaud vers le froid
- **Stockage** : on stocke notre sirop simple dans une cuve pour préparer du simple des sirops finis [1]

La figure 4 représente les étapes de préparation du sirop simple

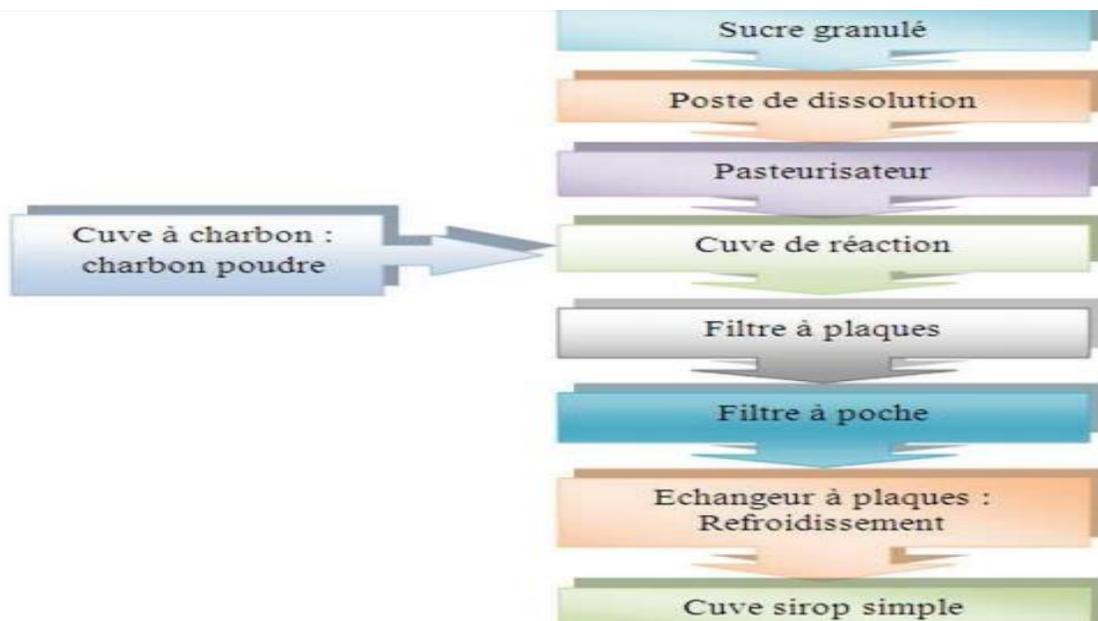


Figure 4 : Etape de préparation du sirop simple

## 2.2-Préparation du sirop fini :

Le sirop fini est un mélange de sirop simple et de sirop concentré appelé aussi extrait de base, qui est un mélange complexe d'arômes, d'acidifiants et de colorants, ce dernier est reçu, sous licence, dans de grands flacons.

La préparation du sirop fini commence par le contrôle des ingrédients du produit par un opérateur qui les introduit dans un récipient où se fait le mixage avec l'eau traitée, le mélange est ensuite envoyé à la cuve de sirop fini dans lequel s'effectue le mixage avec le sirop simple à l'aide d'une pompe qui maintient l'agitation pendant 30 min. Le produit obtenu repose dans les environs de 15 min afin d'assurer sa désaération puis contrôlé par l'opérateur qui veille sur sa conformité en réglant tous les paramètres en question à savoir la température, les degrés brix et bien d'autres paramètres.

Le sirop fini va être envoyé vers le mixeur [1]

La figure 5 ci-dessous représente les étapes de préparation du sirop fini



Figure 5 : Etape de préparation du sirop fini

## 3-Mixage :

Le mixage constitue la dernière phase de production de la boisson, cette étape consiste à mélanger le sirop fini avec l'eau traitée refroidie par l'eau glycolée et du gaz carbonique dans des proportions bien définies.

Cette unité est la dernière étape dans la fabrication des boissons gazeuses. Actuellement La CBGN possède deux lignes de production consacrées à la production des boissons dans des bouteilles en verre, et dans des bouteilles en plastique, cette opération se fait selon le processus suivant :

### 3,1-Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne de verre :

La fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne en verre passe par un enchaînement d'étapes qui sont :

**-Dé-palettisation** : Cette étape presque automatisée concerne la mise des caisses sur convoyeurs.

**-Décaissage** : Cette étape consiste à décaisser les bouteilles vides des caisses et les poser sur le convoyeur qui alimente la laveuse des bouteilles, et laisse échapper les caisses en destination de la laveuse des caisses.

**-Dévissage** : Cette étape concerne uniquement les Bouteille de verre, elle consiste à dévisser les bouteilles reçues par le moyen de deux capots dévisseurs.

#### **-Lavage**

**-Inspection visuelle et électronique des bouteilles lavées** : Les bouteilles lavées sont contrôlées d'abord par des mireurs bien formés et aptes visuellement afin d'éliminer toute bouteille mal lavée, Puis elles passent à travers une inspectrice électronique qui assure l'élimination de toute bouteille sale, ébréchée, ou contenant du liquide ou corps étranger.

**-Soutirage et bouchage/ vissage** : La boisson est mise en bouteilles par une soutireuse et seront ensuite bouchées.

**-Codage et contrôle du remplissage** : Un dateur est programmé à chaque début de production dont l'opération est d'imprimer sur les bouchons des bouteilles pleines:(La date de production, date de péremption, numéro de ligne de remplissage des bouteilles, centre et heure de production), puis les bouteilles vont passer par un détecteur de niveau puis devant des mireurs pour éliminer les bouteilles males remplies.

**-Étiquetage** : mise des étiquettes sur la bouteille sauf pour celle de Coca Cola en étant sérigraphique.

**-Encaissage et stockage** : C'est l'étape finale de la mise en caisse des bouteilles pleines et leur stockage. [1]

La figure 7 représente les étapes de production pour la ligne de verre

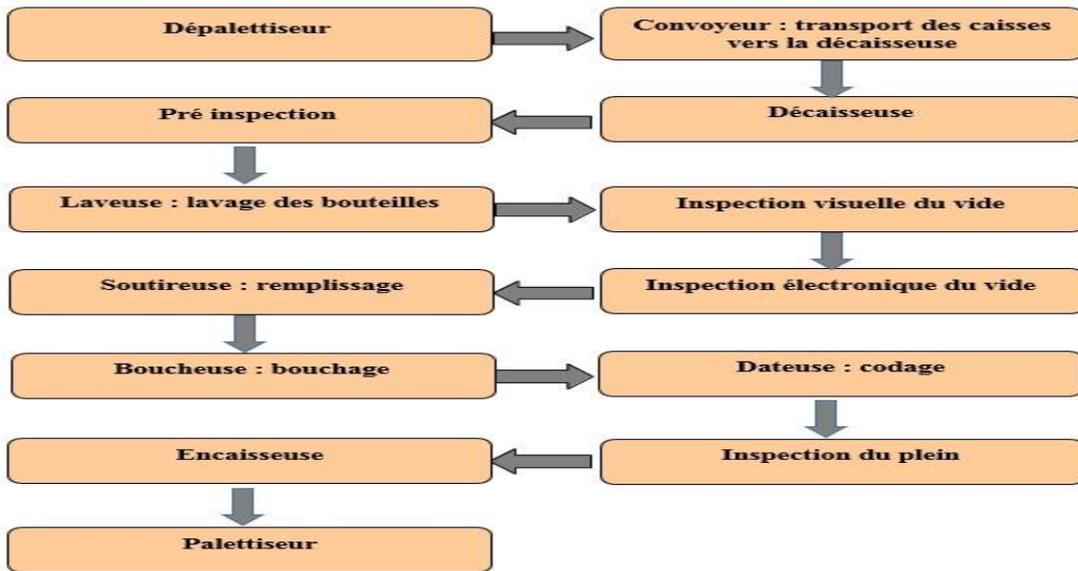


Figure 7 : Etape de production pour la ligne de verre

### 3.2-Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne PET :

La ligne PET pour la fabrication et le remplissage des bouteilles en plastique

- Elévateur préformes : les préformes se mettent dans une trémie pour les transporter vers la rampe d'alimentation grâce à un élévateur de préformes, puis des rouleaux démêleurs alignent les préformes le long de la rampe
- Souffleuse : une machine équipée d'un four linéaire à infrarouge qui chauffe les préformes jusqu'à une température de 186 C, ensuite ils passent par 3 étapes de soufflage :
  - ☞ Etape de pré-soufflage sous pression de 7 à 13 bars
  - ☞ Etape d'étirage : élongations des préformes
  - ☞ Etape de soufflage :
- Rinceuse : une machine de rinçage de la partie interne des bouteilles en PET
- Fardeleuse : une machine qui rassemble les bouteilles en PET sous forme de paquets de huit bouteilles chacun
- Bande rouleuse : un dispositif qui place les paquets de bouteilles sur la palette, sous forme de cinq étages [1]

## **Conclusion :**

La production à la compagnie des boissons gazeuses du nord passe par plusieurs étapes commençant par le traitement d'eau qui permet d'éliminer tous les constituants ayant un rôle dans l'impureté susceptible d'affecter le goût et l'aspect du produit. Et puis elle passe par l'étape de la siroperie qui se divise en deux parties : la préparation du sirop simple et du sirop fini et finalement le mixage avant d'arriver à la dernière étape qui est la mise en bouteille soit en utilisant la ligne pet ou bien la ligne de verre.

## Chapitre III

:

Rapport calorifique d'un échangeur thermique

## **1-Introduction :**

Pour toutes les activités industrielles au sein de la société, la vapeur d'eau est un élément principal et nécessaire pour la production des boissons gazeuses d'où le rôle primordial des échangeurs de chaleurs dans la CBGN.

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : La température, la pression des fluides, propriétés physiques de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

## **2-Généralités :**

### **2.1-Transfert de chaleur :**

Dans l'industrie, le transfert de chaleur se fait en général entre 2 fluides froid et chaud séparés par une paroi solide en inox

### **2.2-Définition :**

Un transfert thermique est le transfert d'énergie thermique d'une source à une autre, il se transmet spontanément de celui qui a la température la plus élevée à celui qui a la température la moins élevée .C'est un transfert d'énergie irréversible

### **2.3-Modes de transfert thermique :**

On distingue trois modes de transfert thermique :

-**La conduction** : échange de chaleur entre deux points d'un solide ou encore d'un liquide immobile.

L'énergie de la vibration se transmet d'atome à atome ou de molécule à molécule.

→ **La convection** : On parle de convection lorsqu'un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient. Ce mode de transfert implique un déplacement de matière dans le milieu.

→ **Le rayonnement** : correspond à l'ensemble des corps qui émettent du rayonnement thermique et sont eux-mêmes chauffés par le rayonnement thermique qu'ils absorbent. C'est le cas des rayons du soleil. Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel. [2]

### **3-Echangeurs de chaleur:**

#### **3.1-Définition:**

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides

#### **3.2-Types d'échangeurs de chaleur:**

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur

-**Echangeur tubulaire** : Ces échangeurs sont utilisés depuis de nombreuses années dans les sous-stations de chauffage urbain (eau surchauffée ou vapeur), pour la production d'eau chaude sanitaire et pour de nombreuses applications industrielles nécessitant des pressions élevées, ils sont constitués soit d'un tube unique (serpentin), soit d'un faisceau de tubes branchés en parallèle enfermés dans une enveloppe appelée calandre (coque). Les tubes sont en général métalliques (acier, cuivre, inox, etc.) et le fluide chaud ou agressif passe en général dans les tubes afin de minimiser les pertes de chaleur. [3]

-**Echangeur à plaque** : Ces échangeurs sont utilisés dans les industries agro-alimentaires depuis plus de 60 ans, mais leur développement dans le bâtiment est plus récent. Cet échangeur est constitué par un ensemble de plaques équipées de joints et maintenues serrées entre 2 plateaux reliés par des tirants des serrages. Les plaques sont en général en forme de chevron pour augmenter la turbulence et ménager des points d'appuis pour résister à la pression. Leur faible épaisseur permet d'utiliser des matériaux de bonne qualité ayant une bonne tenue à la corrosion (acier inox, titane, etc.)

La figure 8 représente les différents composants d'un échangeur tubulaire

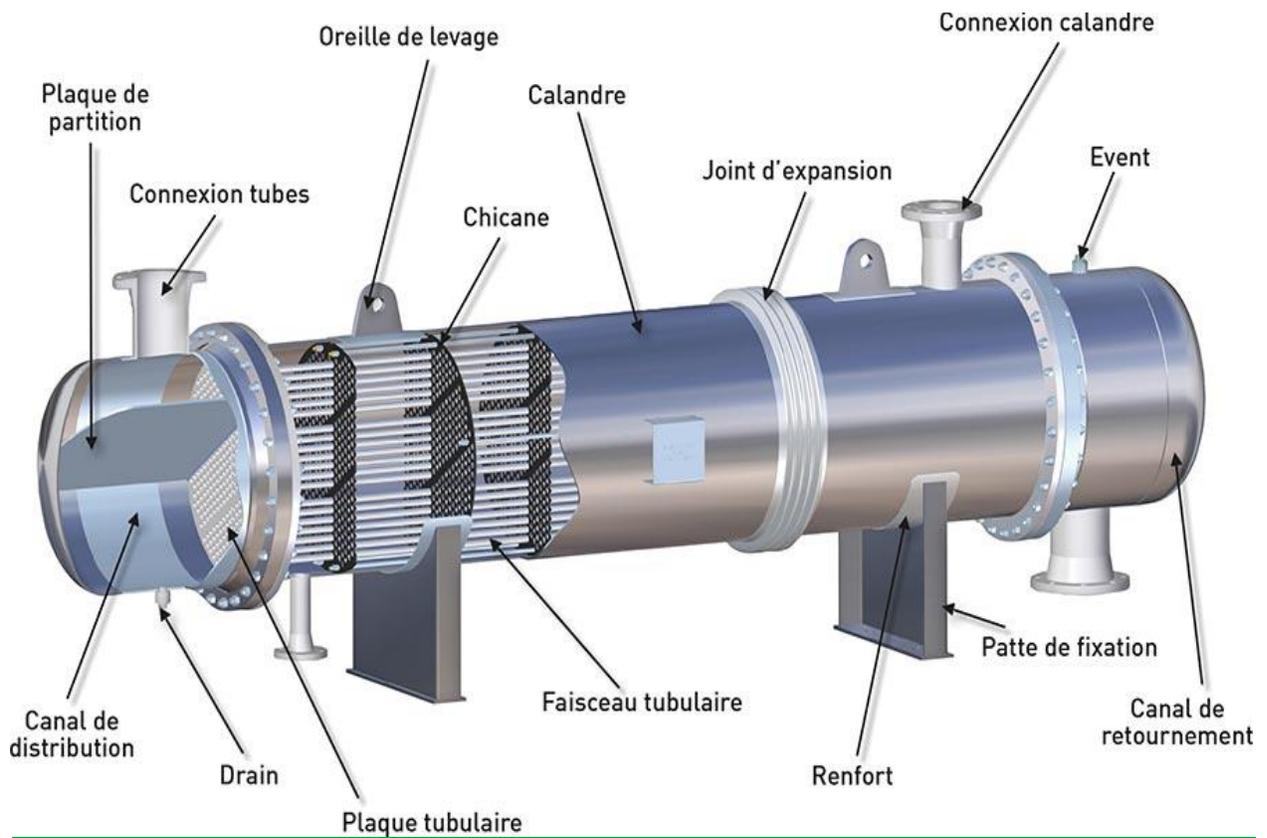


Figure 8 : Echangeur à tubes et à calandre

La figure ci-dessous représente le schéma d'un échangeur à plaque

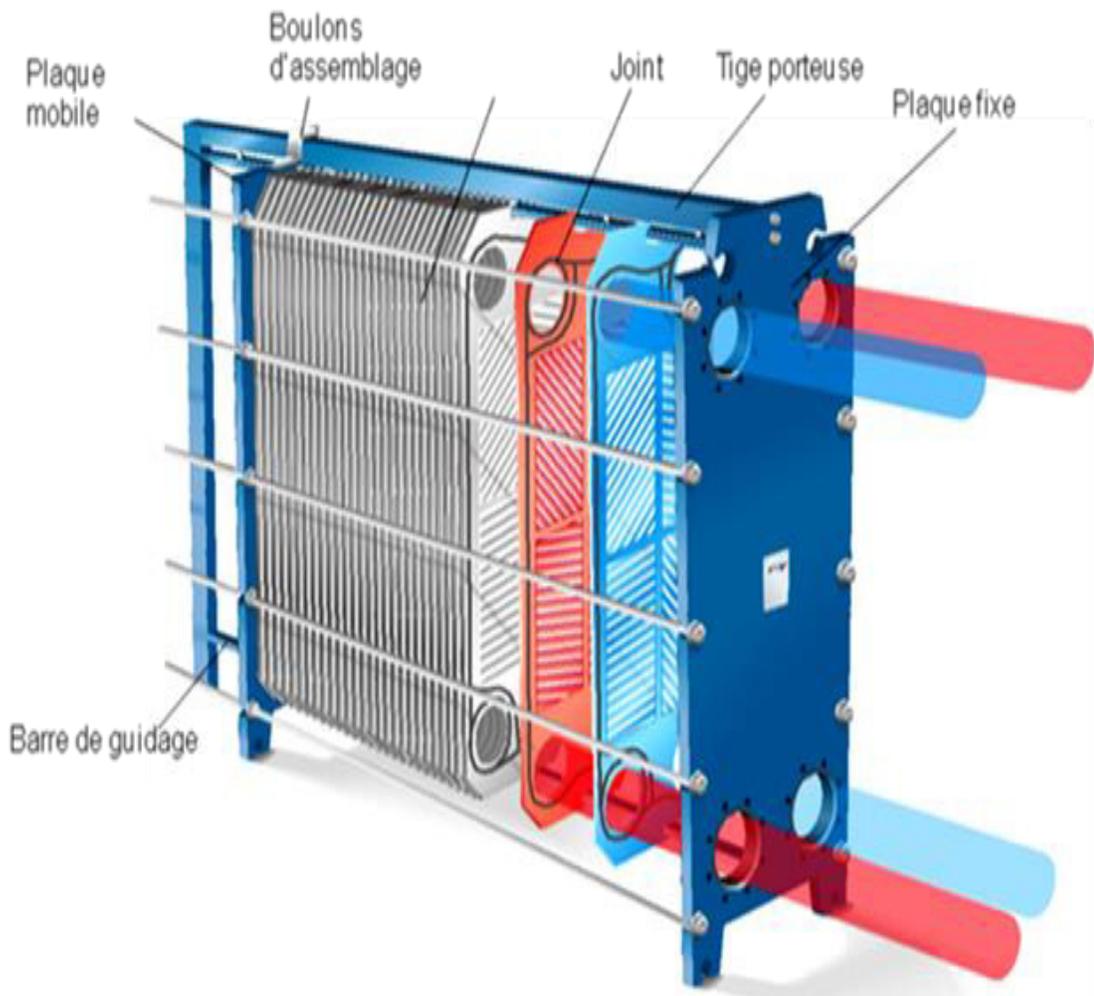


Figure 9 : Echangeur à plaques

#### 4-Conditions de fonctionnement des échangeurs de chaleur :

##### 4.1. Hypothèses :

On suppose qu'on a un échangeur thermique sans pertes, c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid.

-Les caractéristiques des fluides ( $\rho, \mu, \lambda, c_p$ ) sont constantes.

- Les débits des deux fluides sont constants.

-Les températures sont variables dans l'échangeur.

-Le transfert thermique s'effectue à travers une paroi « par conduction ».

- Le transfert thermique ne s'effectue que par convection et conduction « le transfert par rayonnement est négligeable »

#### 4.2. Distribution de température dans l'échangeur :

Les deux fluides froid (indice f) et chaud (indice c) peuvent circuler parallèlement dans le même sens (co-courant) ou en sens contraire (contre-courant). La variation de température dans le fluide est alors très différente

Si on observe les différences de températures, on constate les courbes suivantes comme le montre la figure 10

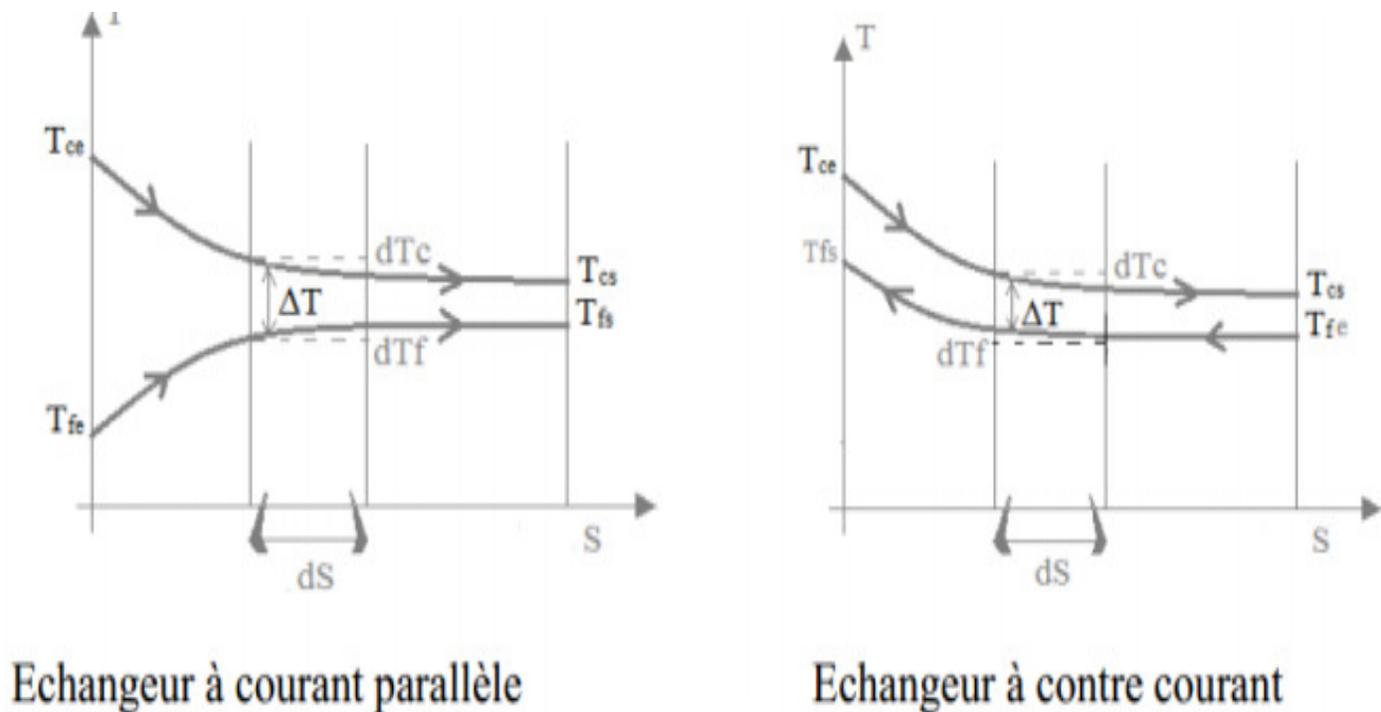


Figure 10 : Graphe d'écoulement d'échangeur à courant parallèle et à contre-courant

- $T_{fe}$  : température d'entrée du fluide froid ; -  $T_{ce}$  : température d'entrée du fluide chaud
- $T_{fs}$  : température de sortie du fluide froid ; -  $T_{cs}$  : température de sortie du fluide chaud

L'écart de température n'étant pas linéaire, on utilise donc la moyenne logarithmique au lieu de la moyenne arithmétique

D'après la figure 10 on peut conclure que le meilleur échangeur à utiliser est l'échangeur à contre-courant car l'échangeur à courant parallèle réduira la température, il est loin d'être aussi efficace qu'un échangeur à contre-courant et pour atteindre la température de sortie requise un échangeur de chaleur plus grand peut éventuellement être nécessaire

### **5-Description de l'échangeur U225 :**

L'U225 est un échangeur en tube d'échange thermique à contre-courant de type vapeur/eau conçu pour réchauffer l'eau par la vapeur provenant de la chaudière

La figure 11 représente un schéma d'échangeur U225

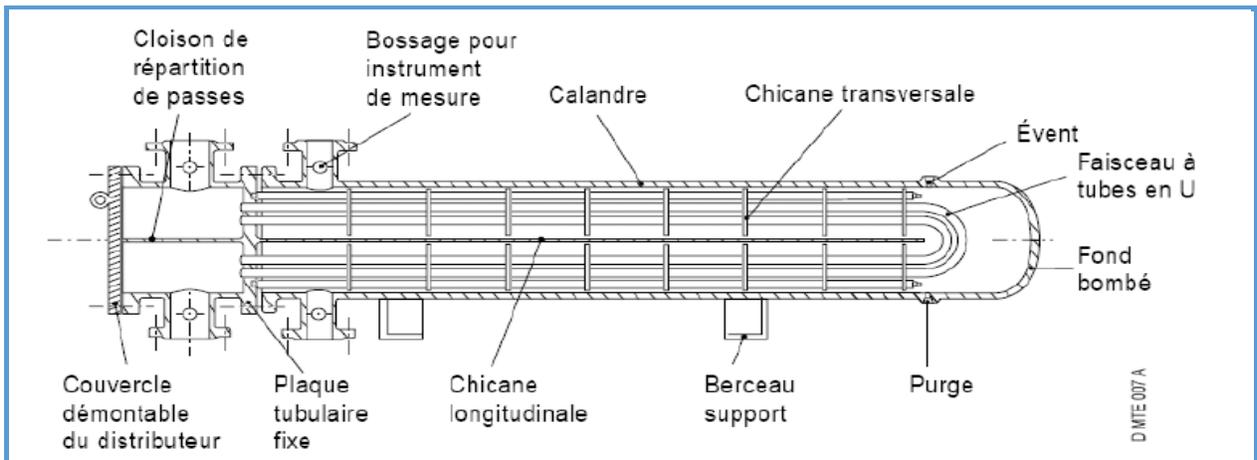


Figure 11 : schéma d'échangeur de forme U225

Les différents constituants de cet échangeur sont :

**La calandre (Shell) :** c'est l'enveloppe métallique cylindrique entourant le faisceau tubulaire. Son matériau doit être compatible avec le fluide utilisé

**Les plaques tubulaires :** Ce sont des plaques percées supportant les tubes à leurs extrémités. Leur épaisseur varie de 5 à 10 cm

**Les tubes du faisceau :** Ce sont généralement des tubes normalisés dont le diamètre annoncé correspond exactement au diamètre extérieur. Les matériaux utilisés dépendent des fluides choisis ; les plus courants sont les aciers ordinaires, les aciers inoxydables, le cuivre ou le laiton... etc. Deux dispositions de tubes sont possibles : le pas triangulaire et le pas carré.

Les chicanes (baffles) : L'existence des chicanes améliorent l'échange de chaleur. Elles ont pour rôle d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre

## **6-Bilan thermique de l'échangeur U :**

### 6.1-But de calcul :

Le but de ce calcul est de vérifier les performances d'un échangeur de type faisceau-calandre, en calculant sa surface d'échange, ainsi que son efficacité avec la méthode de la moyenne logarithmique de la différence de température entre deux fluides.

### 6.2-Equation fondamentale :

Le bilan thermique global de l'appareil est le suivant : [4]

$$\phi = M \cdot C_p (T1 - T2) = m \cdot c_p (t2 - t1) \quad (1)$$

- T1 : température d'entrée du fluide chaud
- T2 : température de sortie du fluide chaud
- t1 : température d'entrée du fluide froid
- t2 : température de sortie du fluide froid
- $C_p$  et  $c_p$  désignent les chaleurs spécifiques respectivement des fluides chaud et froid en (J/kg °C)
- M et m désignent les débits massiques respectivement des fluides chaud et froid en (Kg/s)

D'autre part, on peut appliquer l'équation de Fourier à l'ensemble de l'échangeur

$$\phi = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (2) \quad [4]$$

- A : est la surface totale d'échange en (m<sup>2</sup>)
- U : est le coefficient de transfert de chaleur global en (J/s.m<sup>2</sup>.°C)
- $\Delta T_{lm}$  : est la différence logarithmique moyenne des températures en (°C)

La seconde restriction réside dans la validité de la relation précédente établie pour le cas des échangeurs tubulaires simple à Co-courant et contre-courant. En pratique, dans le cas d'échangeur plus complexe, la littérature TEMA (association commerciale des principaux fabricants des échangeurs de chaleur à tube et à calandre) notamment fournit une expression du flux thermique corrigée au moyen d'un facteur de correction F issu à l'aide d'abaque.

Il est en fonction de deux paramètres P et R qui caractérisent l'échangeur étudié.

$$R = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{fs} - T_{fe})} \qquad P = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

La grandeur **P** symbolise l'influence relative de l'écart de température global, **R** représente le rapport des débits calorifique  $C_T$  et  $C_t$  respectivement côté calandre et tube.

L'expression du flux de chaleur se met ainsi sous une forme générale :  $\phi = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{lm}$  (3)

**F** représente le facteur de correction issu à l'aide d'abaque

### 6.3-Calcul thermique de l'échangeur :

Le tableau 2 représente les caractéristiques des deux fluides froid et chaud : [7]

Propriétés	Fluide froid $T_f$ (coté tube)	Fluide chaud $T_c$ (coté calandre)
Fluide	l'eau	Vapeur d'eau
Température d'entrée (°C)	$T_{fe}=25$	$T_{ce}= 102,5$
Température de sortie (°C)	$T_{fs}=68$	$T_{cs} = 75$
Débit (Kg/h)	$m=30000$	$M= 1100$
Chaleur spécifique (KJ/Kg°C)	$C_p= 4,18$	$c_p=175,92$
Conductivité thermique (J/s M°C)	$\lambda_f=0,61$	$\lambda_c =0,67$
Viscosité dynamique (Kg/s m)	$\mu_f=8,02.10^{-4}$	$\mu_c =2,6.10^{-4}$

Tableau 2 : Tableau des caractéristiques des fluides froid et chaud

Le tableau 3 représente les caractéristiques de l'échangeur faisceau-calandre [7]

Calandre (vapeur d'eau)	Faisceau (l'eau)
Nombre des chicanes : $N_c = 30$	Nombre des tubes : $N_t = 51$ tubes
Conductivité thermique du matériau : $\lambda_m = 37,73 \text{ J/sm}^\circ\text{C}$	Conductivité thermique du matériau : $\lambda_m = 58,05 \text{ J/sm}^\circ\text{C}$
	Longueur des tubes : $L = 2,8 \text{ m}$
Espacement des chicanes : $B = 0,15 \text{ m}$	Pas triangle normal : $P = 53,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Diamètre intérieur des chicanes : $d_i = 0,2 \text{ m}$	Diamètre intérieur des tubes : $D_i = 42,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Epaisseur des chicanes : $e_c = 15,5 \cdot 10^{-3}$	Epaisseur des tubes : $e_t = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Nombre de passes : $N_c = 1$	Nombre de passes : $N_p = 2$
Résistance d'encrassement : $R_c = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ sm}^2\text{C}^0/\text{J} = R_t$	Résistance d'encrassement : $R_t = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ sm}^2\text{C}^0/\text{J}$

Tableau 3 : Caractéristiques de l'échangeur faisceau-calandre

#### 6.4-Calcul de la différence de température logarithmique moyenne :

La différence logarithmique moyenne de température entre les deux fluides  $\Delta T_{lm}$  est donnée par la relation suivante :

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}} \quad (4) \quad [5]$$

$T_{ce}$  : température d'entrée du fluide chaud ( $102,5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_{cs}$  : température de sortie du fluide chaud ( $75 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_{fe}$  : température d'entrée du fluide froid ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_{fs}$  : température de sortie du fluide froid ( $68 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$$\Delta T_{lm} = \frac{(102,5 - 68) - (75 - 25)}{\ln \frac{102,5 - 68}{75 - 25}} = 41,8^\circ\text{C}$$

### 6.5-Correction de la différence de température logarithmique moyenne $\Delta T_{lm}$ : [5]

On a 2 passes coté tube et 1 passe coté calandre, dans ce cas d'échangeur il faut introduire le coefficient de correction F

Avec F obtenu à l'aide d'un graphe, si nous considérons le cas de 2 passes du coté calandre, on aura :

$$P = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})} = 0,54 \quad \text{Et} \quad R = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{(T_{fs} - T_{fe})} = 0,64$$

La figure 12 représente le facteur de correction obtenu à l'aide d'abaque

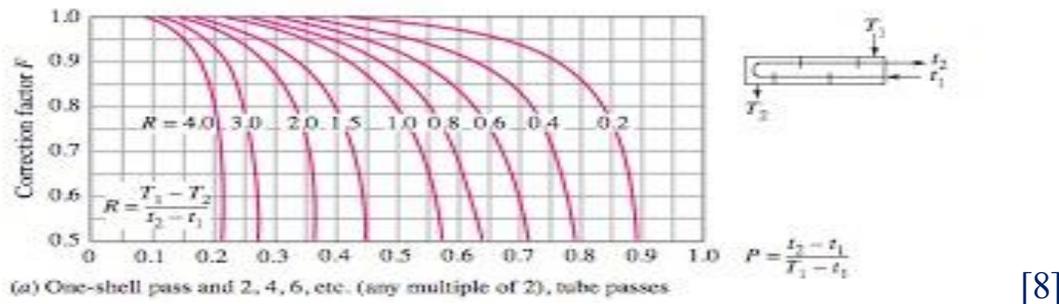


Figure 12 : Graphe de facteur de correction obtenu à l'aide d'un abaque

$$\Delta T_{lm} = 41.8^\circ\text{C}$$

Pour  $R = 0,64$  et  $P = 0,56$  le graphe donne  $F = 0,87$

$$\Delta T_{lm} \text{ corrigé} = F \cdot \Delta T_{lm} = 36,5^\circ\text{C}$$

### 6.6-Calcul du flux échangé :

La chaleur perdue par le fluide chaud est alors entièrement transférée au fluide froid. Donc de ce fait la quantité de chaleur perdue par le fluide chaud est égale à celle prise par le fluide froid. Si l'on néglige les pertes thermiques :

Le flux échangé par notre échangeur est :

$$\phi = M \cdot Cp (T_{ce} - T_{cs}) = m \cdot c p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (5) \quad [6]$$

En appliquant les différents paramètres on obtient ce qui suit :

$$\phi = 30000 \cdot 4,18 \cdot (68 - 25) = 5392200 \text{ Kj/h} = 1497,80 \text{ KWatt}$$

### 6.7-Calcul du coefficient d'échange global U :

Le coefficient d'échange global est utilisé dans la formule (2) pour le calcul du flux thermique est donné par la relation suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hc} + r_t + \frac{e}{\lambda_p} + r_c + \frac{1}{hf}} \quad [5]$$

- La convection dans le fluide chaud est régie par un coefficient de convection  $h_c$
- La convection dans le fluide froid est régie par un coefficient de convection  $h_f$
- La conduction à travers la paroi solide d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$ , il en est rendu compte par une résistance thermique de conduction  $e/\lambda$
- L'encrassement est régi par deux résistances  $r_t$  et  $r_c$

Tout cela se résume dans la figure 13

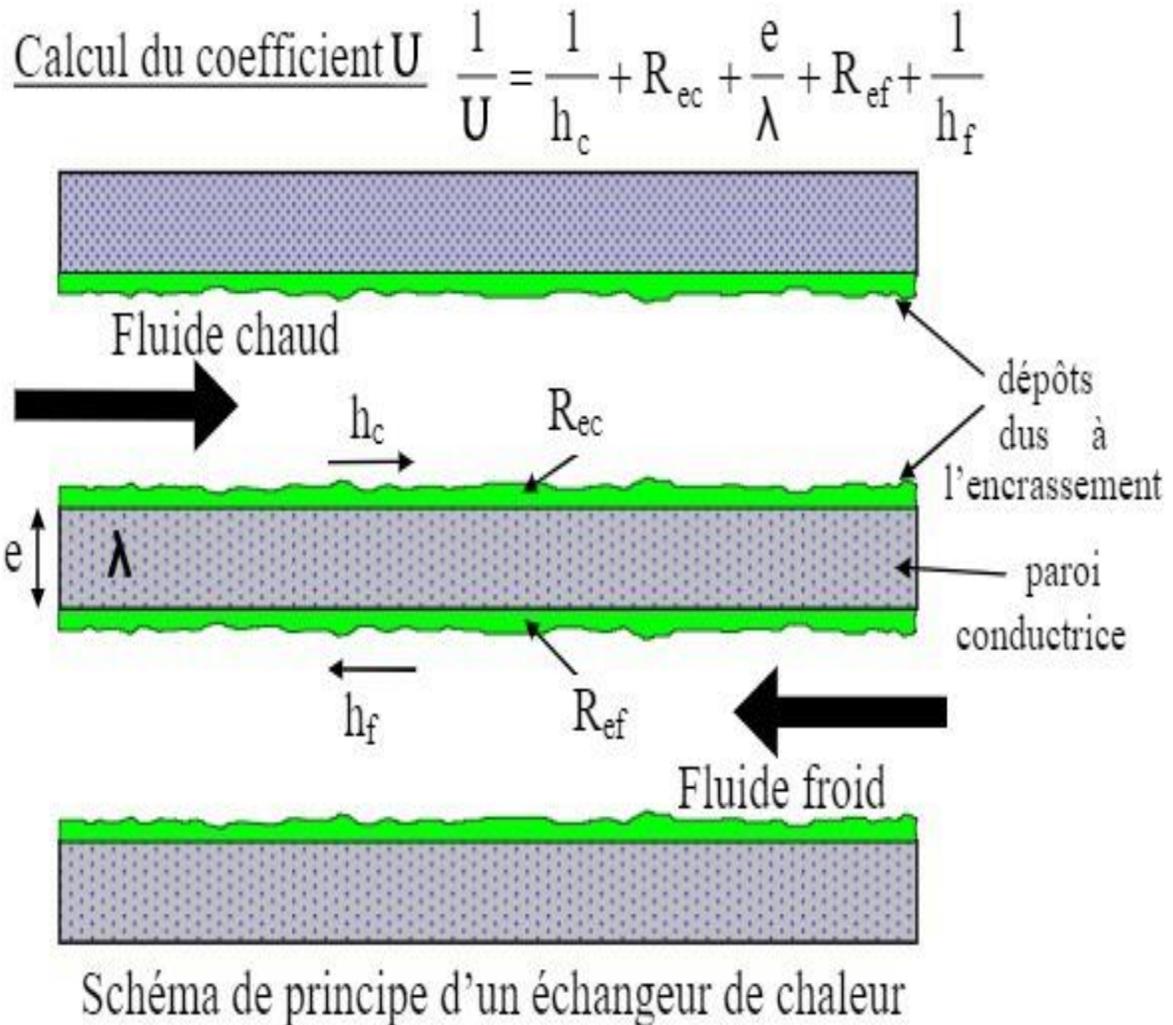


Figure 13 : schéma de principe d'un échangeur de chaleur

### 6.8 -Calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi $h_f$ :

Le coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi noté  $h_f$  est donné par la relation suivante :

$$\frac{Nu.\lambda_f}{Di}$$

Le tableau 4 représente les différentes étapes pour le calcul du coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi noté  $h_f$

	Relations	Application numérique
Section de passage coté tube $A_t$ En $m^2$	$\frac{\pi}{4} \cdot D_i^2$	$1,39 \cdot 10^{-3}$
Vitesse massique $V_t$ <b>En Kg/s.m</b>	$\frac{M}{A_t} \cdot N_t$	117,50
Nombre de Reynolds	$\frac{D_i \cdot v_t}{\mu_f}$	6182,66
Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_f \cdot C_p}{\lambda_f}$	5,49
Nu	$0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	43,77
$h_f$ En $J/m^2 \cdot ^\circ C$	$\frac{Nu \cdot \lambda_f}{D_i}$	632,69

Tableau 4 : de calcul du coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi  $h_f$

Avec

Nu : le nombre de Nusslet est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi. Déterminer le nombre de Nusselt permet de calculer le coefficient de convection thermique à l'aide d'une corrélation, généralement obtenue

expérimentalement, qui le lie au nombre de Reynolds et au nombre de Prandtl en convection forcée

Re : Nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement des fluides

Pr : Nombre de Prandtl caractérise l'influence de la nature du fluide sur le transfert de chaleur par convection

### 6.9- Calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi hc :

Le coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi noté hc est donné par la relation suivante :

$$\frac{Nu \cdot \lambda_f}{Di}$$

Le tableau 5 représente les différentes étapes de calcul du coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi hc

Tableau 5 : Tableau de calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi hc

	Relations	Application numérique
Section de passage coté calandre Ac <b>En m<sup>2</sup></b>	$(p - De) \cdot (B - e \cdot c)$	4,51.10 <sup>-4</sup>
Vitesse massique Vc <b>En Kg/s.m</b>	$\frac{M \cdot P}{Ac \cdot Di}$	114,18
Nombre de Reynolds	$\frac{De \cdot Vc}{\mu_c}$	22142,13
Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_c \cdot Cp}{\lambda_c}$	68,26
Nu	$0.33 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{1/3}$	538,17
hc <b>En J/m<sup>2</sup>. °C</b>	$\frac{Nu \cdot \lambda_c}{De}$	7151,40

$$De = Di + 2et = 42,2 + 2(4,11) = 50,42 \text{ mm}$$

Donc après effectué tout ce calcul on obtient :

$$U = 484,73 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

## 7-Calcul de l'efficacité de l'échangeur :

Définition : L'efficacité d'un échangeur est le rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,..) dans l'échangeur.

$$\varepsilon = \frac{\phi_{réel}}{\phi_{max}}$$

$$\text{Avec : } \phi_{max} = \mathbf{min} (C_f, C_c) \cdot (T_{ce} - T_{fe}) \quad [4]$$

$$\phi_{réel} = C_f(T_{fs} - T_{fe})$$

$$C_c = m_1 \cdot C_{p1} = 1100 \cdot 175,07 = 192577 \text{ KJ/h. } ^\circ \text{C}$$

$$C_f = m_2 \cdot C_{p2} = 30000 \cdot 4,18 = 125400 \text{ KJ/h. } ^\circ \text{C}$$

Avec :

$C_c$  : Débit de capacité thermique du fluide chaud en KJ/h. °C

$C_f$  : Débit de capacité thermique du fluide froid KJ/h. °C

Application numérique :

$$\phi_{réel} = 5392200 \text{ KJ/h} = 1497,83 \text{ KW}$$

$$\phi_{max} = 9718500 \text{ KJ/h} = 2699,58 \text{ KW}$$

$$\text{Donc} \quad \varepsilon = 0,554 = 55,4\%$$

## 8-Calcul de rendement:

Le calcul de rendement se fait par la relation suivante : [6]

$$\eta = \frac{\phi_{réel}}{\phi_{conception}} \cdot 100$$

D'après les données de la société on a  $\phi_{conception} = 3404,09$

$$\eta = \frac{1497,8}{3404,09} = 0,44 \cdot 100 = 44\%$$

## 9- Elaboration du modèle de calcul de l'échangeur sur Excel :

Dans cette partie on a élaboré un modèle de calcul sur Excel afin de déterminer l'influence du phénomène des tubes bouchés

### 9.1- Calcul de l'efficacité sans tubes bouchés :

La figure 14 représente une copie d'écran d'un tableau élaboré sur Excel afin de calculer l'efficacité sans tubes bouchés

	donnes	les unites	les valeurs
Donnees	nombre des tubes n	sans unite	102
	diametre exterieure d2	m	0,052
	longueur de tube L		2,800
	diametre interieure d1		0,042
Calculs	q min	kj	125400
	R	sans unite	0,651
	la surface d'echange S	m <sup>2</sup>	93,266
	coefficient d'echange globale U	watt/m <sup>2</sup> .°C	2000
	NUT		1,487
	efficacite E		0,627

Figure 14 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité  $\epsilon$  sans tubes bouchés

Après avoir effectué les calculs on trouve la valeur de l'efficacité suivante :  $\epsilon=0,62=62\%$

## 9.2- Calcul de l'efficacité sans tubes bouchant (46 tubes) :

La figure 15 représente une copie d'écran d'un tableau élaboré sur Excel afin de calculer l'efficacité avec des tubes bouchés

	donnees	les unites	les valeurs
Donnees	nombre des tubes n	sans unite	56
	diametre exterieure d2	m	0,052
	longueur de tube L		2,800
	diametre interieure d1		0,042
Calcules	q min	kj	125400
	R	sans unite	0,651
	la surface d'echange S	m <sup>2</sup>	51,205
	coefficient d'echange globale U	watt/m <sup>2</sup> .°C	2000
	NUT		0,817
	efficacite E		0,466

Figure 15 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité  $\epsilon$  avec tubes bouchés

Après avoir effectué les calculs on trouve la valeur de l'efficacité suivante

$$\epsilon = 0,46 = 46\%$$

### 9.3 -Interprétation des résultats de calcul :

L'échangeur étudié a une efficacité qui atteint les 55% ce qui prouve le bon fonctionnement de ce dernier

Par ailleurs, le bouchage par encrassement des tubes a causé une perte de chaleur correspondante à une diminution de l'efficacité de notre échangeur avec un pourcentage de 16%

Donc on peut conclure que le phénomène de bouchage des tubes influe négativement sur l'efficacité de l'échangeur. Plus le nombre de tubes bouchés augmente plus l'efficacité diminue

### **Conclusion :**

L'élaboration du modèle de calcul sur Excel m'a permis de mettre en évidence le phénomène de bouchage des tubes. En effet la comparaison entre le tableau 14 et le tableau 15 a montré que le nombre de tubes et l'efficacité de l'échangeur sont inversement proportionnel, pour éviter ce phénomène plusieurs solutions sont proposées dans conclusion générale

## *Conclusion générale :*

Ce rapport a été élaboré durant notre stage de PFE au sein de la CBGN.

Le sujet de stage s'intitule sur le calcul du rapport calorifique d'un échangeur thermique

Notre travail a été inscrit généralement dans le cadre de l'étude d'un échangeur de chaleur en particulier l'échangeur à faisceaux et à calandre afin de bien comprendre son fonctionnement et ses utilités dans le domaine de la production

Les calculs de vérification thermique nous ont permis d'évaluer la surface et le coefficient de transfert global d'échange thermique , et nous ont permis aussi de déduire l'influence du phénomène des tubes bouchés sur l'efficacité de l'échangeur en élaborant le modèle de calcul sur Excel

Toutefois le bouchage des tubes donne lieu à une diminution de l'efficacité engendrant une perte de flux échangé entre les deux fluides

Donc il est évident que pour avoir une amélioration d'efficacité de l'échangeur il faut :

Nettoyer les tubes pendant les phases d'arrêt, détecter périodiquement les tubes bouchés, nettoyer les tubes en marche

## *Bibliographie*

- [1] : Documentation interne de la société CBGN
- [2] : le cours de transfert thermique du prof Saïd Houach
- [3] : <https://thermo fin.net/fr/produits/caleos-echangeurs-faisceau-tubulaire/>
- [4] <http://www.thermique55.com/principal/chapitre6.pdf>
- [5] : <http://gsi-energie.univ-rouen.fr/IMG/pdf/cours-iup-me-echangeurthermique-2.pdf>
- [6] : [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj11dHyoMTxAhUJDGMBHRniDXsQFjAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Farchives.univ-biskra.dz%2Fbitstream%2F123456789%2F14585%2F1%2Fayaydeh\\_ahab.pdf&usg=AOvVaw2IJrHUIFgAPywPAKJ0ctUh](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj11dHyoMTxAhUJDGMBHRniDXsQFjAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Farchives.univ-biskra.dz%2Fbitstream%2F123456789%2F14585%2F1%2Fayaydeh_ahab.pdf&usg=AOvVaw2IJrHUIFgAPywPAKJ0ctUh)
- [7] : données de calcul et caractéristiques présenté par l'encadrant de la CBGN
- [8] : [https://checalc.com/solved/LMTD\\_Chart.html](https://checalc.com/solved/LMTD_Chart.html)