



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

Sujet :

Calcul du rapport calorifique d'un  
échangeur thermique

Lieu : CBGN Fès

Référence : 18/21-LST

Présenté par :

BOUSSAID NADYA

**Soutenu Le 7 Juillet 2021 devant le jury composé de :**

- Mr. Nabih ELOUAZZANI (encadrant FST Fès)
- Mr. Mohamed RAMADANY (examinateur FST Fès)
- Mr. Belkacem Lahbouj (encadrant de société)



## *Les abréviations*

CBGN : Compagnie des Boissons Gazeuses du Nord

$\Delta T_m$  : est appelée la différence de température logarithmique moyenne entre les deux fluides.

U : c'est le coefficient surfacique de l'échangeur.

$\varepsilon$  : L'efficacité d'un échangeur

NUT appelle nombre d'unité de transfert,

$h_c$  : Convection entre le fluide chaud et la face externe de la paroi solide.  $e$   $\lambda$

Conduction à travers cette paroi solide

$h_f$  : Convection entre la face interne de la paroi solide et le fluide froid.

$r_c$  et  $r_t$  : Les résistances de couche formée sur la paroi à partir des dépôts.

Le nombre de NUSSELT :  $Nu$

Le nombre de Prandtl :  $Pr$

Le nombre de Reynolds :  $Re$

L : la longueur de la paroi.

$\lambda$  : Conductivité thermique du liquide.

$\lambda_p$  : Conductivité thermique du liquide.

$\rho$  et  $\nu$  : la masse volumique et la viscosité cinématique du liquide condensé.

$\mu$  : Viscosité dynamique de fluide

$C_p$  : Chaleur spécifique de fluide



## *Liste des figures*

Figure 1 : L'organigramme de la CBGN.....	2
Figure 2 : Processus de la production à la CBGN.....	5
Figure 3 : Procédé de traitement d'eau à la CBGN .....	8
Figure 4 : Etape de préparation de sirop simple .....	10
Figure 5 : Etape de préparation de sirop fini.....	11
Figure 6 : Etape de production pour la ligne de verre .....	11
Figure 7 : Echangeur à tubes et à calandre .....	13
Figure 8 : Echangeur à plaques.....	15
Figure 9 : Graphe d'écoulement d'échangeur à courant parallèle et à contre-courant.....	16
Figure 10 : Schéma d'échangeur de forme U .....	17
Figure 11 : position de U 225 dans la CBGN.....	18
Figure 12 : Graphe de facteur de correction.....	19
Figure 13 : Graphe de facteur de correction obtenu à l'aide d'un abaque.....	23
Figure 14 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité $\epsilon$ .....	30
Figure 15 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité $\epsilon$ sans tubes bouchés.....	31
Figure 16 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité $\epsilon$ avec tubes bouchés.....	32



## *Liste des tableaux*

Tableau 1 : Catégorie de traitement selon l'eau concernée.....	6
Tableau 2 : Tableau des caractéristiques des fluides.....	21
Tableau 3 : Tableau des caractéristiques de l'échangeur faisceau calandre .....	22
Tableau 4 : Tableau de calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi hf ...	26
Tableau 5 : Tableau de calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi hc...	27
Tableau 6 : 4 essais de variation de températures d'entrée et de sortie .....	30



## Dédicaces

Je dédie cet humble travail à ceux qu'on aime le plus au monde, à nos parents, avec notre profonde reconnaissance pour leur amour, leurs efforts consentis sans relâche durant toutes ces années d'études ainsi que leurs conseils et tous ce qu'ils font et continuent à faire pour nous. Que Dieu leur procure santé, bonheur et longue vie afin qu'on puisse leur combler à notre tour, sans jamais les décevoir .....Amen.

À nos sœurs et frères, pour leurs soutiens moraux et leurs encouragements.

À nos collègues, ainsi qu'à tous ceux qui nous avons aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

À tous ceux qui liront un jour ce rapport, on espère qu'il vous sera d'une certaine utilité dans la compréhension du domaine des boissons gazeuses.



## Remerciements

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 Nabih ELOUAZZANI pour son écoute et ses conseils qui m'ont permis de bien avancer.

Je tiens à remercier vivement mon encadrant de stage à la 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.

Je remercie également les membres du jury, le Professeur M. RAMADANY pour sa présence et pour sa lecture 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 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

***Merci à toutes et à tous.***



## Sommaire :

Chapitre I :Presentation de la CBGN .....	1
1.1 Introduction :.....	1
1.2 Historique de la CBGN :.....	1
1.3 Organigramme : .....	2
1.4 Fiche technique : .....	2
1.5 Service de la CBGN : .....	3
1.6 Activités de la CBGN :.....	3
1.7 Problématique :.....	4
Chapitre II : production a la CBGN .....	5
2.1 Etapes de la production : .....	5
2.1.1 Traitement des eaux à la CBGN : .....	5
2.1.2 Procédé de traitement d'eau dans la CBGN :.....	6
2.2 Préparation du sirop :.....	8
2.2.1 Préparation du sirop simple:.....	8
2.2.2 Préparation du sirop fini :.....	10
2.3 Mixage :.....	11
2.3.1 Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne de verre : .....	12
2.3.2 Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne PET :.....	13
3 Chapitre III :Calcul du rapport calorifique d'un échangeur thermique .....	15
3.1 Introduction :.....	14
3.2 Généralités : .....	14
3.2.1 Transfert de chaleur :.....	14
3.2.2 Définition : .....	14
3.2.3 Modes de transfert thermique :.....	14
3.3 Echangeurs de chaleur: .....	14
3.3.1 Définition: .....	14
3.3.2 Types d'échangeurs de chaleur: .....	15
3.4 Conditions de fonctionnement des échangeurs de chaleur :.....	16
3.4.1 Hypothèses : .....	16



3.4.2	Distribution de température dans l'échangeur :	17
3.5	Description de l'échangeur de chaleur :	17
3.6	Bilan thermique de l'échangeur U :	19
3.6.1	But de calcul :	19
3.6.2	Equation fondamentale :	20
3.6.3	Calcul thermique de l'échangeur :	21
3.6.4	Calcul de la différence de température logarithmique moyenne :	22
3.6.5	Correction de la différence de température logarithmique moyenne $\Delta T_{lm}$ :	23
3.6.6	Calcul du flux échangé :	24
3.6.7	Calcul du coefficient global U :	24
3.6.8	Calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi $h_f$ :	25
3.6.9	Calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi $h_c$ :	26
3.7	Calcul de l'efficacité de l'échangeur :	28
3.8	Elaboration Du modèle de calcul de l'échangeur sur Excel :	30
3.8.1	Influence de température sur l'efficacité:	30
3.8.2	Résultats :	30
3.8.3	influence de phénomène de tubes bouchés :	30
3.8.4	Calcul de l'efficacité sans tubes bouchés :	31
3.8.5	Calcul de l'efficacité avec tubes bouchés (46 tubes) :	31
3.8.6	Interprétation des résultats de calcul :	32
4	Conclusion :	33





## Introduction générale

Le projet a été consacré à l'étude des échangeurs thermiques afin de contrôler le rendement de l'échangeur U225 et mettre en place certains aspects d'amélioration.

Ce rapport s'articule en 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 fait l'objet d'une description générale sur le processus de fabrication et les principales phases de la chaîne de production.

Le troisième chapitre a pour objet de faire une description générale des échangeurs thermiques et de présenter l'échangeur en question dans notre étude, d'en faire une étude calorifique et d'émettre des propositions sur certains points d'améliorations au niveau de l'échangeur.



# Chapitre I

:

## Présentation de la CBGN



## I. Introduction :

La 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.

## II. 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

### III. Organigramme : [1]

La figure 1 représente l'organigramme de la CBGN :

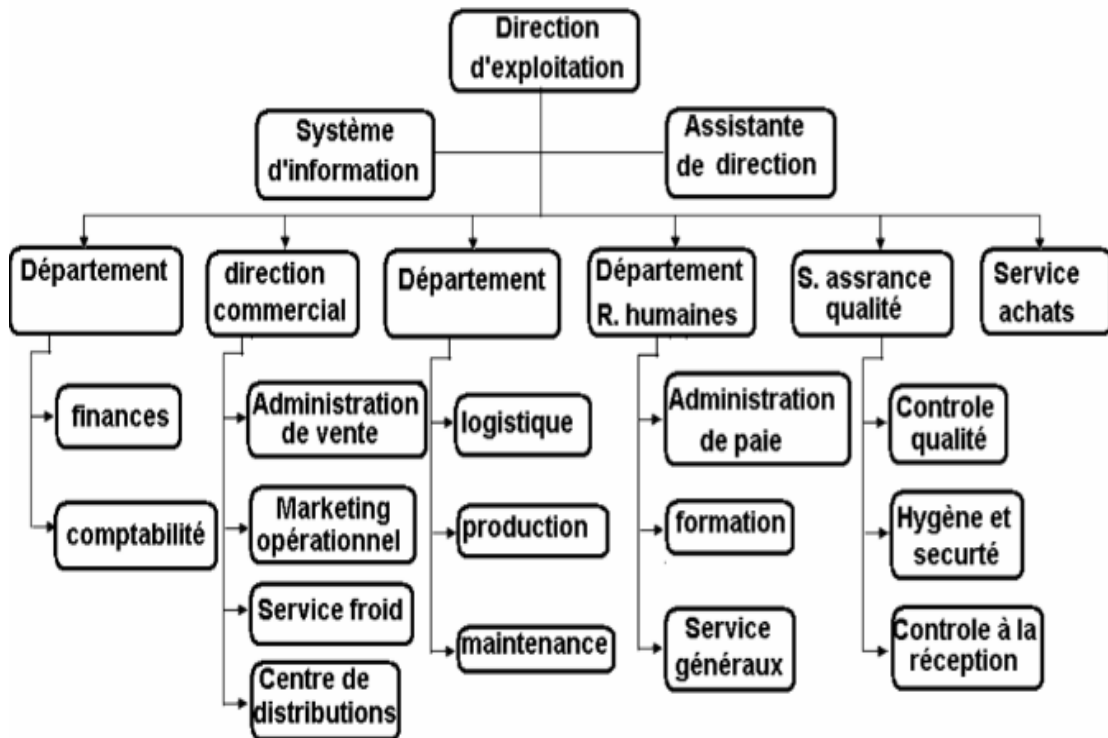


Figure 1 : L'organigramme de la CBGN

### IV. Fiche technique :[1]

La fiche suivante représente la fiche technique de la société :

- ✓ 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

## V. Service de la CBGN :[1]

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.

## VI. Activités de la CBGN :[1]

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. Le pré vendeur s'occupe de la collecte des commandes auprès des clients par le système HHT, les produits sont préparés la veille sur la base des commandes communiquées par le système HHT. La livraison s'effectue le lendemain.

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

- ☞ 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.

## VII. Problématique :

Notre échangeur est alimenté par de la vapeur d'eau provenant de la chaudière. Cette vapeur d'eau transfère sa chaleur à l'autre liquide. La vétusté de l'installation joue un grand rôle dans l'efficacité de l'échangeur thermique. Plusieurs paramètres peuvent faire varier l'efficacité de l'échangeur, 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 celui afin de mieux situer son efficacité et estimer le bon fonctionnement de l'installation.



## Chapitre II

:

## Production à la CBGN

## I. Etapes de la production :[2]

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

- \*Traitement d'eau / recyclage
- \*préparation du sirop
- \*embouteillage en verre/pet

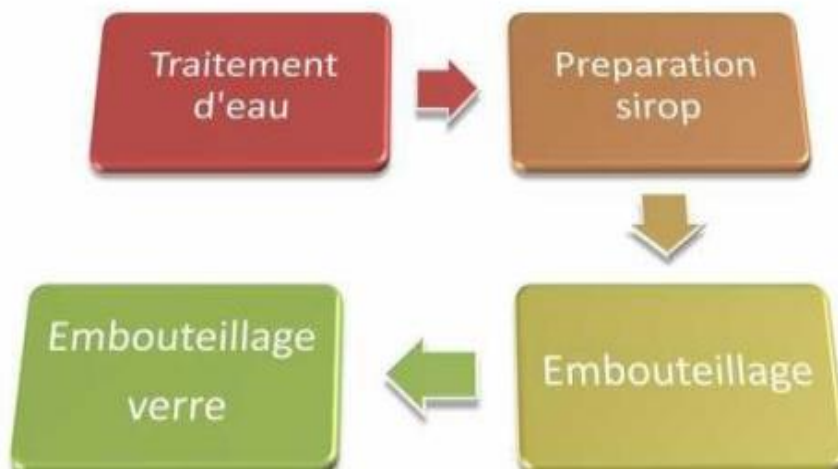


Figure 2 : Processus de la production à la CBGN

## II. Traitement des eaux à la CBGN :[2]

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 indésirable 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 entrainer 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.

### III. Procédé de traitement d'eau dans la CBGN :[2]

Cette préparation se fait en plusieurs étapes comme le montre le tableau 1

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

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 destiné au traitement d'eau, cette installation comprend :

- Des bassins de chloration
- Des filtres à sable
- Un décarbonateur



- Des filtres à charbons
- 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 élevés, 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 traités 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 concentré de  $NaCl$ .

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

**\*Dissolution du sucre :** le mélange de l'eau et du sucre qui se fait en continu est soumis à une température de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans un contimol à circuit fermé afin de favoriser la dissolution complète du sucre ; après le mélange est pasteurisé.

**\*Ajout du charbon actif :** On ajoute le charbon actif sous forme de poudre au sirop simple afin d'éliminer les impuretés, les cendres et les particules odorantes.

**\*Filtration :** Pour éliminer le charbon et les matières en suspension qui restent dans le mélange, ce dernier subit une autre phase de traitement, celle-ci commence par l'injection de la célite sous forme de poudre au niveau d'une cuve adjuvant qui va être déposée sur des plaque métalliques horizontales installées au niveau d'une cuve formant ainsi un filtre dit à gâteaux, le passage du sirop, à une température de  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  à travers ce filtre, permet sa purification.

Une deuxième filtration du sirop simple se fait dans un filtre à poche pour éliminer les résidus de charbon qui pourraient subsister.

\***Refroidissement du sirop simple** : Le sirop simple ainsi obtenu subit un refroidissement dans un échangeur thermique pour abaisser sa température jusqu'à 20°C. Ce dernier est stocké dans une cuve dans un intervalle de temps de 1h à 24h.

La figure 3 représente le processus de traitement d'eau dans la CBGN :

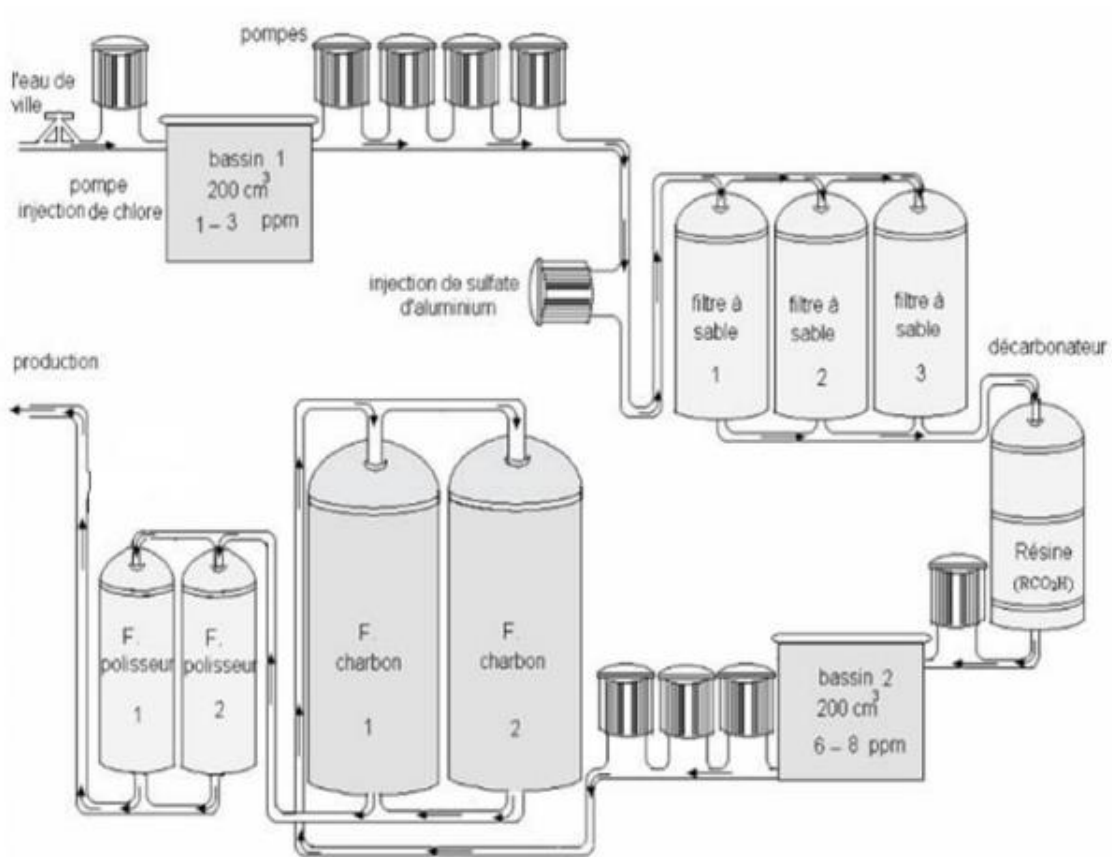


Figure 3 : Procédé de traitement d'eau dans la CBGN

#### IV. 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

##### 1. Préparation du sirop simple :[2]



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
- **L'ajout du charbon actif** : dans une cuve, on ajoute le charbon actif sous forme de poudre au sirop simple pour éliminer les impuretés, les particules odorantes qui peuvent influencer sur le gout du sirop pendant 30 min
- **Filtration** : le sirop simple subira une filtration dans une autre cuve, c'est une filtration en célite dont le rôle est d'éliminer le charbon restant et les matières en suspension. Après le sirop passe par un filtre tampon
- **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

La figure 4 représente les étapes de préparation du sirop simple

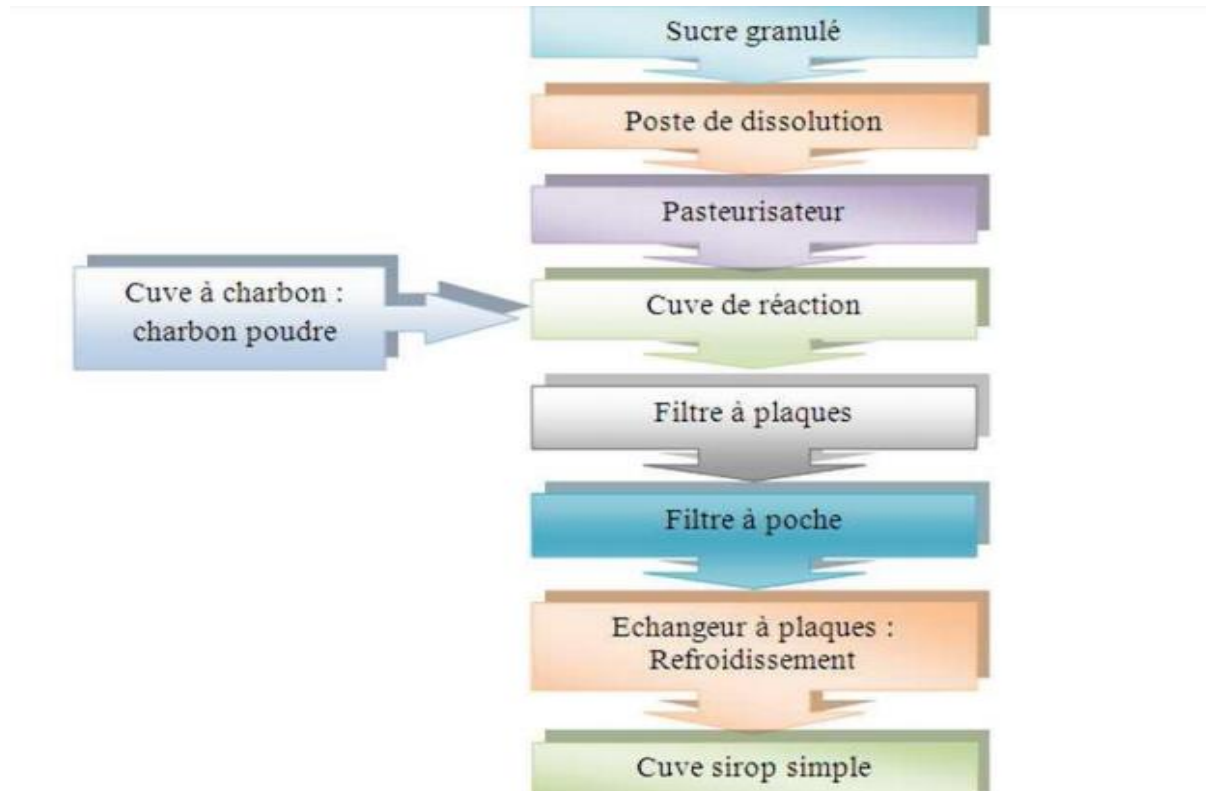


Figure 4 : Etape de préparation du sirop simple

## 2. Préparation du sirop fini :[2]

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 degré brix et bien d'autres paramètres.

e sirop fini va être envoyé vers le mixeur

La figure 5 représente les étapes de préparations du sirop fini



Figure 5: Etape de préparation du sirop fini

## V. 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.

La figure suivante représente le mixeur



Figure 6 : Mixeur

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

## VI. Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne de verre :[2]

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 miroirs pour éliminer les bouteilles males remplies.

**-Etiquetage :** 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.

La figure ci-dessous représente les étapes de production pour la ligne de verre

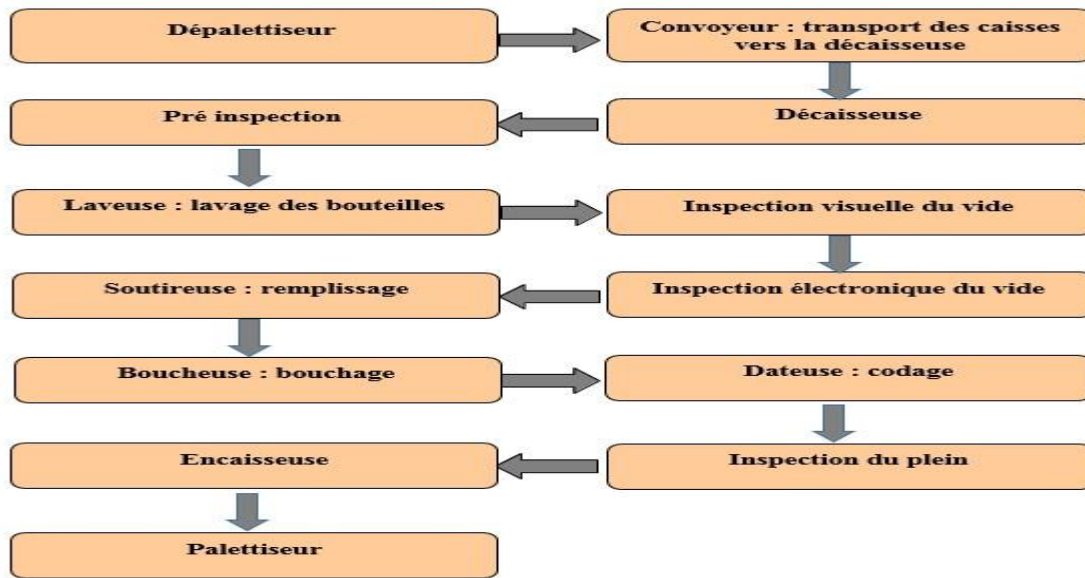


Figure 7 : Etape de production pour la ligne de verre

## VII. Fabrication de la boisson gazeuse sur la ligne PET :[2]

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
- Fardeuse : 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.



## Chapitre III

:

## Rapport calorifique d'un échangeur thermique



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

## 2. Types d'échangeurs de chaleur :

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur que l'on peut classer en fonction de la disposition relative des deux fluides :

**-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.

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

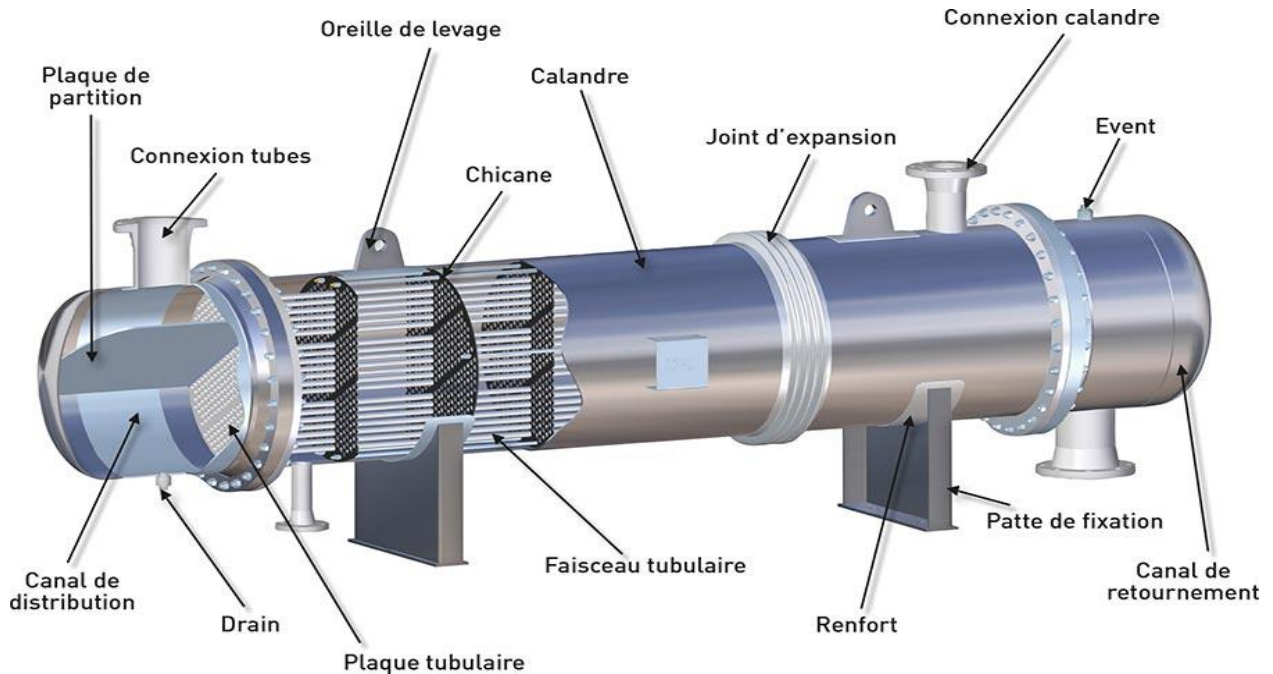


Figure 8 : Echangeur à tubes et à calandre

**-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 embouties 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 9 représente le schéma d'un échangeur à plaques :

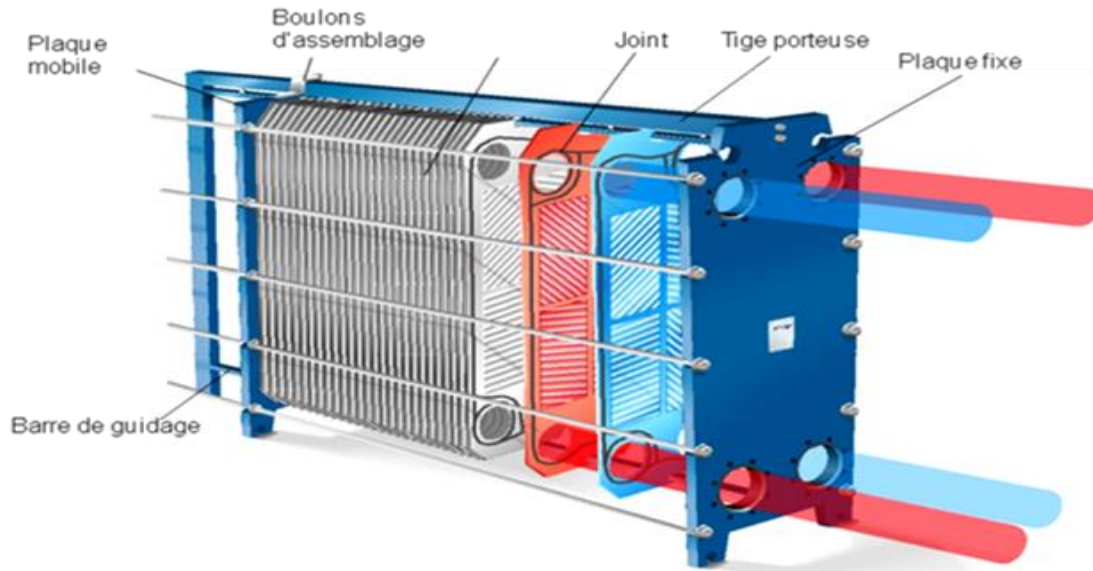


Figure 9 : Echangeur à plaques

#### IV. Conditions de fonctionnement des échangeurs de chaleur :[5]

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

## 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 courants). La variation de température dans le fluide est alors très différente.

Avec :

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

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

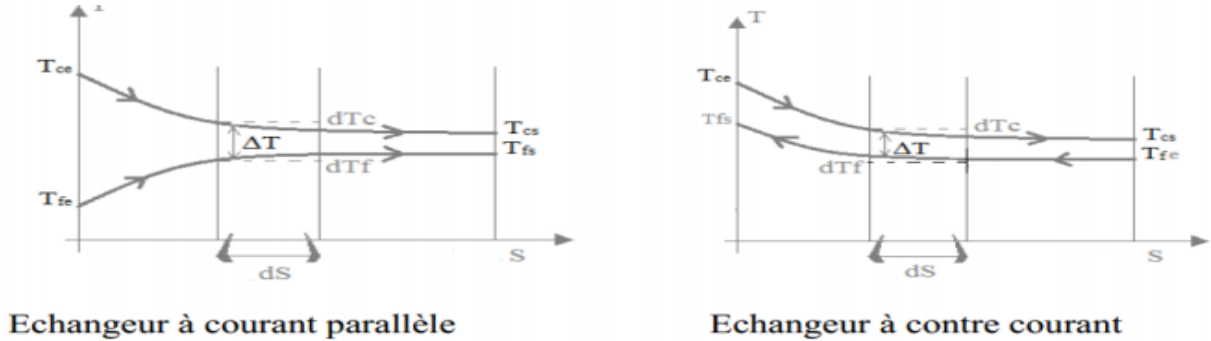


Figure 10 : Graphe d'écoulement d'échangeur à courant parallèle et à contre-courant

## V. Description de l'échangeur de chaleur :

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

La figure 11 représente un schéma d'échangeur U225

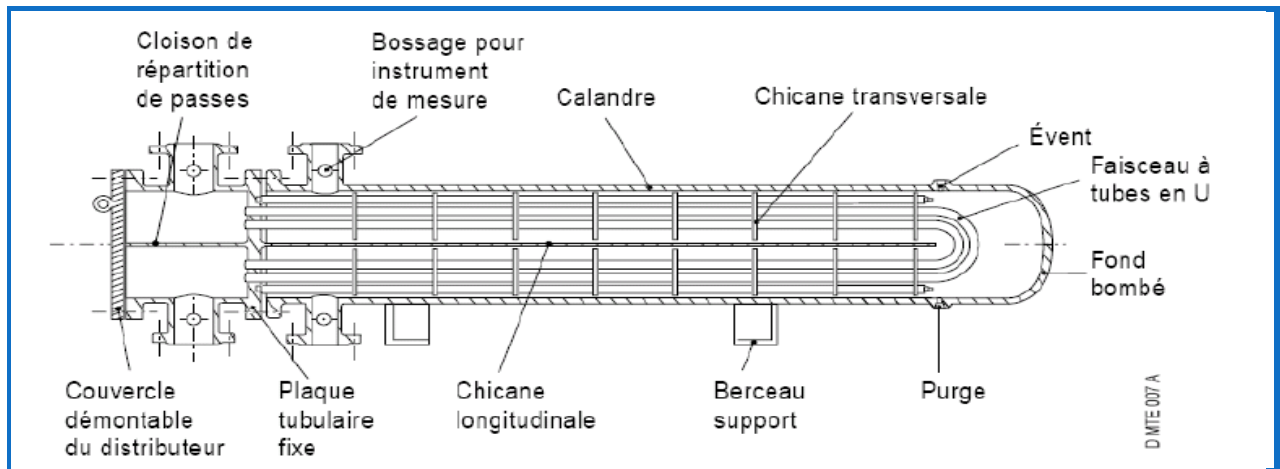


Figure 11 : schéma d'échangeur de forme U225

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 (5 à 10 cm) est calculée en fonction de la différence de pression entre le fluide dans la calandre et le fluide dans les boîtes d'une part, des contraintes dues aux différences de dilatation entre les tubes et la calandre d'autre part.

**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 forcent le fluide à s'écouler perpendiculairement aux tubes d'une part et favorisent la turbulence d'autre part, améliorant ainsi l'échange de chaleur. Elles ont pour rôle d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre

## VI. Position de l'échangeur au sein de CBGN

La figure 12 représente la position de l'échangeur U225 dans La CBGN

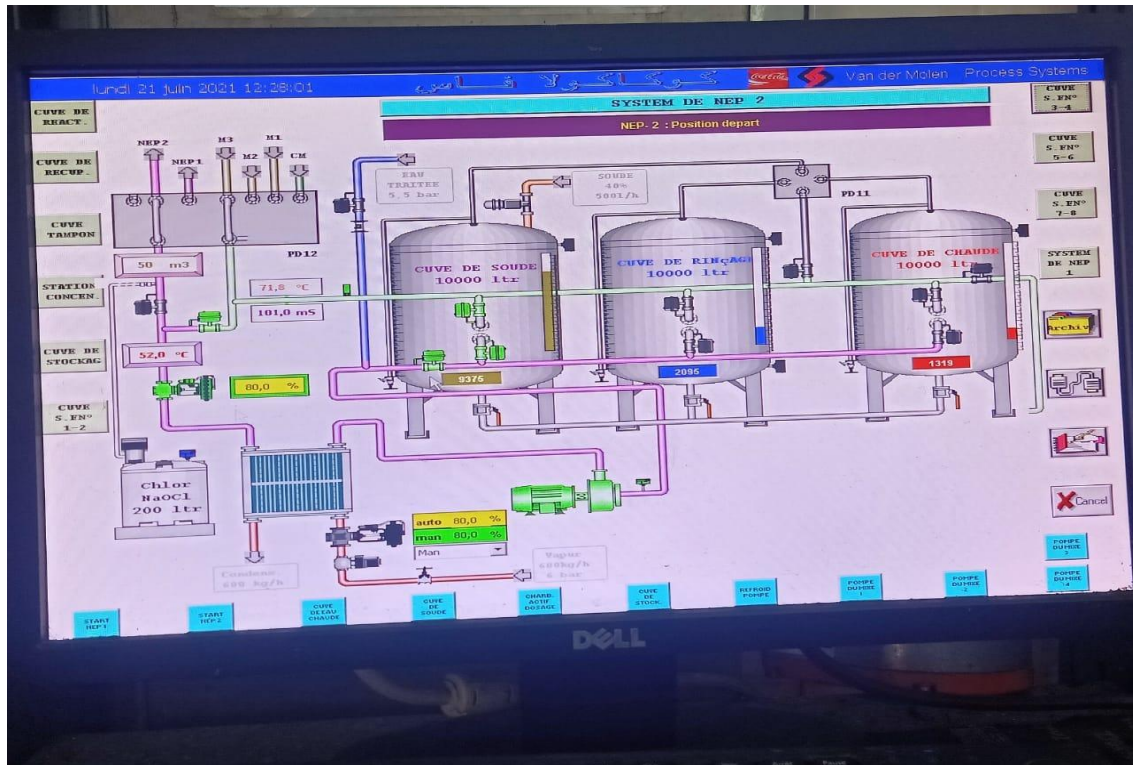


Figure 12: position de l'échangeur U 225 dans le processus de la CBGN

## VII. 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 moyenne logarithmique de la différence de température entre deux fluides.





## 2. Equation fondamentale :[6]

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

$$Q = M \cdot Cp \cdot (T1 - T2) = m \cdot cp \cdot (t2 - t1) \quad (1)$$

T et t désignent les températures respectivement  
du fluide chaud et du fluide froid en (C°)

C<sub>p</sub> et c<sub>p</sub> désignent les chaleurs spécifiques respectivement des fluides chaud et froid en  
(J/kg°C)

D'autre part, on peut appliquer l'équation de fourier à l'ensemble de l'appareil :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (2)$$

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 de température moyenne du fluide en (°C)

La seconde restriction réside dans la validité de la relation précédente établie pour le cas des échangeurs tubulaires simples à Co-courant et contre-courant. En pratique, dans le cas d'échangeur plus complexe que notre échangeur, la littérature (TEMA) notamment fournit une expression du flux thermique corrigée au moyen d'un facteur de correction **F** issu d'abaques.

Il est en fonction de deux paramètres P et R qui caractérise l'échangeur étudié :

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



L'expression du flux se met ainsi sous une forme générale :

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{lm} \quad (3)$$

En fait, 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.

### 3. Calcul thermique de l'échangeur :

Le tableau 2 représente les caractéristiques des fluides d'échangeur U225 lors de travail d'échangeur :

Propriétés	Fluide froid t ou $T_f$ (coté tube )	Fluide chaud T ou $T_c$ (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 U225 [ 7]:

Calandre (vapeur d'eau)	Faisceau (l'eau)
<b>Diamètre intérieur</b> : $d_i = 0,2 \text{ m}$	<b>Nombre des tubes</b> : $N_t = 51 \text{ tubes}$
<b>Espacement des chicanes</b> : $B = 0,15 \text{ m}$	<b>Conductivité thermique</b> : $\lambda_p = 58.05 \text{ J/smc}^0$
<b>Nombre de passes</b> : $N_c = 1$	<b>Longueur des tubes</b> : $L = 2,8 \text{ m}$
<b>Résistance d'encrassement</b> : $R_c = R_t = 1.72.10^{-4} \text{ s m}^2\text{C} / \text{J}$	<b>Pas triangle normal</b> : $P = 53,78.10^{-3} \text{ m}$
	<b>Diamètre intérieur des tubes</b> : $D_i = 42,2 .10^{-3} \text{ m}$
<b>Epaisseur des chicanes</b> : $e_c = 15,5.10^{-3}$	<b>Epaisseur des tubes</b> : $e_t = 4,11 .10^{-3} \text{ m}$
	<b>Nombre de passes</b> : $N_p = 2$
	<b>Résistance d'encrassement</b> : $r_t = 1.72 .10^{-4} \text{ s m}^2\text{C} / \text{J}$

Tableau 3 : Caractéristiques de l'échangeur faisceau-calandre

#### 4. Calcul de la différence de température logarithmique moyenne :

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

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

$T_{ce}$  : température d'entrée du fluide chaud (**102,5 °C**)

$T_{cs}$  : température de sortie du fluide chaud (**75 °C**)

$T_{fe}$  : température d'entrée du fluide froid (**25 °C**)

$T_{fs}$  : température de sortie du fluide froid (**68 °C**)

D'où :

$$\Delta T_{lm} = 41,771^\circ\text{C}$$

## 5. Correction de la différence de température logarithmique moyenne $\Delta T_{lm}$ : [8]

L'échangeur U225 possède deux passes cotés tube et une passes coté calandre, dans ce cas d'échangeur il faut introduire le coefficient de correction  $F$

Avec  $F$  obtenu à l'aide d'abaque, si nous considérons le cas de 1 passes du coté calandre, on aura :

$$R = 0.5548$$

$$P = 0,6395$$

Le graphe 13 représente le facteur de correction a l'aide d'abaque :

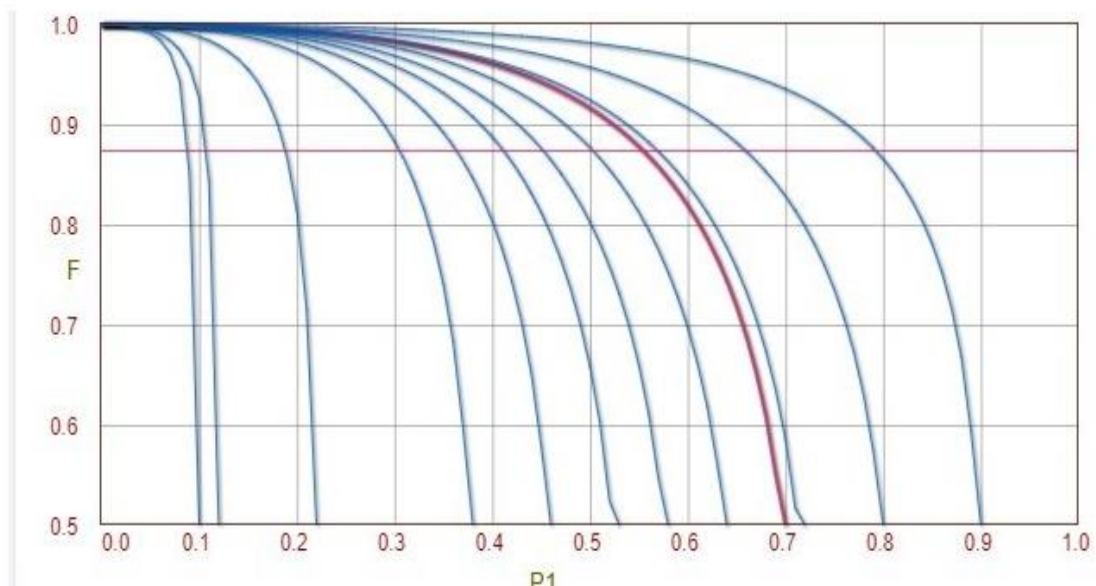


Figure 13 : Graphe de facteur de correction obtenu à l'aide d'un abaque

$$\Delta T_{lm} = 41.7718 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pour  $R = 0,5548$  et  $P = 0,6395$  le graphe donne  $F = 0,8734$

$$\Delta T_{lm \text{ corrigé}} = F \cdot \Delta T_{lm} = 36,4850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 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 :

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

En appliquant des différents paramètres, on obtient :

$$Q = 30000 \cdot 4,18 \cdot (68 - 25) = 5392200 \text{ KJ/h} = 1497,8 \text{ KWatt}$$

## 7. Calcul du coefficient global U :

Le coefficient d'échange globale qui est nécessaire de connaître et dont la détermination se fait par le calcul de deux coefficients d'échange par convection  $h_c$  et  $h_f$ , respectivement ducoté fluide chaud et froid.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + r_t + \frac{e}{\lambda_p} + r_c + \frac{1}{h_f}}$$

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  $r_c$

## 8. Calcul de coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi hf :

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

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

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

	Relations	Application numérique
Section de passage coté tube At en m <sup>2</sup>	$\frac{\pi}{4} \cdot Di^2$	1,39.10 <sup>-3</sup>
Vitesse massique vt en Kg/s.m	$\frac{M}{At} \cdot Nt$	117,50
Nombre de Reynolds	$\frac{Di \cdot vt}{\mu_f}$	6182,66
Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_f \cdot Cp}{\lambda_f}$	5,49
Nu	$0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	43,77
hf en J/m <sup>2</sup> .°C	$\frac{Nu \cdot \lambda_f}{Di}$	632,69

Tableau 4 : calcul du coefficient convectif entre le fluide froid et la paroi hf

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

$\lambda_f$  : 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

### 9. Calcul de coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi $h_c$ :

Le coefficient convectif entre le fluide chaud et la paroi noté  $h_c$  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  $h_c$

	Relations	Application numérique
Section de passage coté calandre $A_t$ en $m^2$	$(p - De) \cdot (B - ec)$	$4,51 \cdot 10^{-4}$
Vitesse massique $v_c$ En Kg/s.m	$\frac{M \cdot P}{Ac \cdot Di}$	114,18
Nombre de Reynolds	$\frac{De \cdot v_c}{\mu_c}$	22142,13
Nombre de Prandtl	$\frac{\mu_c \cdot Cp}{\lambda_c}$	68,26
Nu	$0.33 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.33}$	538,17
$h_c$ en $J/m^2 \cdot ^\circ C$	$\frac{Nu \cdot \lambda_c}{De}$	7151,40

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

**Avec :**

P : le pas triangulaire

B : espacement des chicanes

ec : épaisseur des chicanes

$C_p$  : Chaleur spécifique du fluide chaud

$\mu_c$  : viscosité dynamique coté calandre

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

De : le diamètre extérieur des tubes

$$De = Di + 2e_t \quad (7)$$



On obtient :

$$De = 50,42 \text{ mm}$$

Donc avoir après effectué tout ce calcul on obtient :

$$U = 484.73 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

## 10 . 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.

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

Avec :

$T_{ce}$  : température d'entrée du fluide chaud

$T_{cs}$  : température de sortie du fluide chaud

$T_{fe}$  : température d'entrée du fluide froid

$T_{fs}$  : température de sortie du fluide froid

$\phi_{réel}$  est le flux échangé réel

$\phi_{max}$  est le flux échangé max

$$\phi_{max} = \min(C_f, C_c) \cdot (T_{ce} - T_{fe})$$

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

$$C_c = m_1 \cdot Cp_1 = 192577 \text{ KJ/h} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_f = m_2 \cdot Cp_2 = 125400 \text{ KJ/h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Avec :

$C_c$  : Débit de capacité thermique du fluide chaud en  $\text{KJ/h} \cdot ^\circ\text{C}$

$C_f$  : Débit de capacité thermique du fluide froid  $\text{KJ/h} \cdot ^\circ\text{C}$

Application numérique :

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

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

Donc  $\varepsilon = 0,554 = 55,4\%$

## 11 \_Calcul de rendement :

Le calcul de rendement se fait par la relation suivante

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

D'après les données de la société on a  $\phi_{conception} = 3404,09$  et sachant que  $Q_{actuelle}$  est 1497,8

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

## VIII. Elaboration Du modèle de calcul de l'échangeur sur Excel :

Dans cette partie j'ai élaboré un modèle de calcul sur Excel afin de déterminer et l'effet de la température et l'influence du phénomène des tubes bouchés sur l'efficacité :

### 1. Influence de température sur l'efficacité :

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

		unites	fluide froid	fluide chaud
			fluide 1	fluide 2
Donnees	le débit	kg/h	1100	30000
	chaleur spécifique	kJ/kg.K	175,07	4,18
	temp E	°C	102,5	25
	temp S	°C	74,5	68
Calculs	$\Delta T1$	°C	34,5	
	$\Delta T2$	°C	49,5	
	$\Delta TLM$	K	41,54971052	
	la puissance thermique	KJ	-5392156	5392200
	facteur de correction		0,86	
	$\Delta TLM$ corrigé	K	35,73275104	
	$\epsilon$		0,554834182	

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

### 2. Résultats :

A partir de classeur on a effectué 4 essais pour savoir l'influence de la variation de température sur l'efficacité (Tableau 6)

Essais	T1	T2	t1	t2	Q <sub>c</sub>	Q <sub>f</sub>	Efficacité
<u>1</u>	<u>102.5</u>	<u>74.5</u>	<u>25</u>	<u>68</u>	<u>5392156</u>	<u>5392200</u>	<u>46%</u>
<u>2</u>	<u>102.5</u>	<u>74.7</u>	<u>25.5</u>	<u>69</u>	<u>5454900</u>	<u>5353640.6</u>	<u>55.4%</u>
<u>3</u>	<u>102.6</u>	<u>74.8</u>	<u>25.7</u>	<u>70</u>	<u>5353640.6</u>	<u>5555220</u>	<u>55.5%</u>
<u>4</u>	<u>102.7</u>	<u>74.9</u>	<u>26</u>	<u>71</u>	<u>5353640.6</u>	<u>5643000</u>	<u>55.6%</u>

Tableau 6 : 4 essais de variation de températures d'entrée et de sortie

### 3. Influence de phénomène de tubes bouchés :

#### 3.1. Calcul de l'efficacité sans tubes bouchés :

La figure 16 représente une copie d'écran d'un tableau élaboré sur Excel afin de calculer l'efficacité sans tubes bouchés

	donnees	les unites	les valeurs
Donnees	nombre des tubes n	sans unite	51
	diametre exterieure d2	m	0,05
	longueur de tube L		3,4
	diametre interieure d1		0,042
	coefficient de convection cotee froide paroi hi	watt/m².K	651
	coefficient de convection cotee chaude paroi he		7151
	conductivité thermique d'eau	watt/m.k	0,61
Calcules	q min	kj	125400
	R	sans unite	0,651162791
	la surface d'echange S	m²	27,2238
	coefficient d'echange globale U	watt/m².°C	521,1756556
	NUT		0,407321966
	efficacite E		0,531060064

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

$$\epsilon = 0,53 = 53\%$$

#### 3.2. Calcul de l'efficacité avec tubes bouchés (5 tubes) :

La figure 17 représente une copie d'écran d'un tableau élaboré sur Excel afin de calculer l'efficacité sans tubes bouchés

	donnees	les unites	les valeurs
Donnees	nombre des tubes n	sans unite	46
	diametre exterieure d2	m	0,05
	longueur de tube L		3,4
	diametre interieure d1		0,042
	coefficient de convection cotee froide paroi hi	watt/m².K	651
	coefficient de convection cotee chaude paroi he		7151
	conductivité thermique d'eau	watt/m.k	0,61
Calcules	q min	kj	125400
	R	sans unite	0,651162791
	la surface d'echange S	m²	24,5548
	coefficient d'echange globale U	watt/m².°C	521,1756556
	NUT		0,36738844
	efficacite E		0,462993118

Figure 16 : copie d'écran du classeur Excel pour calcul d'efficacité  $\epsilon$  avec tubes bouchés

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

#### 4. Interprétation des résultats de calcul :

Notre échangeur fonctionne correctement ce qui prouve ou confirme le calcul de l'efficacité qui a atteint les 55%.

Le tableau 6 montrent que l'efficacité de l'échangeur change avec la variation des températures d'où son influence.

Par ailleurs, le bouchage des tubes a causé une perte de chaleur correspondante à une diminution de l'efficacité de notre échangeur avec un pourcentage de 7 %

## Conclusion

Mon étude réalisée a apporté à nos connaissances des idées très claires sur la technologie des échangeurs de chaleur en général, mais surtout sur celle des échangeurs à faisceau et calandre et ainsi bien comprendre leur fonctionnement et leurs utilités dans le domaine de la production.

Notre travail était de déterminer l'efficacité de l'échangeur U225 sur une ligne de production et d'essayer de détecter les causes de la variation de cet efficacité pour cela, nous avons commencé à déterminer les caractéristiques de chaque fluide que ça soit le fluide caloporteur : vapeur d'eau ou le fluide procédé : l'eau ensuite on a essayé de déterminer par la méthode de  $\Delta T_{lm}$  l'efficacité d'une manière exacte ça atteint à 55 % puis nous avons calculé les rendements de l'échangeur U225.

Les calculs de vérification thermique nous ont permis d'évaluer la surface et le coefficient de transfert global d'échange thermique. Les résultats obtenus sont positifs étant donné que la surface est très proche de la surface réelle de l'échangeur, . Toutefois le bouchage des tubes fuyards donne lieu à une perte de flux échangé entre les deux fluides

La maintenance préventive est la voie qui mène vers la préservation du bon état de marche et la longue durée de vie de l'échangeur, ainsi que la réduction des arrêts improductifs de l'appareil. Dans ce sens le service maintenance est tenu de respecter les préconisations du constructeur et appliquer les opérations édictées dans le manuel d'entretien.

## **Références Bibliographique :**

[1] : Documents Internes de la CBGN

[2] : Anciens rapports de la CBGN

[3] : cours transfert thermique, Pr Saïd houache

[4] <http://gsi-energie.univ-rouen.fr/IMG/pdf/cours-iup-me-echangeurthermique-2.pdf> (04/05/2021)

[5] : <https://www.thermique55.com/principal/chapitre6.pdf> (20/05/2021)

[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) (25/05/2021)

[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) (1/06/2021)