

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème :

***Etude du fonctionnement des échangeurs
de chaleur d'une unité agroalimentaire***

Proposé et dirigé par :

M^{me} F. MEZIANI

M^{me} F. SOUAHI

Présenté par :

Nasma BOUCHELKIA

Dahbia TOUCHERIFT

Soutenu le 25 Juin 2012 devant le jury composé de :

M^{me} R. DERRICHE

Mme F. MEZIANI

Mme F. SOUAHI

M^{me} A. TCHOULAK

Mr M. NAKIB

M^{me} N. BERAKI

Présidente (Professeure ENP)

Promotrice (MAA, ENP)

Promotrice (Professeure ENP)

Examinatrice (MAA, ENP)

Examineur (MAA, ENP)

Invitée (Responsable Laboratoire)

Promotion Juin 2012

"دراسة عمل مبادلو الحرارة في وحدة انتاج غذائية"**ملخص:**

مبادلو الحرارة هم عناصر أساسية في التحكم في الطاقة المستخدمة في القطاعات الصناعية المختلفة. في قطاع الصناعات الغذائية، من المهم ضمان المحافظة على جودة ثابتة وصيانة الأمن الغذائي. من بين الطرق المستعملة لتلبية هذه المعايير نجد البسترة التي تستلزم توفر مبادل حراري متميز بخصائص ملائمة للتطبيق المرغوب فيه. في هذا السياق ركز عملنا على دراسة تفصيلية لمبادلو الحرارة في وحدة تصنيع المشروبات المرطبة بدون كحول. وقد تم الكشف عن مواطن الخلل واقترحت الحلول المناسبة والمليية لمتطلبات البيئية

الكلمات المفتاحية: التآكل - مبادل الحرارة - انسداد - مبستر - جودة المياه - مبرد

"Etude du fonctionnement des échangeurs de chaleur d'une unité agroalimentaire"**Résumé :**

Les échangeurs de chaleur sont des éléments essentiels de maîtrise d'énergie utilisée dans les procédés industriels les plus divers. Dans le secteur de l'agroalimentaire, il est important de veiller au maintien d'une qualité constante et de garantir une sécurité alimentaire. Un des moyens utilisés pour satisfaire ces critères est la pasteurisation qui doit disposer d'un échangeur de chaleur bien dimensionné à l'application désirée.

C'est dans ce contexte que notre travail s'est intéressé à une étude détaillée des échangeurs de chaleur au niveau d'une unité de fabrication de boissons rafraichissantes non alcoolisées. Des dysfonctionnements ont été détectés et des solutions appropriées et répondant aux exigences environnementales sont proposées.

Mots clés : Corrosion- Echangeur de chaleur- Encrassement- Pasteurisateur- Qualité de l'eau- Refroidisseur.

"Study of heat exchangers functioning in a food-processing unit"**Abstract:**

Used in various industrial processes, heat exchangers are essential elements of energy management.

Regarding the food-processing industry, it is crucial to ensure both the food security and a continuously good quality. Pasteurization is one important way among the means employed to fulfill these criteria and it should use a properly sized heat exchanger to the desired application.

In this context, our work has focused on a detailed study of heat exchangers in a production unit of soft drinks. Malfunctions have been detected and appropriate solutions, satisfying the environmental requirements, were proposed.

Keywords: Corrosion – Heat exchanger – Clogging – pasteurizer – Water Quality – Cooler.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui nous ont aidées et soutenues dans les moments difficiles.

*Tous d'abord nous remercions notre Grand **DIEU** de nous Avoir Guidé et Donné le courage et la force d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous adressons nos profonds remerciements à nos deux promotrices: Mesdames **Souahi** et **Meziani** pour leur patience et encouragement. Leur œil critique nous a été très précieux pour structurer ce travail et améliorer sa qualité.*

*Nos plus vifs remerciements vont à l'ensemble du personnel de l'unité étudiée, et plus particulièrement Madame **Beraki**, Monsieur **Zmit**, Messieurs **Sitouah**, **Boubazou** et **Rassoul**.*

Notre respect aux membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Nous tenons à exprimer tout notre respect et reconnaissance à:

*Monsieur **Nakib** pour son soutien scientifique et ces précieuses orientations.*

*Monsieur **Bennour** pour sa gentillesse et son aide.*

*Ami **Salah** qui nous a énormément soutenues.*

*Mesdames **Moussi** et **Bazouche** (ingénieurs à l'ADE), Messieurs **Jean Marc JAHN** (DG de Seaal), **GedeonAlric** (Expert Qualité Process Eau Assainissement à Seaal), **Jordi Nadal Duoso** (adjoint DG de groupe Chemipol) et **Boudjenoun** (Manager à Chemipol) pour leurs précieux soutien et aide.*

Dédicaces

*Je remercie tout d'abord et avant tout l'Éternel Dieu,
lui dont les preuves de soutien à notre égard sont toujours
indescriptibles et permanentes dans notre vie.*

Je le dédie ensuite:

*À la mémoire de mon père « Akli » qui m'a donné tout ce qu'il avait de précieux et
qui m'a rendu une femme et que j'aurais aimé qu'il soit aujourd'hui parmi nous.*

À celle qui m'est chère et qui m'a appris beaucoup....Ma mère

À mes frères et mes sœurs

À toute ma famille

À mon fiancé « Omar »

À tous mes ami(e)s qui se reconnaissent

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail...

À tous ceux qui me sont chers.

Dédicaces

Avant toute chose je remercie Allah Tout Puissant de m'Avoir Donné le courage et la patience pour accomplir cet humble travail, fruit des mes années de dur labeur.

Je dédie ce modeste travail à :

** La mémoire de mon cher père, « Je te promets Papa, que je ne te décevrais pas, et que tu feras toujours parti de ma vie. Reposes en paix mon cher ».*

** La lumière qui me montre le chemin quand je me sens perdue, Ma très chère mère « Louiza »; Puisse Dieu la garder.*

** Mes deux chers frères : Nassim et Mounir qui m'ont toujours encouragée et qui étaient toujours présents pour moi.*

** Ma chère cousine Nassima, mes deux chers oncles et tout les membres de ma famille.*

** La personne qui m'a toujours soutenue dans les moments difficiles.*

** Toutes mes copines à la cité universitaire « El-Alia » surtout Ibtissem, Fatiha, Meriem et Salma.*

** Tous les étudiants de l'école nationale polytechnique*

** Tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin.*

« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; Elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries. »

Figure I.1 : Différents types d'échangeurs tubulaires.....	4
Figure I.2 : Les éléments constitutifs d'un échangeur tubulaire.....	5
Figure I.3 : Les principales technologies des échangeurs à tube et à calandre.....	5
Figure I.4 : Les constituants d'un échangeur à plaques et à joints.....	7
Figure I.5 : Circulation dans un échangeur à plaque : contre-courant.....	7
Figure I.6 : Différentes géométries de plaques d'échangeurs.....	7
Figure I.7 : Circulation à co-courant et contre-courant.....	8
Figure I.8 : Appareils à une passe coté calandre.....	9
Figure I.9 : Appareils à deux passes coté calandre.....	9
Figure I.10 : Appareils à courant croisé.....	10
Figure I.11: L'encrassement d'un échangeur tubulaire.....	11
Figure I.12: Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide.....	14
Figure II.1 : Procédés de fabrication de la boisson fruitée.....	21
Figure II.2 : Procédés de fabrication de la boisson gazeuse.....	23
Figure II.3 : Procédés de fabrication de la boisson aromatisée.....	24
Figure II.4 : Procédés de traitement des eaux.....	25
Figure III.1 : Le pasteurisateur à plaques (photo prise sur site).....	28
Figure III.2 : Circulation des fluides dans le pasteurisateur à plaques.....	29
Figure III.3 : Variation de la température d'entrée de l'eau froide en fonction de la température de sortie du produit.....	33
Figure III.4 : Eléments de base d'un cycle frigorifique à absorption.....	35
Figure.III.5 : Eléments de base d'un cycle frigorifique à compression mécanique des vapeurs.....	36
Figure III.6 : Diagrammes enthalpique et entropique d'un réfrigérateur à compression mécanique de vapeur.....	37
Figure III.7 : Evolution des températures des deux fluides dans l'évaporateur.....	40
Figure III. 8: Flux de masse et d'énergie à travers l'évaporateur.....	41
Figure III.9: Flux de masse et d'énergie à travers le compresseur.....	41
Figure III.10 : Flux de masse et d'énergie à travers le condenseur.....	42
Figure III.11: Flux de masse et d'énergie à travers le détendeur.....	43
Figure IV.1 : Pasteurisateur multitubulaires (photo prise sur site).....	44
Figure IV.2: Variation en fonction du pH des rapport $[CO_2]/CMT$, $[HCO_3^-]/CMT$ et $[CO_3^{2-}]/CMT$	48
Figure IV.3 : Variation de la concentration de calcium et de magnésium dans l'eau traitée en comparaison avec l'eau de forage.....	53
Figure IV.4 : Adoucissement de l'eau (résine cationique).....	54
Figure IV.5 : Variation de la dureté totale entre l'eau de forage et l'eau traitée.....	54
Figure IV.6 : Variation de la dureté totale et la concentration des ions de calcium et de magnésium entre l'eau traitée et l'eau de refroidisseur.....	63

Tableau II.1. Organisation des ateliers de l'entreprise.....	20
Tableau III.1: Variation de la température d'entrée de l'eau froide en fonction de la température de sortie du produit désirée.....	32
Tableau IV.1 : Variation de la qualité d'eau selon la valeur de TH.....	49
Tableau IV.2 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de forage et de l'eau traitée, comparés à la norme algérienne.....	53
Tableau IV.3 : Résultats d'analyses microbiologiques de l'eau de forage et de l'eau traitée, comparés à la norme algérienne.....	56
Tableau IV.4 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau chaude et de l'eau de process, comparés à la norme algérienne.....	60
Tableau IV.5 : Résultats d'analyses microbiologiques de l'eau chaude et de l'eau de process, comparés à la norme algérienne.....	61
Tableau IV.6 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de refroidisseur et de l'eau de process, comparés à la norme algérienne.....	62
Tableau IV.7 : Résultats d'analyses microbiologiques de l'eau de refroidisseur et de l'eau de process, comparés à la norme algérienne.....	64

Etude de pasteurisateur à plaques		
Symbole	Définition	Unité
C	Capacité calorifique du produit	kJ/kg. K
c	Capacité calorifique de l'eau	kJ/kg. K
U	Coefficient globale de transfert de chaleur	kcal/h.m ² .°C
M	Débit massique du produit	kg/h
m	Débit massique de l'eau froide	kg/h
q _p	Débit volumique du produit	l/h
q _e	Débit volumique de l'eau	l/h
DTLM=ΔT _m	Différence de Température Moyenne Logarithmique	°C
ξ	Efficacité	
Q	Flux thermique	kJ/h
ρ _p	Masse volumique du produit	kg/m ³
ρ _e	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
S	Surface d'échange de chaleur	m ²
T ₁	Température d'entrée produit	°C
T ₂	Température de sortie produit	°C
t ₁	Température d'entrée eau froide	°C
t ₂	Température de sortie eau froide	°C
Refroidisseur		
Symbole	Définition	Unité
c _e	Capacité calorifique de l'eau	kJ/kg. K
C _f	Capacité calorifique du fréon R22	kJ/kg. K
m _e	Débit massique de l'eau chaude dans l'évaporateur	kg/s
M _f	Débit massique du fréon R22	kg/s
Δt	Différence de température d'eau	°C
H _e	Enthalpie massique à l'entrée du système ouvert	kJ/kg
H _s	Enthalpie massique à la sortie du système ouvert	kJ/kg
E	Energie totale du système ouvert	Kj
H _{V1}	Enthalpie massique de vapeur surchauffée à l'entrée de compresseur	kJ/kg
H _{V2}	Enthalpie massique de la vapeur surchauffée à la sortie de compresseur	kJ/kg
H _{V2r}	Enthalpie réelle de la vapeur surchauffée à la sortie de compresseur	kJ/kg
H _{L4}	Enthalpie massique du liquide sous-refroidi à l'entrée de détenteur	kJ/kg
H ₇	Enthalpie massique du mélange liquide-vapeur à l'entrée de l'évaporateur	kJ/kg
H _{V8}	Enthalpie massique de la vapeur surchauffée à la sortie de l'évaporateur	kJ/kg
S _{L4}	Entropie du liquide sous refroidi à la sortie du condenseur	kJ/kg.K
S _{V1}	Entropie de la vapeur surchauffée à l'entrée de compresseur	kJ/kg.K
S _{V2}	Entropie de la vapeur surchauffée à la sortie de compresseur	kJ/kg.K
P _{cond}	Pression de condensation	Bar

$P_{\text{évap}}$	Pression d'évaporation	Bar
P_1	Pression de la vapeur surchauffée à l'entrée de compresseur	bar
P_7	pression à l'entrée d'évaporateur	bar
P_2	Pression de la vapeur surchauffée à la sortie de compresseur	bar
$Q_{\text{évap}}$	Quantité de chaleur échangée au niveau d'évaporateur	kW
Q_{cond}	Quantité de chaleur échangée au niveau du condenseur	kW
η	Rendement isentropique de compresseur	/
$T_{\text{évap}}$	Température d'évaporation	°C
T_{cond}	Température de condensation	°C
T_1	Température de la vapeur surchauffée à l'entrée de compresseur	°C
T_2	Température de vapeur surchauffée à la sortie de compresseur	°C
T_{L4}	Température de liquide sous-refroidie à l'entrée de détenteur	°C
T_7	Température à l'entrée d'évaporateur	°C
W_{comp}	Travail absorbé par le compresseur	kW
W_{isent}	Travail isentropique absorbé par le compresseur	kW
W_{reel}	Travail réel absorbé par le compresseur	kW

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
<u>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE TRANSFERT THERMIQUE ET LES ECHANGEURS DE CHALEUR</u>	
<u>I.1. LE TRANSFERT DE CHALEUR</u>	2
I.1.1. Introduction.....	2
I.1.2. Modes de transfert de chaleur.....	2
<u>I.2. LES ECHANGEURS DE CHALEUR</u>	3
I.2.1. Introduction.....	3
I.2.2. Classification des échangeurs de chaleur.....	3
<u>I.2.2.1.</u> Classification Technologique.....	3
* Echangeurs tubulaires.....	3
* Echangeurs à plaques.....	6
<u>I.2.2.2.</u> Classification selon les modes de circulation des fluides.....	8
* Circulation à co-courant.....	8
* Circulation à contre courant.....	8
* Circulation utilisant simultanément le co-courant et le contre-courant.....	9
* Circulation à courant croisé.....	10
<u>I.2.2.3.</u> Classification fonctionnelle.....	10
* Fonction réfrigération.....	10
* Fonction réchauffage.....	10
* Fonction condensation.....	10
* Fonction évaporation.....	10
I.2.3. Les problèmes de fonctionnement d'un échangeur.....	11
<u>I.2.3.1.</u> L'encrassement.....	11
<u>I.2.3.2.</u> La corrosion.....	15
<u>I.2.3.3.</u> La vibration.....	18

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ETUDIEE

II.1. Introduction.....	19
II.2. Description du processus de fabrication.....	19
II.2.1. Plan d'organisation des ateliers.....	19
II.2.2. Procédés de fabrication.....	20
II.3. Problématique.....	26

CHAPITRE III: ETUDE DU PASTEURISATEUR A PLAQUES

III.1. Introduction.....	27
III.2. Bilan thermique sur l'échangeur de chaleur à plaques.....	29
III.3. Etude thermique du cycle du froid.....	34

CHAPITRE IV: ETUDE DU PASTEURISATEUR MULTITUBULAIRE

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Analyses, résultats, interprétations et recommandations.....	45
IV.2.1. Caractérisation des paramètres physico-chimiques de la qualité d'eau.....	45
IV.2.2 Caractérisation des paramètres microbiologiques.....	51
IV.2.3. Interprétation des résultats d'analyse et recommandations.....	52
CONCLUSION GENERALE	68
ANNEXES	69
BIBLIOGRAPHIE	80



Introduction générale

L'industrie alimentaire est confrontée de plus en plus à une réglementation stricte qui doit répondre aux normes d'hygiène et aux exigences de santé et de sécurité. Ces critères de qualité font appel à des systèmes utilisant une pasteurisation pour traiter thermiquement les fluides alimentaires. Plusieurs études sur l'efficacité de ce traitement ont permis de développer des technologies de traitement thermique pour offrir une large gamme d'échangeurs de chaleur et répondre aux différentes applications et domaines spécifiques de fabrication.

Notre travail s'est intéressé à une unité de fabrication de boissons rafraichissantes non alcoolisées où deux chaînes de pasteurisation sont utilisées et disposant chacune d'un type d'échangeur de chaleur, l'un à plaques et l'autre multitubulaire

La première partie de ce travail a consisté à faire un état des lieux pour bien comprendre le procédé de fabrication. Un premier diagnostic révèle des problèmes d'encrassement et de corrosion au niveau des échangeurs de chaleur. L'étape suivante a consisté à vérifier le dimensionnement des échangeurs pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences de l'étape pasteurisation. Les résultats ont confirmé le bon dimensionnement nécessaire au fonctionnement recherché de ces pasteurisateurs.

Afin de trouver les causes potentielles de ces problèmes, une étude détaillée des différents appareils composant cette partie du procédé de fabrication a été réalisée et des analyses physicochimiques et bactériologiques de l'eau en amont et en aval des deux étapes de pasteurisation ont été effectuées. Des solutions appropriées sont proposées pour essayer de remédier aux dysfonctionnements détectés.

Ce manuscrit est structuré comme suit :

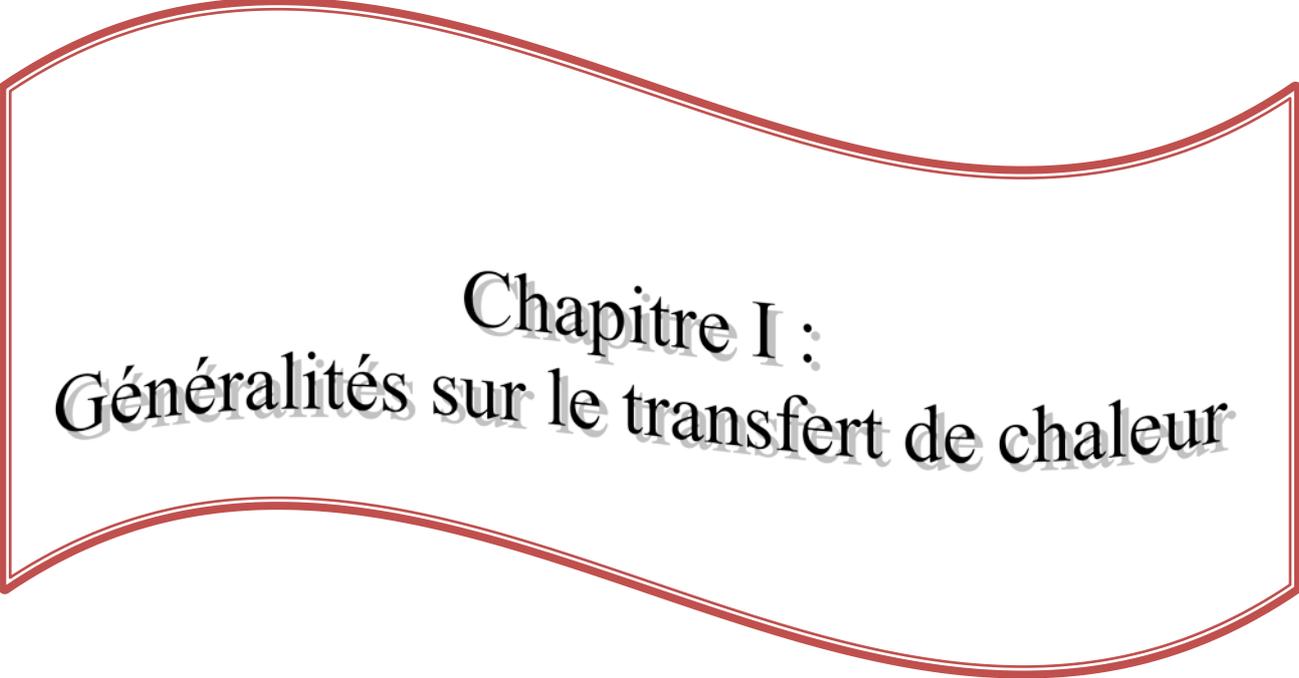
Le premier chapitre est consacré à la présentation des notions relatives au transfert thermique et aux échangeurs de chaleur.

Une brève présentation de l'entreprise fait l'objet du deuxième chapitre.

Le pasteurisateur à plaques est décrit dans le troisième chapitre où un bilan thermique sur l'échangeur et une étude thermique du cycle du froid se sont avérés nécessaires pour évaluer les performances de fonctionnement de ces appareils.

Le pasteurisateur multitubulaire est discuté dans le quatrième et dernier chapitre.

Enfin, une conclusion générale est donnée afin de synthétiser l'ensemble du travail effectué.



Chapitre I :
Généralités sur le transfert de chaleur

I.1. LE TRANSFERT DE CHALEUR

I.1.1. Introduction:

Le transfert de chaleur est une science qui étudie les différents processus de transmission de chaleur. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe une différence de température entre eux et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare.

I.1.2. Modes de transfert de chaleur:

Il existe trois modes de transmission de chaleur:

*** La conduction:**

On définit la conduction comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de températures entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact physique.

Ce mode nécessite la présence de matière mais sans déplacement de celle-ci [1]

*** La convection:**

La convection est un mode de transfert de chaleur ayant pour origine le mouvement d'un fluide (gaz, liquide). Elle intervient en particulier dans l'échange thermique entre une paroi et un fluide en mouvement.

La convection, en fait, est une combinaison des phénomènes de conduction et de transfert de matière. La paroi chaude cède par conduction pure de la chaleur au fluide adjacent qui la transmet de couche en couche par conduction, de plus le mouvement de fluide permet à l'énergie accumulée de s'écouler vers les régions les plus froides. [2]

On distingue la convection forcée dans laquelle le mouvement du fluide est produit par une action extérieure (pompe, ventilateur,.....), et la convection naturelle (libre) dans laquelle ce mouvement résulte simplement de la différence de densités qui sont elles même dues aux différences de températures au sein du fluide [3].

*** Le rayonnement:**

Le rayonnement thermique, comme toutes les radiations électromagnétiques, n'exige pas de support matériel pour se propager et représente de ce fait la seule possibilité d'échange thermique entre des corps distants, placés dans un milieu transparent, comme l'air et le vide [3].

Le rayonnement thermique est émis continuellement par tout les corps et dans toutes les directions.

I.2. LES ECHANGEURS DE CHALEUR:

I.2.1. Introduction:

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés.

D'une manière générale, deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. Le fluide chaud se refroidit et transmet une quantité de chaleur au fluide froid qui se réchauffe.

Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité 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.

I.2.2. Classification des échangeurs de chaleur:

I.2.2.1. Classification Technologique:

* *Echangeurs tubulaires [2 à 4]*

On peut distinguer trois catégories principales d'échangeurs tubulaires selon le nombre de tube et leurs arrangements:

1. Echangeurs monotubes

Dans ce type d'échangeur, le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent (figure I.1.a)

2. Echangeurs coaxiaux (double tube)

Un des modèles les plus simples d'échangeurs que l'on puisse imaginer est constitué de deux tubes concentriques (les tubes sont le plus souvent cintrés). L'un des fluides s'écoule dans le tube central et l'autre dans l'espace annulaire. Les deux fluides pouvant circuler dans le même sens ou en sens contraire.

On limite l'utilisation de ces appareils aux liquides sales, très chauds et de faibles débits (figure I.1.b)

3. Echangeurs multitubulaires

Il existe quatre formes d'échangeurs multitubulaires:

3.1. Echangeurs à tubes séparés:

A l'intérieur d'un tube de diamètre de l'ordre de 100 mm, se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. (Figure I.1.c)

3.2. Echangeurs à tubes rapprochés:

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans (figure I.1.d)

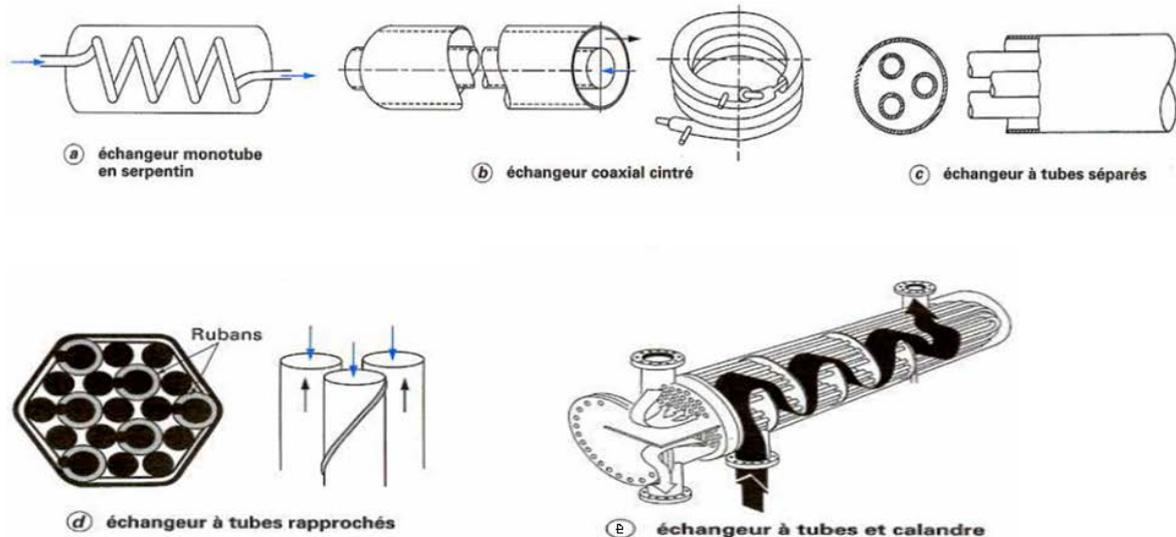


Figure I.1: Différents types d'échangeurs tubulaires [4]

3.3. Echangeurs à tubes ailettés:

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique. Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons : transversale et longitudinale.

3.4. Echangeur à tubes et à calandre (figure I.1.e)

C'est l'échangeur actuellement le plus répandu. L'appareil est constitué par un faisceau de tubes montés sur deux plaques tubulaires et portant un certain nombre des chicanes. A chaque extrémité sont fixées les boîtes de distribution qui assurent la circulation des fluides à l'intérieur de faisceau en plusieurs passes.

Le faisceau est logé dans une calandre, munie des tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide qui circule à l'extérieur des tubes suivant le chemin imposé par les chicanes [5].

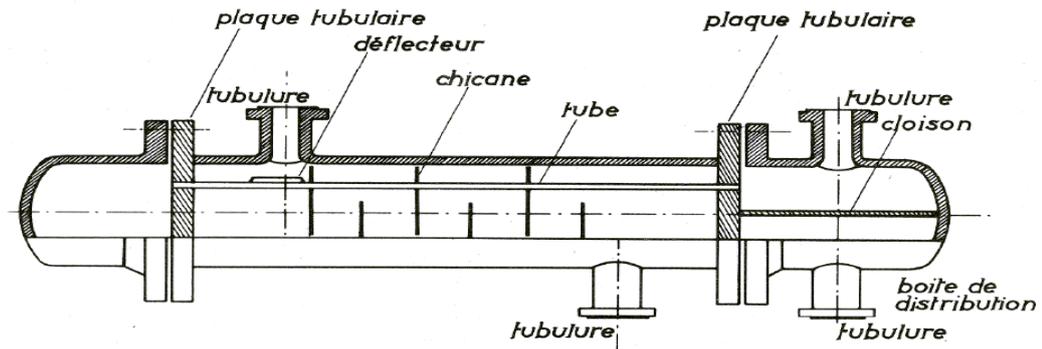


Figure I.2: les éléments constitutifs d'un échangeur tubulaire [5]

Les principales technologies d'échangeurs à tubes et calandre sont représentées sur la figure I.3 et, pour faire un premier choix, les deux paramètres principaux sont l'encrassement et l'écart de température entre les deux fluides.

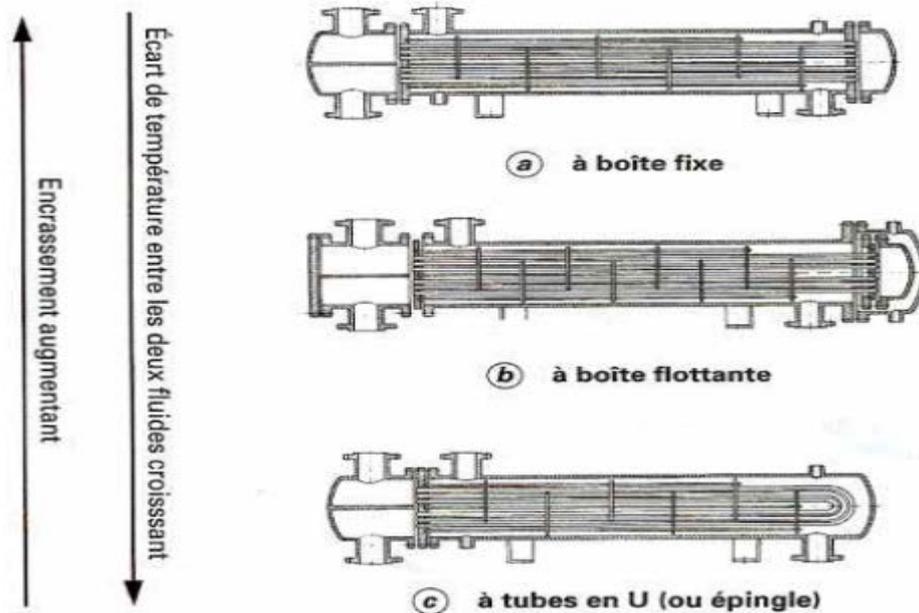


Figure I.3 : les principales technologies des échangeurs à tube et à calandre [4]

a) Echangeur à plaques tubulaires fixes:

Les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre. Ces échangeurs permettent de loger un maximum de tube à l'intérieur de la calandre. Cependant, ils ne sont utilisés que si l'écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid n'est pas très élevé (40°C max). D'autre part, le nettoyage des tubes à l'extérieur ne peut se faire que par voie chimique.

Ce type d'appareil est utilisé dans le cas des liquides propres.

b) Echangeur de chaleur à tête flottante:

L'une des plaques tubulaires est fixée et bloquée entre les brides de la calandre et celle de la boîte de distribution, l'autre de diamètre inférieur porte la boîte de retour et peut coulisser à l'intérieur du capot qui ferme la calandre.

Dans ce type d'appareils, l'expansion thermique du faisceau ainsi que le nettoyage mécanique à l'extérieur des tubes sont possibles.

Ce type d'appareil est conseillé pour les écarts élevés de température et pour les fluides sales.

c) Echangeur à tube en U:

L'utilisation des tubes coudés supprime une plaque tubulaire et conserve les propriétés d'expansion thermique du faisceau (réaliser l'économie d'une plaque tubulaire), cependant, il est impossible de faire le nettoyage mécanique à l'intérieur des tubes, d'autre part le nombre de tubes est limité par suite du diamètre minimal de cintrage des tubes qui oblige le constructeur à laisser un espace libre au centre du faisceau.

* Echangeurs à plaques [4, 6 à 8]

Le concept des échangeurs à plaques date du début du siècle, ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis utilisés par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimie, nucléaire, agroalimentaire, etc.).

Les échangeurs à plaques sont constitués par un assemblage de plaques cannelées indépendante. Les plaques sont encastrées et serrées dans un bâti. Chaque paire de plaques adjacentes forme un canal et les fluides circulent alternativement dans les canaux.

L'échangeur le plus répandu à l'échelle industrielle est l'échangeur à plaques et à joints.

- Les échangeurs à plaques et à joints

Ils sont constitués d'un ensemble de plaques maintenues serrées entre deux plateaux, un plateau fixe ou bâti sur lequel se trouvent généralement les raccords et un plateau de serrage mobile.

Les plaques sont munies d'un joint d'étanchéité périphérique, leur empilage est guidé par des barres de guidage, le serrage est assuré par des tirants, après serrage, le joint assure l'étanchéité de l'échangeur constitué et la répartition des fluides dans les canaux formés entre deux plaques consécutives.

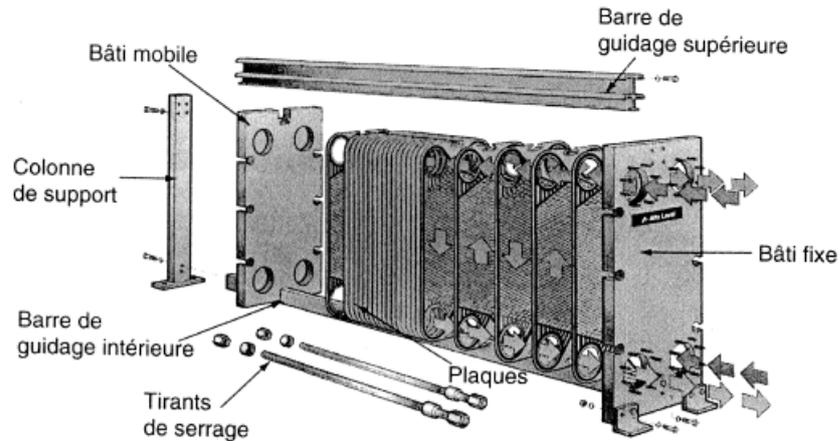


Figure I.4 : Les constituants d'un échangeur à plaques et à joints [7]

La solution la plus simple consiste à organiser des circuits en parallèle pour chacun des fluides, la circulation étant le plus souvent à contre-courant (figure I.5)

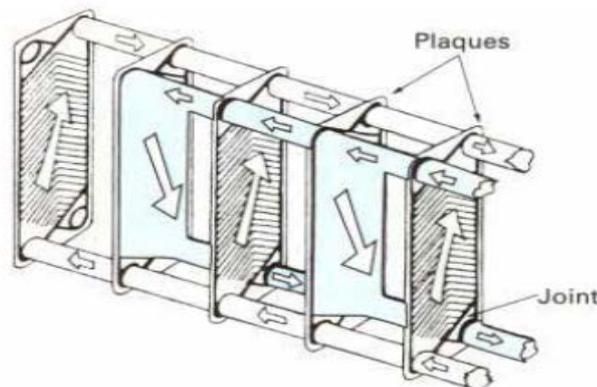


Figure I.5 : Circulation dans un échangeur à plaques : contre courant [4].

Le dessin des plaques et de leurs cannelures varie d'un constructeur à l'autre (figure I.6), il existe une soixantaine de dessins de plaques. Les plaques sont obtenues par emboutissage. Les matériaux utilisés sont en général l'acier inoxydable, le titane, etc. Les cannelures ont pour but essentiel d'augmenter les turbulences pour accroître les coefficients d'échange thermique, mais également d'assurer la rigidité mécanique par un grand nombre de contacts métal-métal.

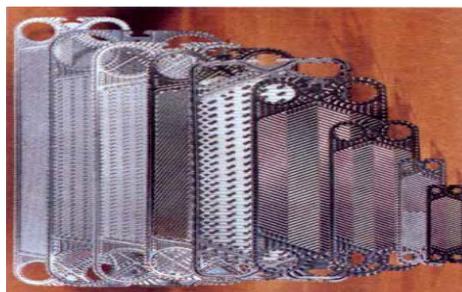


Figure I.6: Différentes géométries de plaques d'échangeurs [4]

Avantages et inconvénients des échangeurs à plaques et à joints:

La facilité de montage et de démontage des plaques permet une accessibilité totale et rapide pour inspection et nettoyage manuel, ainsi qu'une adaptabilité des performances en exploitation par modification de la surface d'échange (adjonction ou retrait de plaques) ou de l'efficacité (changement de l'arrangement des circuits).

Par ailleurs la fabrication aisée des plaques standardisées autorise en général des délais d'approvisionnement courts.

Par contre, du fait de l'assemblage des plaques par serrage et de la présence de joints multiples, l'utilisation de ces échangeurs est peu recommandée pour des conditions relativement sévères de température (au-dessus de 200°C) et de pression (au-dessus de 25 à 30 bars).

I.2.2.2. Classification selon les modes de circulation des fluides: [3 et 7]

Une classification des échangeurs peut être établie d'après le sens relatif des écoulements des deux fluides. On distingue ainsi:

* Circulation à co-courant (à courants parallèles):

Les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans le même sens.

* Circulation à contre courant:

Les deux fluides s'écoulent en sens contraire

Les appareils les plus courants sont: figure I.7.

- Les échangeurs tubulaires (double tubes, à faisceau et à calandre)
- Les échangeurs à plaques.

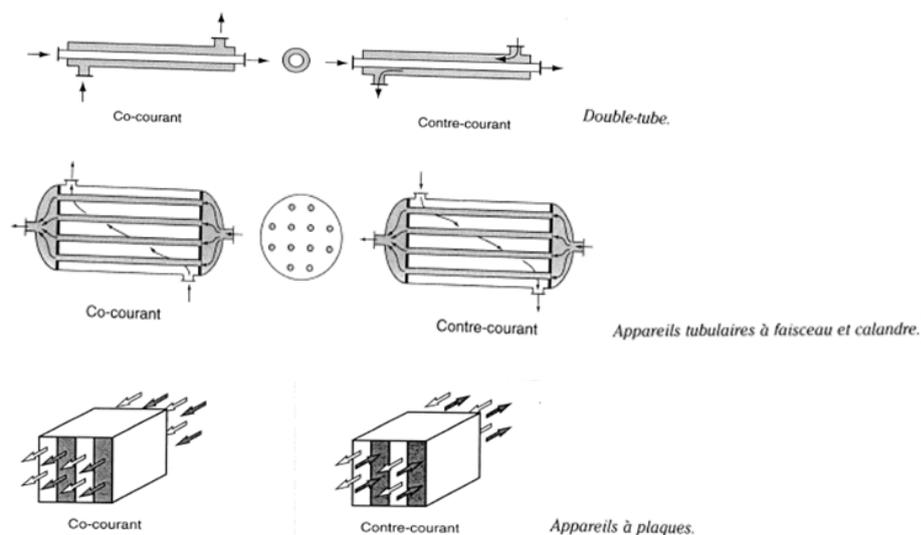


Figure I.7: Circulation à co-courant et contre courant [7]

✱ Circulation utilisant simultanément le co-courant et le contre courant :

Ce type de circulation est réalisé le plus souvent dans des appareils tubulaires à faisceau et calandre:

Appareils à une passe coté calandre et 2, 4 ou 6, passes coté tubes. Le nombre de passes coté tubes est pair, souvent égal à 2, 4 parfois à 6, rarement égal ou supérieur à 8 en raison des contraintes de perte de charge.

Exemples:

- **Appareils 1-2** (Figure I.8) : une passe coté calandre, deux passes coté tubes. Le fluide coté tubes échange de la chaleur simultanément sur deux passes, l'une à contre-courant avec le fluide coté calandre, l'autre à co-courant.
- **Appareil 1-4** (Figure I.8) : une passe coté calandre, quatre passes coté tubes.

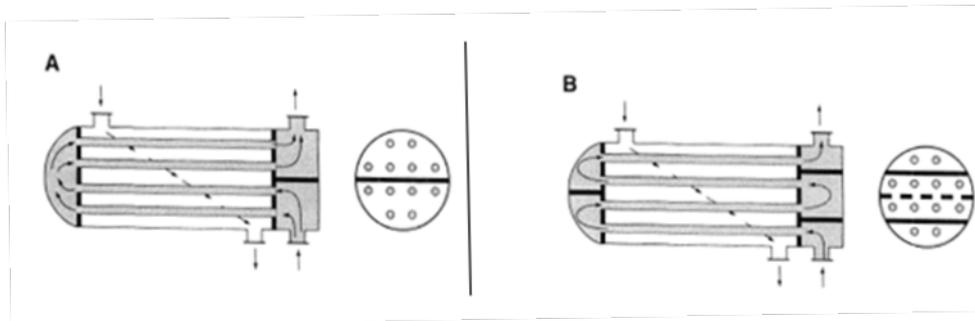


Figure I.8 : Appareils à une passe coté calandre. A: appareil 1-2, B : appareil 1-4 [7]

- **Appareils à 2 passes coté calandre** (Figure I.9)

Le nombre de passes coté tubes associé peut être égal à 4 ou 8.

Par exemple, l'appareil 2-4 associe deux (2) passes coté tubes à chacune des deux (2) passes coté calandre. Chacune des deux parties de cet appareil 2-4 fonctionne comme un appareil 1-2, les deux parties étant disposées en série. La mise en série respecte le contre-courant d'ensemble dans le cas du dispositif représenté ci-dessous, l'entrée d'un fluide se trouvant du coté de la sortie de l'autre.

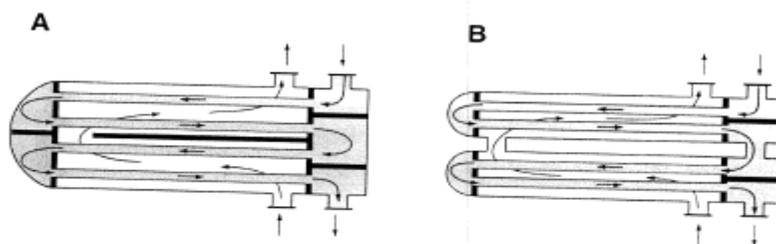


Figure I.9 : Appareils à deux passes coté calandre,

A: appareil 2-4.

B: deux appareils 1-2 en série.

✱ Circulation à courants croisés (avec ou sans brassage):

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre.

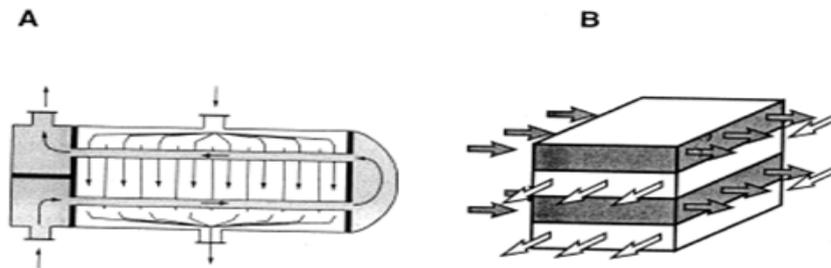


Figure I.10: Appareils à courant croisé.

A: 2 passes coté tube.

B: appareil à plaque. [7]

I.2.2.3. Classification fonctionnelle: [7]

Les échangeurs peuvent avoir à assurer des fonctions différentes, éventuellement simultanées, relativement aux objectifs concernant l'un des fluides ou les deux fluides participant à l'échange.

En général, la terminologie utilisée renseigne sur la fonction principale de l'échangeur:

✱ Fonction réfrigération:

Les réfrigérants refroidissent un liquide ou un gaz par circulation d'un fluide auxiliaire qui peut être un fluide de procédé ou de l'eau.

✱ Fonction réchauffage

Les réchauffeurs réchauffent un fluide de procédé par de la vapeur d'eau ou un autre fluide chaud de procédé.

✱ Fonction condensation

Les condenseurs assurent la condensation totale ou partielle de la vapeur par circulation d'eau ou de fluide de procédé suffisamment froid. Les aérocondenseurs assurent cette fonction en utilisant l'air comme fluide froid.

✱ Fonction évaporation

Les vaporiseurs assurent la vaporisation totale ou partielle d'un liquide de procédé, l'apport de chaleur étant fait par de la vapeur d'eau ou un fluide chaud de procédé éventuellement en condensation.

Les évaporateurs concentrent des solutions aqueuses par évaporation, cependant, ils peuvent désigner aussi des vaporiseurs.

I.2.3. Les problèmes de fonctionnement d'un échangeur [9 et 10]

Les principaux problèmes de fonctionnement rencontrés par les utilisateurs d'échangeur de chaleur sont liés aux phénomènes d'encrassement, de corrosion et de vibrations. L'encrassement et la corrosion restent les phénomènes les moins compris de l'industrie, ils se traduisent par :

- ✚ une dépense d'énergie supplémentaire.
- ✚ le remplacement des appareils corrodés.
- ✚ des coûts d'arrêt des installations pour démontage et nettoyage.

I.2.3.1. L'encrassement [9 à 12]

L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte une grande variété d'opérations industrielles.

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments. (Figure I.11)

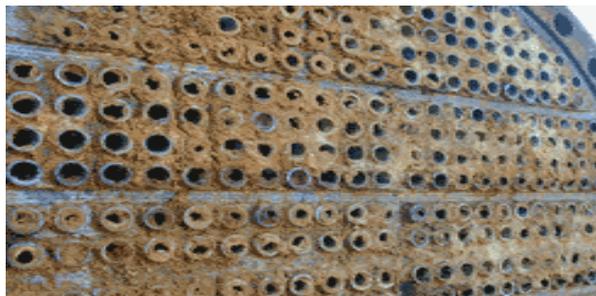


Figure I.11: L'encrassement d'un échangeur tubulaire [10]

Il est très important de considérer ce phénomène d'encrassement pour être en mesure de choisir un échangeur thermique qui ait les dimensions appropriées, car l'encrassement peut réduire considérablement la capacité de transmission de chaleur et d'augmenter la chute de pression. Un nettoyage et un entretien périodiques sont requis. Comme l'encrassement et les difficultés de maintenance augmentent avec le temps, les nettoyages doivent être fréquents.

Il est souvent important de prévoir certains types de cloisons qui filtrent les impuretés de fluides caloporteurs avant son admission dans l'échangeur afin de réduire les risques d'encrassement.

**) Aspect économique et environnemental de l'encrassement [10]*

Des efforts considérables sont fournis pour analyser le phénomène d'encrassement. Durant le fonctionnement, l'échangeur de chaleur devient encrassé avec l'accumulation des dépôts d'une ou plusieurs espèces sur les surfaces de transfert de l'échangeur. En conséquence, la résistance thermique augmente, ceci fait baisser les performances de l'échangeur. La couche d'encrassement bloque le passage du fluide et augmente la surface rugueuse, est ainsi réduit le taux de transfert de chaleur.

L'ampleur de l'encrassement sur la surface d'échange thermique par un fluide donné, dépend du type de transfert de chaleur (ébullition), du type de fluide (liquide, gaz), de la nature de la surface ainsi que du matériau utilisé.

Les inconvénients économiques de l'encrassement sont attribués à :

- De grosses pertes d'énergie provoquées par l'inefficacité thermique.
- Un coût élevé de maintenance pendant la période de nettoyage des échangeurs.
- De grosses pertes de production durant la période d'arrêt pour le nettoyage.

**) Catégories et types d'encrassement*

Six types différents d'encrassement peuvent être définis :

1. Encrassement particulaire:

Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels :

- L'eau des chaudières contient des produits de corrosion. Celle des tours de refroidissement contient des particules transportées par l'air ainsi que des produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer).
- Les écoulements gazeux peuvent être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles peuvent contenir des résidus solides de combustion.

2. Corrosion:

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits de la réaction qui se forment et s'accumulent sur la surface d'échange créent l'encrassement.

3. Entartrage:

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques.

4. Encrassement biologique:

Il est dû au développement de micro-organismes qui créent un film au contact de la surface d'échange.

Les actions de prévention consistent soit à détruire les micro-organismes, soit à empêcher leur développement. Les traitements correspondants utilisent des biocides et il est essentiel de maintenir la concentration du produit pendant le temps de réaction.

Le biocide le plus utilisé est le chlore qui est toxique pour la plupart des micro-organismes et a une action rapide. Le choix final du traitement à adopter est en général un compromis entre les problèmes de toxicité, de pollution, de coût et de maintenance.

La tendance à l'encrassement biologique est naturelle puisque les bactéries sont omniprésentes dans l'eau, en outre, les conditions physico-chimiques rencontrées dans les échangeurs sont le plus souvent favorables à son développement.

5. Encrassement par réaction chimique :

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation, il en résulte la formation d'un dépôt.

Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

6. Encrassement par solidification

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites forcées ou de givre). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation du givre).

Remarque: La plupart des dépôts réels sont le résultat de la combinaison d'au moins deux des types précédemment décrits. Dans les échangeurs refroidis à l'eau par exemple, les dépôts peuvent provenir de l'entartrage, de l'encrassement particulaire, de la corrosion et de l'encrassement biologique. Au stade initial de la formation du dépôt, un type peut prédominer et accélérer ainsi la contribution des autres.

**) Nature du dépôt [10]*

Dépôt dur

Il s'agit d'une structure dense et renforcée qui ne s'atténue pas lors d'un simple jet d'eau ou de vapeur mais qui nécessite un traitement mécanique ou un nettoyage chimique approprié.

C'est le cas de dépôt corrosif ou cristallin.

La résistance thermique d'un dépôt dur est directement proportionnelle à son épaisseur.

Dépôt poreux

C'est le matériau d'un dépôt dur qui se présente en une structure moins dense, sous l'effet des conditions opératoires. Ce cas est plus sérieux que le précédent quand le fluide emprisonné dans les pores a une conductivité thermique plus faible que le matériau solide.

Dépôt mou

C'est le cas de boues et de poudres de coke. La résistance dans ce cas est plutôt liée au fluide emprisonné qu'au matériau constituant la matrice.

Un simple soufflage peut donner des résultats satisfaisants lors du nettoyage.

**) Apparition et développement de l'encrassement*

On distingue cinq phases principales:

✓ Initiation

Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.

✓ Transfert des particules à la paroi

Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente ou la sédimentation, ces mécanismes peuvent coexister.

✓ Adhésion des particules

Les particules transférées à la paroi peuvent s'y maintenir grâce aux forces d'adhésion dues à l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals) et aux forces électriques.

✓ Réentraînement des particules déposées

Le réentraînement des particules déposées dû aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est enlevée de la surface immédiatement après leur dépôt et une autre est enlevée plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassante sont responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendent du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface.

✓ Vieillissement du dépôt

Il s'agit d'un changement de texture du dépôt d'origine chimique ou cristalline. On peut alors observer soit sa consolidation, soit son écaillage.

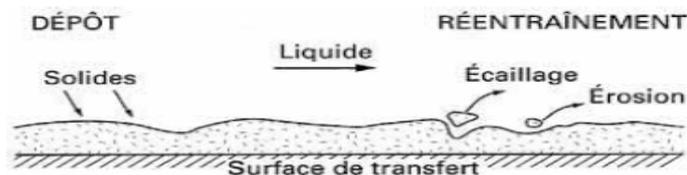


Figure I.12: Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide [9]

I.2.3.2. La corrosion: [13 à 18]

La corrosion des matériaux métalliques, métaux et alliages constitue l'ensemble des phénomènes qui provoquent leur destruction progressive par passage à un état oxydé, thermodynamiquement plus stable, qui est celui que l'on rencontre dans les minerais à l'état naturel.

En service, les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux.

Les mécanismes de dégradation des matériaux métalliques et non métalliques sont pratiquement toujours différents dans leur principe mais ils conduisent au même résultat pratique, c'est-à-dire à la destruction du matériau.

✧ Différents processus de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion. De même il n'y a pas de métal complètement résistant (d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées).

En général, on distingue quatre processus de corrosion:

1. Corrosion chimique (sèche):

Comme tous les phénomènes de corrosion, la corrosion sèche se manifeste par une dégradation des matériaux élaborés par l'activité humaine, entraînant leur retour à une forme plus stable.

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (généralement métallique) et une phase gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte.

L'absence d'électrolyte et la relative lenteur des phénomènes qui en découle imposent, pour que ce type de corrosion soit actif, une température élevée. On parle ainsi souvent de corrosion à haute température.

L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides qui sont des agents corrosifs, la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, la réaction qui se produit est de la forme :



Le contrôle de la corrosion à haute température requiert tout d'abord de bien connaître les conditions de fonctionnement de l'application envisagée:

- Températures de travail, risque de surchauffe.
- Types de corrosion susceptibles de se produire.

2. Corrosion biochimique

Elle rassemble tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissent directement, ou par l'intermédiaire de leur métabolisme (les produits provenant de l'activité bactérienne tels que des acides organiques ou des gaz comme CO_2 , SO_2), jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement.

Il est aussi important de préciser que l'action des bactéries ne conduit pas à une nouvelle forme de corrosion, mais provoque une modification de la cinétique des réactions de corrosion, où elle favorise un type de corrosion qui, en l'absence des bactéries, n'aurait pas de raison de se manifester.

L'eau est l'élément indispensable au développement des micro-organismes (sans elle, ils ne peuvent survivre qu'à l'état de dormance) et à la corrosion aqueuse. Un autre élément est aussi très important, c'est le dioxygène.

Tout matériau métallique immergé en milieu non stérile se recouvre plus ou moins rapidement d'un film de matières organiques puis biologique, c'est ce qu'on appelle biofilm.

Ce biofilm joue un rôle spécifique dans les phénomènes de biocorrosion: c'est l'interface entre le milieu et le matériau.

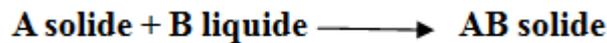
3. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).

Elle est provoquée par des mouvements de liquides qui détruisent leur couche de passivation et accélèrent donc ponctuellement le processus de corrosion.

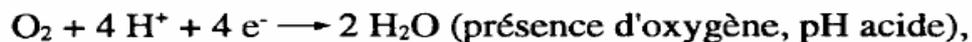
4. Corrosion électrochimique (humide).

C'est le phénomène de corrosion le plus important et il se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition.

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :



Dans tous les cas il y a oxydation du métal M à l'état d'ion M^{n+} et réduction d'une espèce oxydée (ox) en espèce réduite (red). Les ions M^{n+} formés sont solvatés, par exemple hydratés en milieu aqueux; la nature des réactions de réduction du proton ou de l'oxygène dissous dépend du pH; les réactions sont les suivantes:

★ Types de corrosion électrochimique:

On distingue deux formes de corrosion: Uniforme et localisée.

➤ La corrosion uniforme (généralisée):

La corrosion généralisée se produit sur toute la surface de la pièce métallique qui est attaquée uniformément. Tous les points de la surface sont attaqués sensiblement à la même vitesse.

Cette corrosion est parfaitement contrôlable par la mesure de la perte de poids ou par la mesure de la diminution de l'épaisseur du métal.

La corrosion uniforme peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique.

➤ La corrosion localisée:

Les réactions anodique et cathodique se produisent sur des sites anodiques et cathodiques séparés. Les phénomènes de corrosion se décrivent en termes de piles.

Cette corrosion se manifeste chaque fois qu'il y a hétérogénéité, soit du métal, soit de la solution. Dans le premier cas il s'agit de métaux différents en contact, de phases différentes, de joints de grains, de zones soumises à des contraintes. Dans le second cas il s'agit de zones confinées ou de différences de concentrations des espèces réductibles entre deux points de la surface du matériau.

Ce type de corrosion est le plus dangereux car l'attaque se fait en certains endroits de la surface du métal. La perte de masse est relativement faible, mais ce type de corrosion est dangereux dans le cas par exemple de perforation de conduite ou de récipient.

Les différents types de la corrosion localisée sont :

✱ Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres n'affecte qu'une faible plage de la surface. Elle se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine des piqûres est liée à l'hétérogénéité de la surface qui est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode.

Elle est très dangereuse car elle est difficile à détecter, et elle se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses.

La présence de produit de corrosion à l'orifice de la piqûre ainsi la concentration élevée en oxygène dissous à la surface du métal peut favoriser la corrosion par piqûre

✱ Corrosion intergranulaire (intercristalline).

C'est une attaque sélective aux joints de grains, par suite d'hétérogénéités locales :

Appauvrissement de l'un des constituants ou au contraire, enrichissement par suite de précipitation lors d'un traitement thermique par exemple. Il y a alors création de piles locales avec dissolution des zones anodiques.

La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible

✱ Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un type de corrosion se produisant sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif. Elle se manifeste sous la forme de fissures. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.

✱ Corrosion sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

✱ Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)

Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux de natures différentes soient en contact. La différence de potentiel entre les deux métaux forme alors un couple galvanique. Celui qui présente un potentiel plus élevé lorsqu'il est isolé devient le siège d'un processus cathodique alors que celui qui a le potentiel le moins élevé jouera le rôle d'anode. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

* Corrosion par crevasses (corrosion caverneuse):

Cette corrosion est associée à la présence de petit volume de solution agressive stagnante du fait de la forme de la pièce.

I.2.3.3. La vibration [9]

Les vibrations constituent un paramètre essentiel à prendre en compte dans la conception d'un échangeur, au même titre que les transferts de chaleur ou les pertes de charge. Outre les aspects classiques (chocs, spectre de vibrations) issus du milieu extérieur, les échangeurs induisent leurs propres vibrations sous l'effet du fluide qui les parcourt.

Ce problème est rencontré essentiellement dans les échangeurs à tubes et à calandre, cet aspect vibratoire est peu ou pas rencontré dans les autres échangeurs.

Suivant la vitesse d'écoulement du fluide côté calandre, les tubes qui vibrent à leurs fréquences propres peuvent se déplacer suffisamment pour entrer en collision.



Chapitre II : Présentation de l'entreprise

II.1. Introduction:

L'unité étudiée est une société qui œuvre dans le secteur agro-alimentaire. Elle est implantée dans la zone industrielle d'Oued Smar (wilaya d'Alger).

La superficie totale du site est de 7950m² dont 4500m² bâtis. L'unité active dans le secteur des boissons rafraichissantes sans alcools (BRSA) par la fabrication de trois produits qui sont: les boissons fruitées (0.33 ml, 1.5 et 2l), les boissons gazeuses (33cl, 1 et 2l) et les boissons aromatisées (35 et 65ml) avec une capacité de production respectivement de 12000 bouteilles/heure, 20000 bouteilles/ heure et 30000 cartons de 75unités/ jour.

II.2. Description du processus de fabrication:[19 et 20]

II.2.1. Plan d'organisation des ateliers:

L'unité étudiée comporte les ateliers et les structures suivantes :

- Station de traitement des eaux de forage.
- Atelier de production des boissons fruitées.
- Atelier de production des boissons gazeuses.
- Atelier de production des boissons aromatisées (sucettes à congeler).
- Atelier de maintenance
- Laboratoire de contrôle de qualité
- Bloc administratif et commercial.

Les activités et les équipements de chaque atelier de production sont donnés dans le tableau II.1

Tableau II.1. Organisation des ateliers de l'entreprise.

Atelier	Activités	Equipement
Atelier de la boisson aromatisée	Préparation de sirop de sucre Pasteurisation Ajouts d'arômes Conditionnement dans les sachets plastiques alimentaires.	Un groupe du froid Une chaudière Une cuve de préparation Un pasteurisateur 35 machines de remplissage.
Atelier de la boisson fruitée	Préparation des mélanges Soufflage des bouteilles Remplissage et mise en bouchons Etiquetage et mise en fardeau.	Un compresseur de 40 bars. Un refroidisseur. Une chaudière Une machine de soufflage des préformes 04 cuves de préparation Un pasteurisateur Une machine de remplissage Une étiqueteuse Une imprimante Une fardeleuse
Atelier de la boisson gazeuse	Préparation de sirop Pré-mixage Carbonatation Remplissage des bouteilles Mise en bouchons Etiquetage et mise en fardeau.	Une cuve de stockage de CO ₂ Un refroidisseur. 02 compresseurs. 02 cuves de pré-mixe. Une remplisseuse Une imprimante Une étiqueteuse Une fardeleuse

II.2.2. Procédés de fabrication :

a. procédé de fabrication des boissons fruitées

Les différentes étapes de ce procédé sont les suivantes :

1. Préparation du jus

- Préparation du mélange constitué d'eau traitée, de sucre, d'arôme, d'acide citrique, d'acide ascorbique, de benzoate de sodium, de sorbate de potassium et d'émulsion naturelle.

Ce mélange subi un contrôle de qualité au niveau du laboratoire de l'unité.

- Ajout du concentré de fruit au mélange pour constituer le sirop.

- Ajout de l'eau au sirop (12000 litres par coulée) pour l'obtention du jus.

- Pasteurisation du jus qui se fait à 90°C-105°C pendant 20 à 30 secondes.

2. Conditionnement du jus:

- Parallèlement à la préparation du jus, il y a l'étape de soufflage des bouteilles. Cette étape se déroule dans la salle de soufflage où l'air sous pression est injecté dans les préformes de bouteilles placés dans des moules et chauffés à 175°C.

- Après pasteurisation, le remplissage des bouteilles s'effectue dans une salle stérile munie de lampes à rayon Ultra Violet qui assurent la stérilisation continue du jus.

- Les bouteilles remplies sont par la suite étiquetées et datées et mises en fardeaux (Cette étape consiste à grouper les bouteilles par lot de six qui est enveloppé par un film plastique rétractable. La rétraction du film est assurée par passage des fardeaux dans un four électrique porté à 175°C).

L'enchaînement de ces étapes est donné sur la figure II.1 :

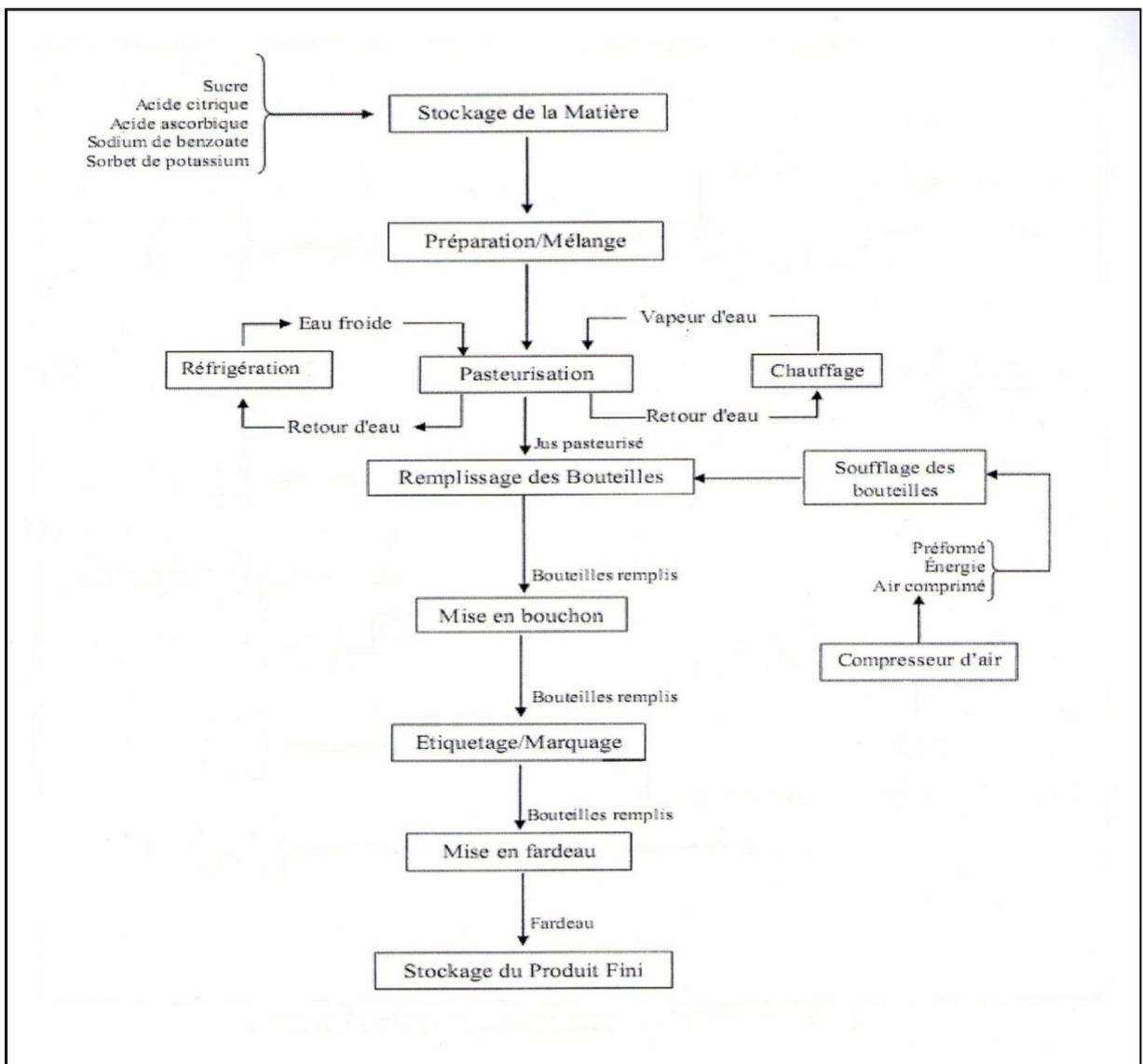


Figure II.1. Procédés de fabrication de la boisson fruitée

b. Procédé de fabrication des boissons gazeuses:

Les différentes étapes de ce procédé sont les suivantes :

1. Préparation de la boisson

- Préparation du sirop par mélange de l'eau et du sucre.
- ajout de l'acide citrique, du benzoate de sodium, des arômes et des colorants au sirop.
- Dilution du sirop par ajout de l'eau froide pour une meilleure carbonatation.
- Opération de carbonatation par ajout du CO₂

2. Conditionnement de la boisson:

- Soufflage des bouteilles par injection d'air à haute pression dans des préformes chauffés à température de ramollissement (175°C) disposés dans des moules refroidis. Les bouteilles ainsi obtenues sont stockées dans une trémie.
- Les bouteilles sont ensuite lavées à l'eau avant leur remplissage par le mélange gazéifié et l'injection complémentaire du CO₂.
- Les bouteilles remplies sont bouchonnées, étiquetées et datées.
- Les bouteilles étiquetées sont mises en fardeau de 6 ou de 12 bouteilles enveloppées d'un film plastique rétractable à chaud. La rétraction du film est assurée par le passage des fardeaux à travers un four tunnel porté à 175°C.

L'enchaînement de ces étapes est donné sur la figure II.2:

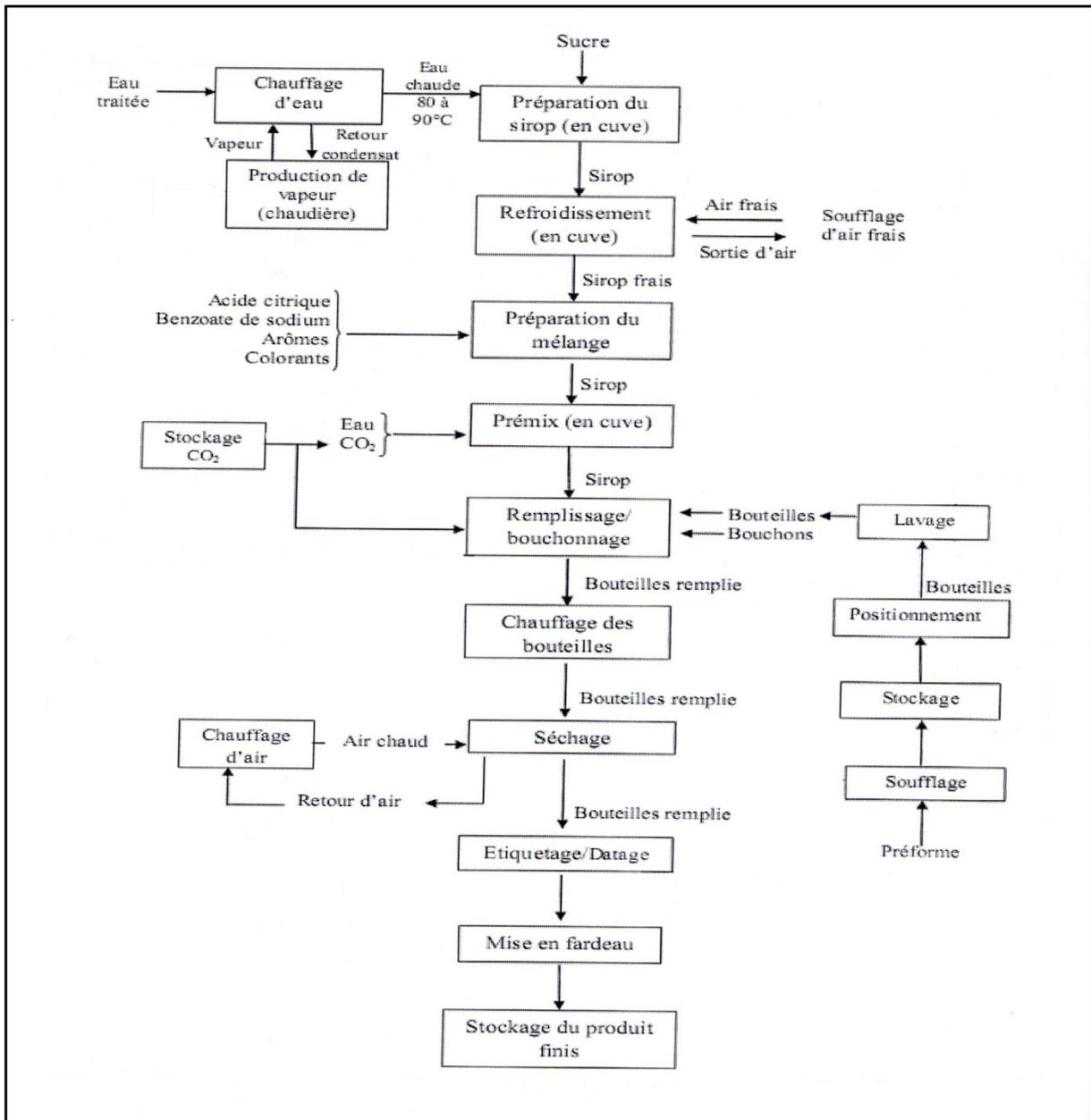


Figure II.2. Procédés de fabrication de la boisson gazeuse

c. procédé de fabrication des boissons aromatisées (sucettes à congeler) :

Les différentes étapes de ce procédé sont les suivantes :

- Préparation du mélange (sucre et acide citrique)
- Ajout de l'eau et des conservateurs (Benzoate de Sodium et Sorbate de Potassium)
- Pasteurisation de la solution préparée à 95°C pendant 20 à 30 secondes
- Prélèvement d'échantillons afin d'effectuer des analyses physico-chimiques et microbiologiques au niveau du laboratoire de contrôle qualité.
- Aromatisation de la solution
- Conditionnement de la solution aromatisée dans des tubes en plastique alimentaire.

Ces étapes élémentaires sont organisées et articulées conformément au schéma du procédé illustré par la figure II.3 ci-dessous :

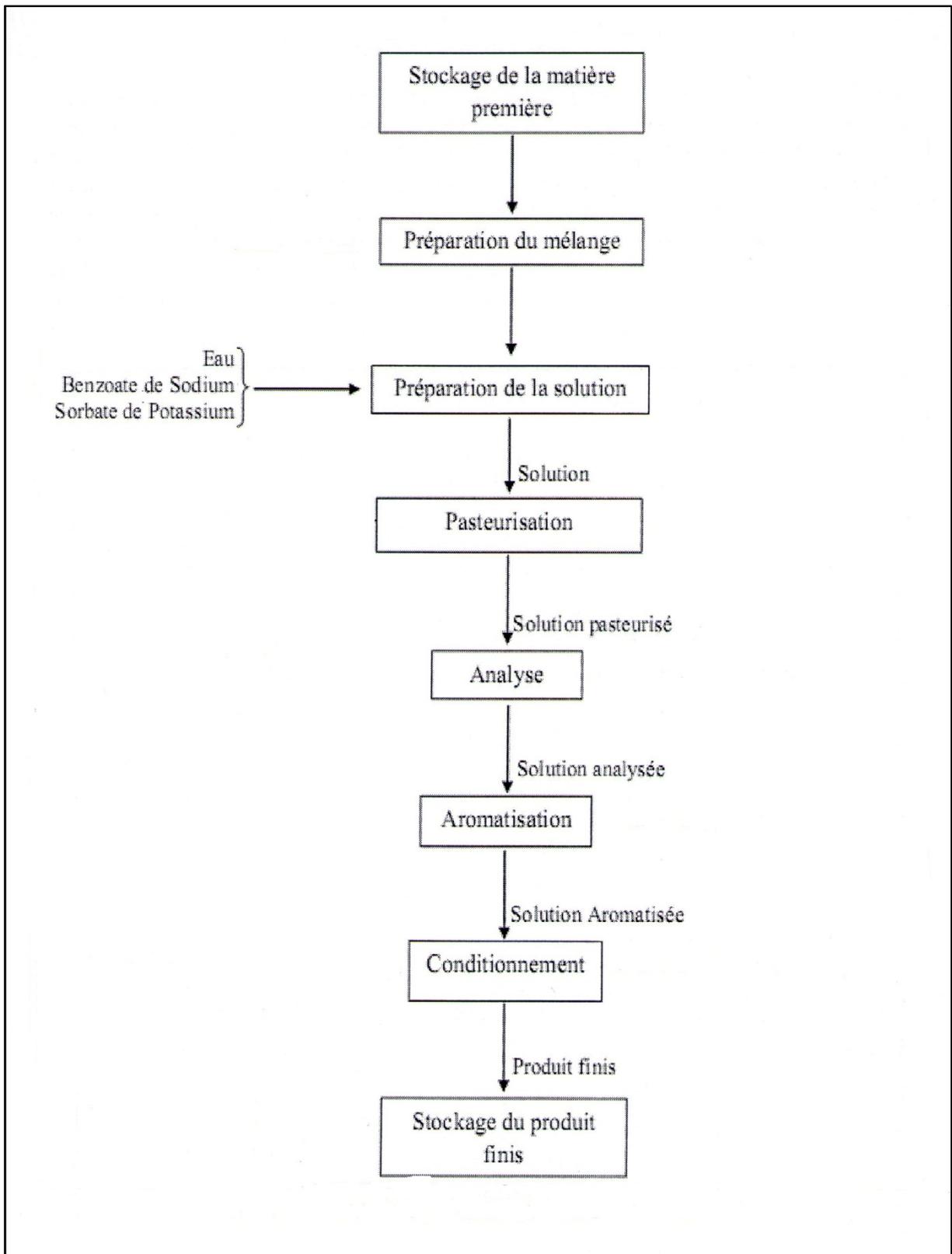


Figure II.3. Procédés de fabrication de la boisson aromatisée.

II.2.4. Procédés de traitement des eaux:

L'eau utilisée dans l'unité provient d'un forage et subit des traitements avant son utilisation. Après pompage, l'eau de forage est stockée dans une bache d'eau d'une capacité de 1200 m³ à laquelle on ajoute de l'eau de javel pour stérilisation.

L'eau subit ensuite une première filtration sur un lit de sable pour éliminer les matières en suspension puis une deuxième filtration sur un lit de charbon actif afin d'éliminer les matières organiques dissoutes, le goût et les odeurs.

L'eau passe par la suite à travers une résine échangeuse d'ions où elle subit un adoucissement. La résine d'échange ionique est régénérée avec une solution saturée de chlorure de sodium.

Avant d'être envoyée vers les différents ateliers, l'eau passe dans un réacteur UV où elle subit une désinfection secondaire permettant la stérilisation de la cellule vivante.

Le schéma du procédé de traitement d'eau est représenté dans la figure II.4 ci après :

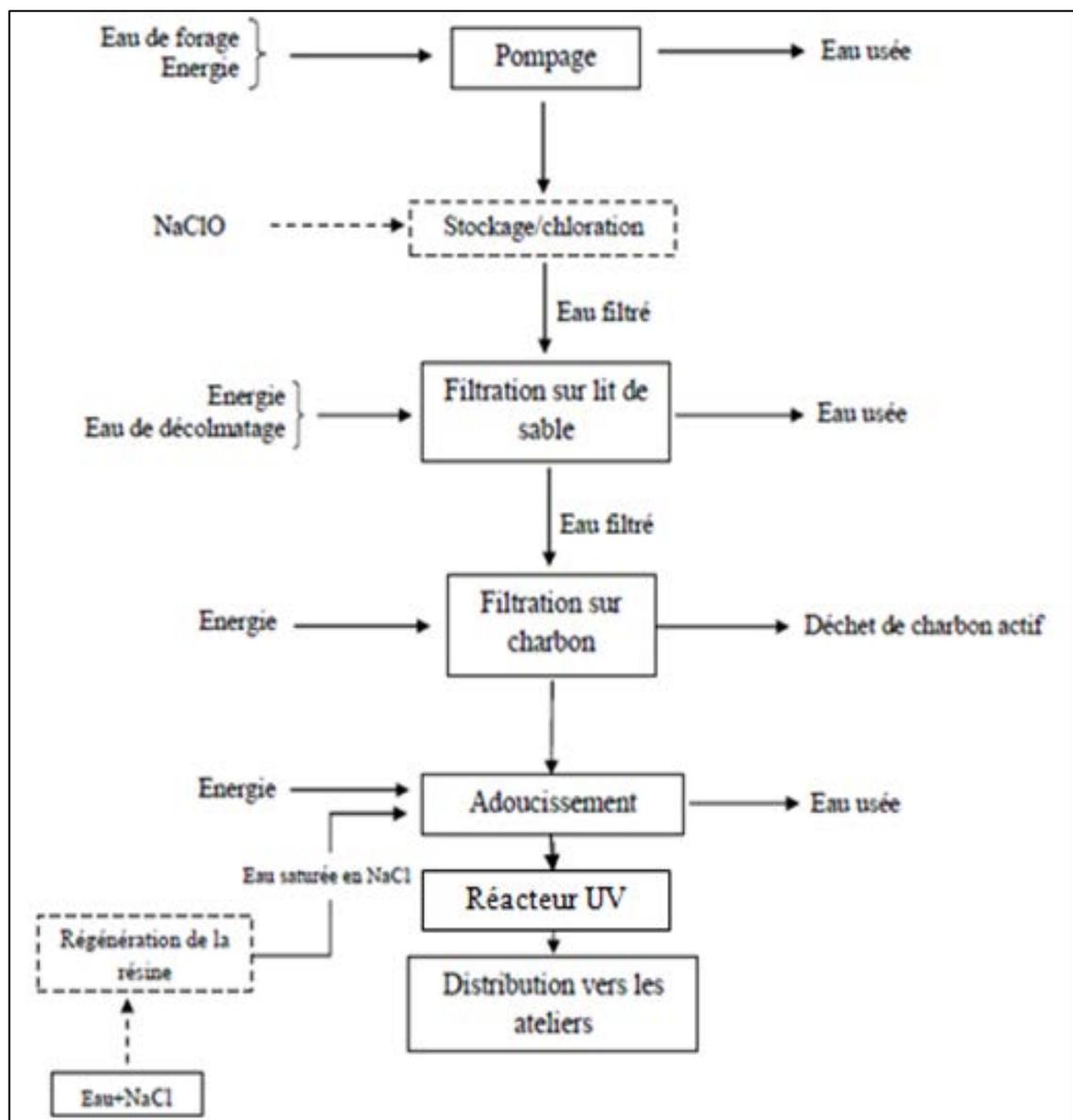


Figure II.4. Procédés de traitement des eaux

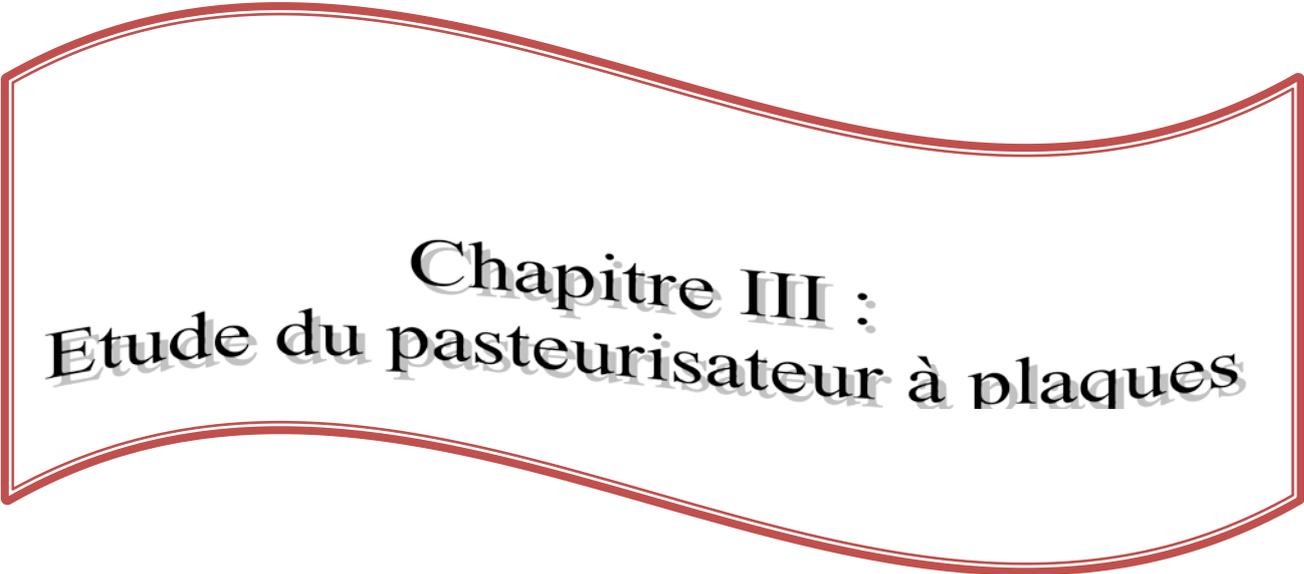
II.3. Problématique:

Deux types d'échangeurs sont utilisés au niveau de l'unité étudiée. Il s'agit d'un échangeur à plaques et à joints et d'un échangeur multitubulaire.

Dans ce présent travail, nous nous intéressons à l'étude des problèmes liés aux dysfonctionnements de ces échangeurs. Après l'étude des deux pasteurisateurs, les résultats mettent en évidence les trois problèmes suivants:

- 1) Au niveau de l'échangeur multitubulaire (pasteurisateur de la boisson fruitée), la présence d'un important phénomène d'encrassement est constatée dans la partie parcourue par l'eau chaude.
- 2) En amont de ce pasteurisateur, le refroidisseur l'alimentant souffre d'un problème de corrosion (eau rouillée).
- 3) Concernant le pasteurisateur à plaques, la température de sortie du produit pasteurisé demeure trop élevée.

A tous ces problèmes, nous essayerons de proposer des solutions adéquates.



Chapitre III :
Etude du pasteurisateur à plaques

III.1. Introduction : [21 à 25]

Dans les unités de production agroalimentaire, l'élévation brusque et importante de la température des produits alimentaires permet l'élimination des micro-organismes néfastes. Cette opération, dite pasteurisation, s'effectue dans un échangeur de chaleur.

A l'origine, la pasteurisation consistait à porter la température d'un produit aux environs de 75°C pendant environ 15 secondes afin d'y détruire les micro-organismes pathogènes qui sont néfastes puisqu'ils provoquent des maladies chez les humains. Ensuite, on devait refroidir rapidement le produit. De nos jours, la température va souvent au-delà de 75°C sans toutefois dépasser 100°C.

Lors de la pasteurisation, on fait circuler le produit à traiter dans un échangeur de chaleur (à plaques ou tubulaire) qu'on appelle pasteurisateur, dans lequel on distinguera plusieurs sections:

- Section de récupération de chaleur
- Section de chauffage ou de pasteurisation proprement dite
- Section de refroidissement

1) *La section de récupération de chaleur*

C'est une section de préchauffage et de prérefroidissement. Le Produit entrant dans le pasteurisateur ayant une température proche de celle de l'ambiance est préchauffé dans cette section avant d'accéder à la zone de pasteurisation caractérisée par une haute température. Ce préchauffage se fait par échange thermique avec un produit déjà pasteurisé sortant du chambreur à une température très élevée. Le produit pasteurisé subit donc un prérefroidissement avant d'accéder à la section de refroidissement.

2) *La section de pasteurisation:*

L'apport thermique dans la zone de pasteurisation est assuré par de l'eau chaude à environ 95°C provenant d'un réservoir chauffé avec de la vapeur ou avec une résistance électrique. Cette eau chaude circule, à contre-courant avec le liquide alimentaire à traiter, et en circuit fermé.

Quelques appareils sont équipés d'un chauffage direct à la vapeur basse pression. Dans ce cas, la température de pasteurisation est assurée mais, la dissipation thermique, en cas d'interruption de débit, peut provoquer des sur-cuissons et peut gratiner le produit.

A sa sortie de la section de pasteurisation, le produit passe par un chambreur qui est un tube dont le volume permet, selon le débit, de maintenir la température de pasteurisation durant le temps nécessaire (en général compris entre 20 et 30s).

Un chambreur est habituellement constitué d'un tube hélicoïdal ou en zig-zag et est souvent recouvert d'une enveloppe métallique évitant aux opérateurs de se brûler.

3) Section de refroidissement

Une fois pré-refroidi dans la section de récupération de chaleur, le produit est refroidi dans cette section par échange de chaleur avec de l'eau froide.

Dans le cas où la suite du traitement nécessite des températures élevées, cette section est omise.

★ Dans l'unité étudiée, la pasteurisation de la boisson aromatisée s'effectue dans un échangeur de chaleur à plaques et à joints illustré par la figure III.1:



Figure III.1: Le pasteurisateur à plaques (photo prise sur site)

Ce pasteurisateur est constitué de trois sections parcourues par des fluides à contre-courant :

- ♣ La section de pasteurisation : dans laquelle se fait la pasteurisation du produit par échange de chaleur avec une vapeur (à 105°C) provenant d'une chaudière.
- ♣ La section de récupération de chaleur : dans laquelle le produit subit un prérefroidissement et/ou un préchauffage.
- ♣ La section de refroidissement : dans laquelle le produit est refroidi avant de quitter le pasteurisateur. Ce refroidissement s'effectue par échange de chaleur avec une eau froide provenant d'un refroidisseur.

Un des problèmes rencontrés dans l'unité étudiée est au niveau de ce pasteurisateur. Il s'agit de la difficulté d'atteindre la température de sortie du produit désirée (<18°C).

Actuellement, l'atteinte d'une température inférieure à 20°C est quasi-impossible, cela ne pose aucun problème avec la recette de la boisson aromatisée, mais des modifications sur cette recette seront effectuées par l'ajout d'un certain ingrédient (après pasteurisation) exigeant une température maximale de 18°C.

Avant d'entamer l'étude de ce problème, nous avons consulté le catalogue de cet équipement, dans lequel nous avons constaté que le fournisseur a exigé des conditions bien précises per-

mettant au produit d'atteindre à sa sortie une température de 15°C . Ces conditions concernent la température d'entrée d'eau froide, la température d'entrée du produit et celle de la pasteurisation. (Voir Annexe 1).

La première étape a été de vérifier que les conditions opératoires ont été respectées.

La mesure des températures a été effectuée à l'aide d'une sonde, les résultats sont consignés en annexe 1. Cela nous a permis de remarquer que l'eau froide arrive dans le pasteurisateur avec une température élevée (plus de 20°C).

Il est évident que le produit ne peut pas être refroidi au-dessous de cette température.

D'après les résultats obtenus, nous avons déduit que le problème concerne juste la section de refroidissement, et ça touche plus exactement l'entrée d'eau froide.

Pour déterminer les températures d'eau froide nécessaires pour bien refroidir le produit (l'atteinte des températures désirées), nous procédons à un bilan thermique au niveau de la section de refroidissement.

III.2. Le bilan thermique: [5]

La circulation des fluides à l'intérieur du pasteurisateur à plaques de l'unité étudiée est donnée sur la figure III.2:

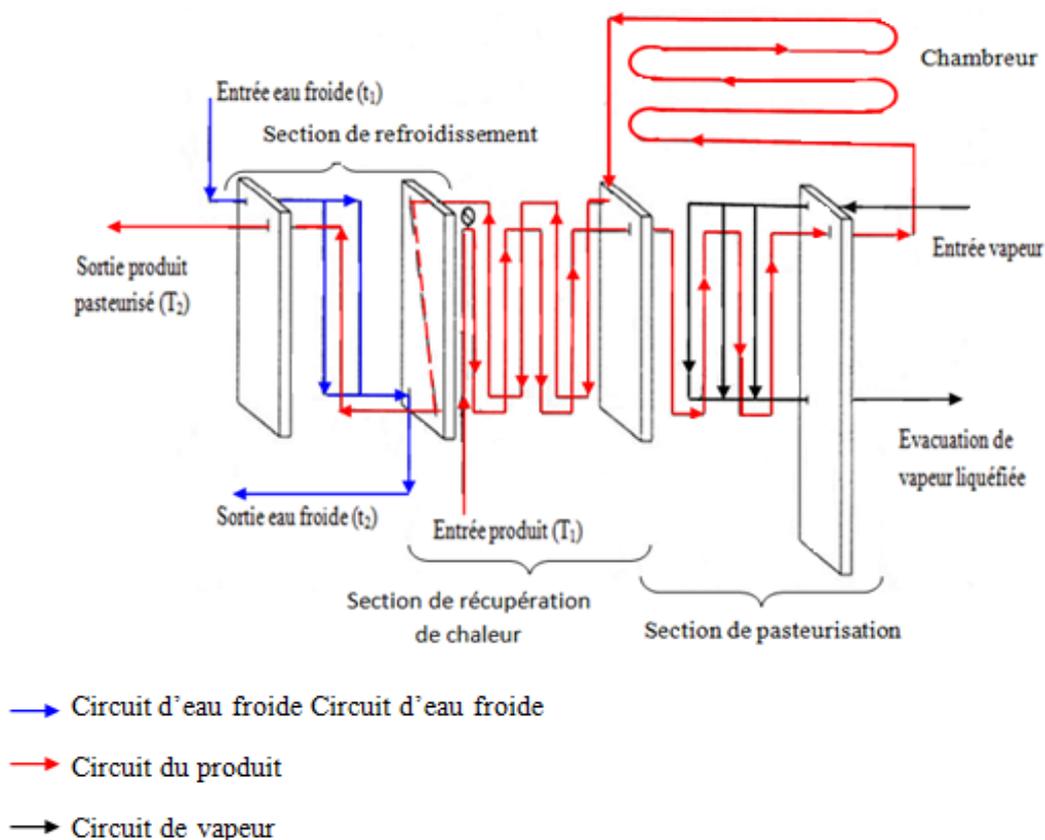


Figure III.2 : Circulation des fluides dans le pasteurisateur à plaques

L'étude thermique de la section de refroidissement est développée ci-après :

Si on néglige les pertes thermiques et si on ne prend en considération que les conditions d'entrée et de sortie des deux fluides, il est possible d'établir le bilan de l'appareil en écrivant que la quantité de chaleur fournie par le fluide chaud (le produit pasteurisé) est complètement récupérée par le fluide froid (l'eau).

Le bilan de chaleur dans cette section s'écrit donc comme suit:

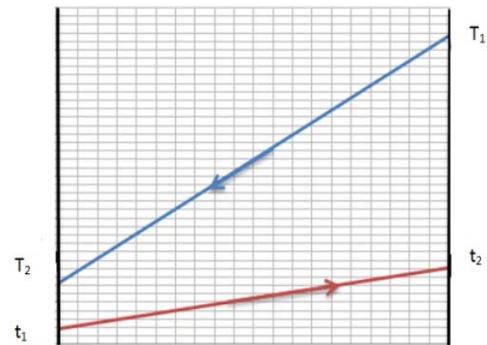
$$Q = MC(T_1 - T_2) = mc(t_2 - t_1) = US\Delta T_m \quad (\text{III.1})$$

L'expression de la différence de température logarithmique moyenne (DTLM) est donnée par la relation suivante :

$$DTLM = \Delta T_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (\text{III.2})$$

D'après (III.1) : $t_2 - t_1 = \frac{MC}{mc}(T_1 - T_2)$

Donc $t_2 = t_1 + \frac{MC}{mc}(T_1 - T_2)$ (III.3)



En remplaçant t_2 dans l'expression de la ΔT_m , nous trouvons:

$$\Delta T_m = \frac{\left((T_1 - T_2) \left(1 - \frac{MC}{mc} \right) \right)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1 - \frac{MC}{mc}(T_1 - T_2)}{T_2 - t_1} \right)} = \frac{MC}{US} (T_1 - T_2)$$

Donc : $\ln\left(\frac{T_1 - t_1 - \frac{MC}{mc}(T_1 - T_2)}{T_2 - t_1} \right) = \left[1 - \frac{MC}{mc} \right] \frac{US}{MC}$

On pose $B = \left[1 - \frac{MC}{mc} \right] \frac{US}{MC}$

$$T_1 - t_1 - \frac{MC}{mc}(T_1 - T_2) = (T_2 - t_1)e^B$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{\left(\frac{MC}{mc} - 1\right)}{(e^B - 1)} T_1 + \frac{\left(e^B - \frac{MC}{mc}\right)}{(e^B - 1)} T_2 \quad (\text{III.4})$$

Le tableau suivant regroupe la liste des données nécessaires pour le calcul :

Donnée	Valeur	Unité
Débit volumique du produit q_p	18000	l/h
Débit volumique de l'eau froide q_e	70000	l/h
Masse volumique du produit ρ_p	1060	Kg/m ³
Masse volumique de l'eau ρ_e	1000	Kg/m ³
Capacité calorifique du produit C	3,8	kJ/kg.K
Capacité calorifique de l'eau c	4,186	kJ/kg.K
Température d'entrée du produit T_1	35	°C

- **Calcul de rapport $\frac{MC}{mc}$:**
- $M = q_p \cdot \rho_p = 18 \cdot 1060 = 19080 \text{ kg/h}$
 $\rightarrow M \cdot C = 19080 \cdot 3,8 = 72504 \text{ kg/h.K}$
- $m = q_e \cdot \rho_e = 70 \cdot 1000 = 70000 \text{ kg/h}$
 $\rightarrow m \cdot c = 70000 \cdot 4,186 = 293020 \text{ kg/h.K}$

$$\text{Donc : } \frac{MC}{mc} = 0,247$$

- **Calcul du produit U.S:**

D'après le fournisseur de l'échangeur à plaques de l'unité (groupe AVE). Pour une entrée d'eau de 7°C dans la section de refroidissement, la température de sortie du produit est de 15°C, sachant que ce dernier arrive à cette section à une température de 35°C. Après échange, l'eau quitte le pasteurisateur avec une température de 12°C.

Ces données nous permettent de calculer le produit US:

$$\text{On a : } \Phi = MC (T_1 - T_2) = m c (t_2 - t_1) = U S \Delta T_m$$

$$\Phi = MC (T_1 - T_2) = 72504 (35 - 15) = 1450080 \text{ kJ/h}$$

Calcul de ΔT_m

$$\Delta T_m = \text{DTLM} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} = \frac{(35 - 12) - (15 - 7)}{\ln\left(\frac{35 - 12}{15 - 7}\right)} = 14,2^\circ\text{C}$$

$$\Phi = MC (T_1 - T_2) = 1450080 = U S \Delta T_m$$

$$U S = \frac{1450080}{14,2} = 102118,31 \text{ kJ/h. }^\circ\text{C}$$

$$\boxed{U S = 102118,31 \text{ kJ/h. }^\circ\text{C} = 28,366 \text{ kW/}^\circ\text{C}}$$

- **Calcul de B:**

$$B = \left[1 - \frac{MC}{m c}\right] \frac{US}{MC} = [1 - 0,247] \cdot 1,408 = 1,06$$

$$\boxed{B = 1,06}$$

- **Application numérique :** avec $T_1 = 35^\circ\text{C}$

$$t_1 = \frac{(0,247 - 1)}{(e^{1,06} - 1)} T_1 + \frac{(e^{1,06} - 0,247)}{(e^{1,06} - 1)} T_2$$

$$t_1 = -13,965 + 1,399 T_2 \quad (\text{III.5})$$

Pour chaque température de sortie du produit désirée, nous pouvons déterminer la température d'eau froide nécessaire en utilisant la relation (III.5)

$T_2(^\circ\text{C})$	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_1(^\circ\text{C})$	2,823	4,222	5,621	7,02	8,419	9,818	11,217	12,616	14,015

Tableau III.1 : Variation de la température d'entrée de l'eau froide en fonction de la température de sortie du produit désirée.

La relation entre T_2 et t_1 est exprimée graphiquement comme suit :

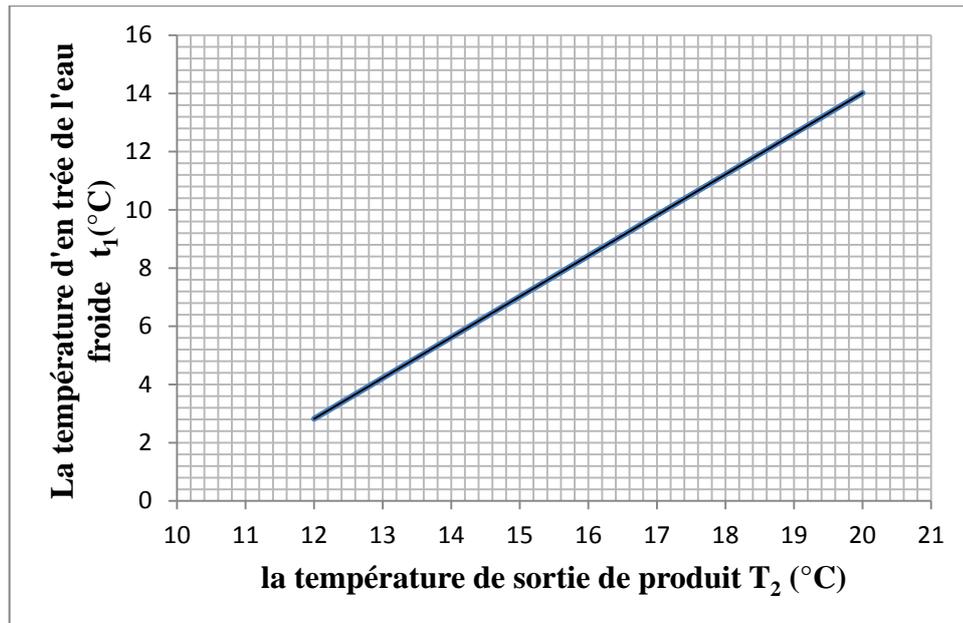


Figure III.3: Variation de la température d'entrée de l'eau froide en fonction de la température de sortie du produit.

Détermination de l'efficacité: [5 et 26]

L'efficacité (ξ) mesure le rapport entre le flux réel échangé par l'appareil au flux maximal échangeable obtenu pour un appareil de longueur infinie fonctionnant avec les mêmes températures d'entrée.

Pour un échangeur à contre courant avec une surface d'échange infinie, en supposant qu'il n'y a pas de pertes de chaleur:

- Lorsque $MC < mc$, la température de sortie du fluide chaud est égale à la température d'entrée du fluide froid.
- Lorsque $mc < MC$, la température de sortie du fluide froid est égale à la température d'entrée du fluide chaud.

Dans notre cas, $MC < mc$. L'expression de l'efficacité est donnée par la relation :

$$\xi = \frac{MC(T_1 - T_2)}{MC(T_1 - t_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$$

Ce qui donne $\xi = 71.4 \%$

La procédure de calcul est illustrée par un programme informatique écrit sur Matlab. (Annexe 2).

L'exécution de ce programme est donnée aussi en Annexe 2.

Conclusions :

- * Le bilan de transfert de chaleur a prouvé que le pasteurisateur a été correctement dimensionné:
 - L'obtention de 15°C à la sortie du produit exige une température d'entrée d'eau froide de 7°C.
 - Si l'eau rentre dans le pasteurisateur à 7°C. Après échange de chaleur avec le produit, elle sort avec une température de 12°C (relation (III.3)).

Ces deux résultats vérifient les données du fournisseur de cet équipement.

- La valeur de l'efficacité trouvée prouve la performance de l'échangeur.
- * A travers cette étude, nous concluons que le problème est au niveau du cycle du froid qui fournit l'eau froide à une température élevée par rapport à celle recherchée.

III.3. L'étude thermique du cycle du froid: [27 à 34]

Produire du froid c'est abaisser la température d'une enceinte ou d'un corps, c'est à dire lui enlever de la chaleur. Dans les réfrigérateurs industriels, ce résultat est obtenu par la vaporisation d'un liquide facilement liquéfiable appelé fluide frigorigène. La vaporisation est associée à l'aspiration des vapeurs émises, leur compression puis leur condensation en vue d'un nouveau cycle.

En thermodynamique, on appelle cycle l'ensemble des changements d'état que subit un médium donné, par exemple un fluide frigorigène partant d'un certain état, il y revient après avoir subi une série de transformations. Au cours de ces changements d'état, il y a variation des grandeurs : la température, la pression, l'enthalpie et l'entropie.

➤ **Les procédés de production du froid :**

La mise en circulation du fluide frigorigène est assurée lors de la phase de compression. En fonction du moyen utilisé pour augmenter la pression et la température de ce fluide, on peut distinguer deux principaux types de systèmes : les systèmes à compression mécanique et ceux à absorption.

1) Appareils à absorption:

Les machines frigorifiques à absorption sont des machines purement statiques donc parfaitement silencieuses. Elles sont généralement utilisées pour la production d'eau glacée.

Deux fluides sont utilisés dans ces machines :

- * Le fluide frigorigène, qui doit s'évaporer et se condenser et qui est généralement de l'eau ou de l'ammoniac. L'ammoniac permet d'obtenir des températures négatives (jusqu'à -60 °C), mais il a des effets toxiques en cas de fuite.
- * L'absorbant, qui doit absorber la vapeur du frigorigène, et qui est généralement du bromure de lithium (LiBr).

Les propriétés de l'absorbant sont (de par son affinité très grande avec le frigorigène) d'absorber les vapeurs du frigorigène à basse pression et de s'en séparer par chauffage à haute pression.

On peut résumer le principe de fonctionnement du cycle d'absorption comme suit (figure III.4):

- ★ *au générateur*, de la vapeur, de l'eau chaude ou des fumées provenant d'une combustion sont utilisées pour porter à ébullition un mélange de fluide frigorigène et d'absorbant. La vapeur de fluide frigorigène se dégage et la solution d'absorbant est concentrée.
- ★ la vapeur de frigorigène dégagée dans le générateur est entraînée dans *le condenseur*. L'eau de refroidissement refroidit puis condense le frigorigène.
- ★ le frigorigène liquide passe dans *l'évaporateur* après avoir traversé le détendeur. L'eau glacée à température plus élevée que le fluide frigorigène permet son évaporation. La vapeur du frigorigène provenant de l'évaporateur passe ensuite dans *l'absorbeur* où l'eau de refroidissement élimine la chaleur émise par l'absorption des vapeurs de frigorigène. La solution diluée retourne au générateur par l'intermédiaire d'une pompe.
- ★ *un échangeur thermique* transfère la chaleur de la solution concentrée relativement chaude provenant du générateur vers la solution diluée qui retourne au générateur, et réduit ainsi la quantité de chaleur qui doit être rejetée de l'absorbeur.

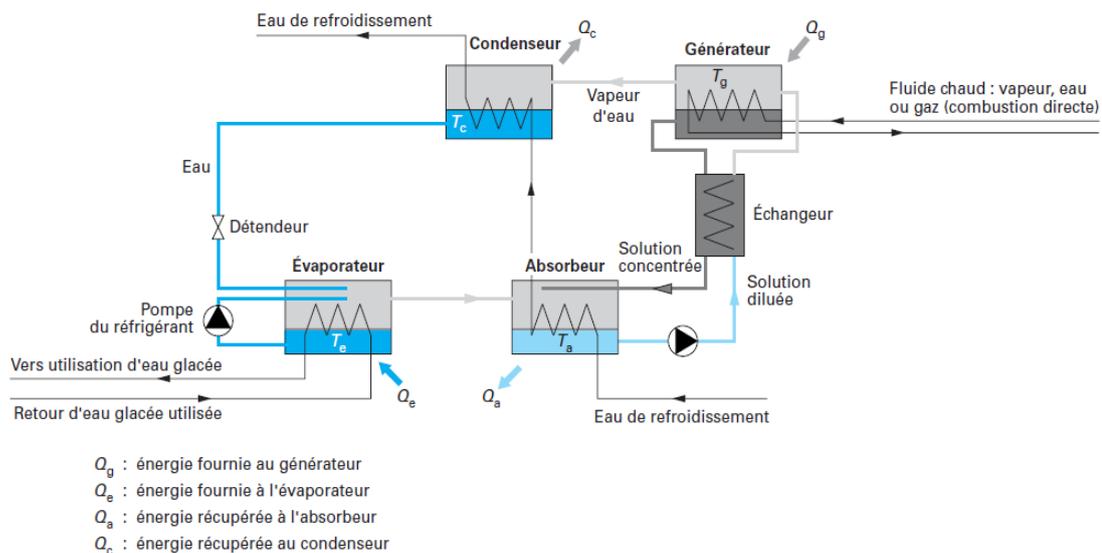


Figure III.4: Eléments de base d'un cycle frigorifique à absorption [27]

2) Appareils à compression mécanique des vapeurs:

Dans les machines à compression, la circulation du fluide frigorigène est obtenue à l'aide d'un compresseur mécanique.

Toute installation frigorifique à compression mécanique des vapeurs se compose de quatre éléments principaux:

- * Le compresseur
- * Le condenseur

- * Le détendeur
- * L'évaporateur.

L'enchaînement de ces éléments est représenté sur la figure III.5.

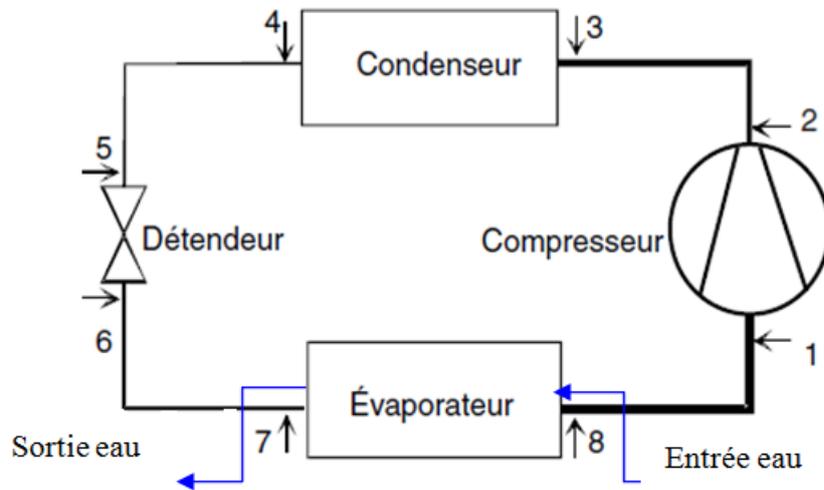


Figure III.5. Eléments de base d'un cycle frigorifique à compression mécanique des vapeurs [29]

1. Le compresseur :

Le rôle essentiel du compresseur est de porter les vapeurs de fluide frigorigène sortant de l'évaporateur d'un bas niveau de pression (et donc de température) à un niveau de pression (et donc de température) plus élevé nécessaire pour qu'il puisse y avoir condensation.

2. Le condenseur :

Dans lequel le frigorigène rejette de la chaleur vers le milieu environnant en se condensant. Le condenseur comporte trois zones thermiques:

Dans la première il y a une désurchauffe, c'est-à-dire évacuation d'une partie de la chaleur de surchauffe jusqu'à atteindre la température de condensation.

Dans la seconde zone, qui constitue la partie principale du condenseur, il y a une liquéfaction (condensation) du fluide frigorigène ce qui a donc pour conséquence de le faire passer de l'état gazeux à l'état liquide par évacuation de la chaleur.

Enfin dans la troisième zone, c'est-à-dire coté sortie du condenseur, il y a un sous-refroidissement du liquide saturant. Le fluide frigorigène passe à l'état liquide homogène (à une température inférieure à la température de condensation).

Quelle que soit la zone du condenseur, la pression reste constante et égale à la pression correspondant à la température de condensation.

3. Le détendeur :

Il contrôle l'écoulement du réfrigérant et permet sa détente. Il règle le débit de façon à optimiser le remplissage de l'évaporateur permettant ainsi une production optimale de froid. Il empêche le compresseur d'aspirer le liquide.

4. L'évaporateur :

C'est là où le fluide frigorigène passe de l'état liquide à l'état gazeux en adsorbant de la chaleur de l'enceinte à refroidir.

- ❖ Les refroidisseurs utilisés dans l'unité étudiée sont de type à compression mécanique des vapeurs.

Cycle thermodynamique d'un réfrigérateur à compression mécanique des vapeurs :

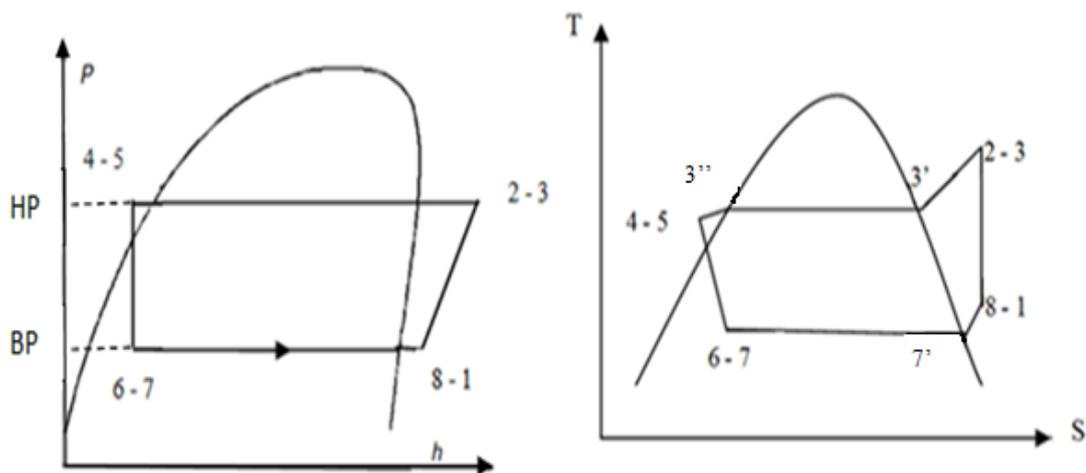


Figure III.6. Diagrammes enthalpique et entropique d'un réfrigérateur à compression mécanique des vapeurs

Le cycle obéit aux hypothèses suivantes:

1. Cycle ditherme: le fluide n'échange de la chaleur qu'avec les sources froide et chaude. De plus, les transferts thermiques n'ont lieu que dans les échangeurs.
2. Absence de phénomènes dissipatifs durant l'écoulement du fluide frigorigène (pas de pertes de charges).
3. Compresseur parfait : fonctionnement isentropique, pas d'espace mort.
4. Le fluide frigorigène est un corps pur.

L'évolution 1-2 :

Le réfrigérant à l'état de vapeur surchauffée entre dans le compresseur et subit une compression adiabatique (pas d'échange de chaleur avec l'ambiance). La compression adiabatique se fait d'une manière isentropique, donc $S_1=S_2$

La canalisation de refoulement 2-3 :

Achemine les vapeurs comprimées vers le condenseur. D'après les hypothèses 1 et 2, la pression et la température des vapeurs du frigorigène étant constantes, le point 2 et le point 3 sont confondus sur le diagramme enthalpique et entropique.

L'évolution 3-4 :

Le fluide frigorigène, atteignant une température assez élevée, va se condenser et passer de l'état de vapeur surchauffée à celui de liquide comprimé; l'évolution se faisant à pression constante.

Cette évolution se fait en trois étapes à l'intérieur du condenseur :

- L'évolution 3-3' :

A l'entrée du condenseur, le fluide frigorigène subit une désurchauffe jusqu'à atteindre la température de condensation.

- L'évolution 3'-3'' :

C'est l'étape de changement d'état (condensation)

- L'évolution 3''-4:

Correspond à un léger sous-refroidissement du liquide saturé : Cette étape permet de s'assurer que le fluide sera bien entièrement à l'état liquide dans le détendeur.

La canalisation du liquide 4-5 :

Permettant d'amener le liquide du condenseur vers le détendeur. D'après les hypothèses 1 et 2, la pression et la température des vapeurs du frigorigène ne varient pas. Sur les diagrammes enthalpique et entropique, le point 4 et le point 5 sont confondus.

L'évolution 5-6 :

Le détendeur permet de ramener le fluide frigorigène à la température d'évaporation, et de fermer le cycle de production de froid. La détente est irréversible et adiabatique, donc elle est isenthalpique.

Le fluide frigorigène pénètre dans le détendeur à l'état de liquide, il sort sous forme d'un mélange liquide-vapeur.

La canalisation 6-7 :

Elle relie le détendeur et l'évaporateur.

D'après les hypothèses retenues, le point 6 et le point 7 sont confondus.

L'évolution 7-7' :

Dans laquelle le fluide frigorigène se vaporise grâce à la chaleur qu'il prélève à la source froide.

Selon l'hypothèse 2, la pression du frigorigène dans l'évaporateur est constante.

L'évolution 7'-8 :

A sa sortie de l'évaporateur, le fluide frigorigène subit une surchauffe qui permet d'être certain que le fluide sera bien entièrement à l'état de vapeur dans le compresseur

La canalisation d'aspiration 8-1 :

Dans cette zone, les vapeurs formées dans l'évaporateur sont aspirées vers le compresseur. D'après les hypothèses 1 et 2, la pression et la température des vapeurs du frigorigène y sont constantes : sur le diagramme enthalpique et entropique, le point 8 et le point 1 sont confondus.

❖ **Dans l'unité étudiée**, L'eau froide (de débit 70 000l/h) alimentant le pasteurisateur à plaques provient d'un refroidisseur à compression mécanique des vapeurs, utilisant le fréon R22 comme fluide frigorigène (voir Annexe 3) et fonctionnant avec une puissance frigorifique de 25KW.

Avec cette puissance, le cycle frigorifique ne fournit pas la température suffisante pour le refroidissement du produit au niveau de pasteurisateur à plaques. (Actuellement, la température minimale fournie est de 20°C).

Nous procédons à un calcul thermodynamique afin de déterminer la puissance frigorifique théorique permettant le refroidissement de ce débit d'eau de 12°C à 7°C.

Connaissant la température de condensation et d'évaporation du R22 dans ce refroidisseur :

✓ La température de condensation : $T_{\text{cond}} = 38^\circ\text{C}$

✓ La température d'évaporation: $T_{\text{evap}} = -3^\circ\text{C}$

Et connaissant les propriétés du R22 dans ses divers états (tables : annexe 3) et moyennant quelques interpolations (diagramme Enthalpie-pression, Annexe 4), il sera possible de saisir les paramètres de réfrigérant.

Le point 1: (vapeur surchauffée)

Considérons une surchauffe de 8°C par rapport à la température d'évaporation

Donc $T_1 = T_{\text{evap}} + 8 = -3 + 8 = 5^\circ\text{C}$.

$$T_1 = 5^\circ\text{C}$$

$P_1 = P_{\text{evap}} = 4.511 \text{ bar}$ (déterminée par lecture sur la table des propriétés de R22 pour $T_{\text{evap}} = -3^\circ\text{C}$)

La détermination de l'enthalpie et de l'entropie de la vapeur surchauffée au point 1 se fait graphiquement par intersection des deux courbes correspondants à $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et $P_1 = 4.511 \text{ bar}$ (voir Annexe 4)

$$H_{V1} = 412.5 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_{V1} = 1.79 \text{ KJ/K. Kg}$$

Le point 2 : (vapeur surchauffée)

L'évolution 1-2 est isentropique, donc : $S_{V1} = S_{V2}$

P_2 correspond la pression de condensation, elle se détermine par lecture sur les tables de R22 pour une température de 38°C.

$$P_2 = 14.600 \text{ bar}$$

La détermination de H_{V2} se fait par lecture graphique sur le diagramme Enthalpie-Pression pour $P_2 = 14.600 \text{ bar}$ et $S_{V2} = 1.79 \text{ KJ/K. Kg}$ (Annexe 4)

$$H_{V2} = 440.62 \text{ KJ/ Kg}$$

Le point 4 : (liquide sous-refroidi)

Considérons un sous-refroidissement de 5°C par rapport à la température de condensation.

$$T_{L4} = T_{\text{cond}} - 5 = 38 - 5 = 33^\circ\text{C}.$$

Supposons que le liquide sous refroidi a les mêmes caractéristiques que le liquide saturé ayant la même température (33°C), donc les paramètres du point 4 se déterminent par lecture sur la table de R22 pour $T = 33^\circ\text{C}$.

$$H_{L4} = 240.5 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_{L4} = 1.138 \text{ KJ/K. Kg}$$

Le point 7 : (mélange liquide vapeur)

$$T_7 = T_{\text{evap}} = -3^\circ\text{C}$$

$$P_7 = P_1 = 4.511 \text{ bar}$$

La détente est isenthalpique donc: $H_{L4} = H_7 = 240.5 \text{ KJ/Kg}$. (voir le bilan sur le détendeur ci-dessous).

Remarque: Nous n'avons pas pu avoir les informations nécessaires pour le calcul exact du refroidisseur de l'unité, c'est pour cette raison que nous avons pris des valeurs théoriques moyennes (les plus courantes) pour l'écart de température de surchauffe (8°C) et de sous-refroidissement (5°C).

❖ Bilan de l'évaporateur :

Ce bilan nous permettra de déterminer le flux de chaleur échangé ainsi que le débit massique de frigorigène R22.

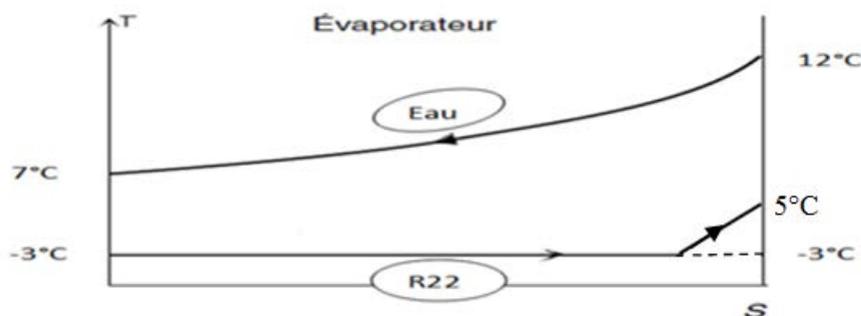


Figure III.7: L'évolution des températures des deux fluides dans l'évaporateur

D'après l'hypothèse simplificatrice 2, la quantité de chaleur cédée par le fluide chaud est entièrement récupérée par le fluide froid, donc:

$$Q_{\text{evap}} = m_e \cdot c_e \cdot \Delta t = \frac{70000}{3600} \cdot 4,186 \cdot (12-7) = 407 \text{ KW}.$$

Dans le cas général, l'expression du premier principe pour un système ouvert est donnée par:

$$\frac{dE}{dt} = M_{fe} \cdot (H_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e) - M_{fs} \cdot (H_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot z_s) + W + Q \quad (III.6)$$

En régime permanent, $\frac{dE}{dt} = 0$ et supposons que l'énergie cinétique et potentielle sont négligeables, donc l'expression de 1^{er} principe devient :

$$0 = M_{fe} \cdot (H_e - H_s) + W + Q \quad (III.7)$$

Dans l'évaporateur, il n'y a pas d'échange d'énergie mécanique.

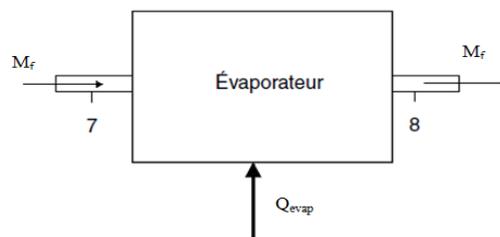


Figure III.8 : Flux de masse et d'énergie à travers l'évaporateur

L'expression de 1^{er} principe dans l'évaporateur s'écrit comme suit :

$$Q_{evap} = M_f \cdot (H_{v8} - H_7)$$

Ce qui donne $M_f = \frac{Q_{evap}}{H_{v8} - H_7}$

$H_{v8} = H_{v1}$

Donc : $M_f = \frac{407}{412,5 - 240,5} = 2.36 \text{ Kg/s}$

❖ Bilan du compresseur :

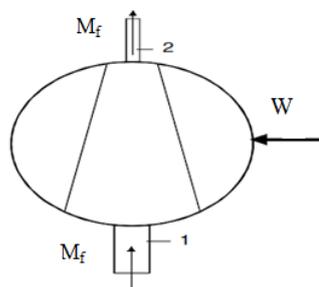


Figure III.9 : Flux de masse et d'énergie à travers le compresseur

Supposons que l'énergie cinétique et potentielle sont négligeables, et compte tenu de la compression adiabatique, le bilan d'énergie au compresseur s'écrit :

$$W_{comp} = M_f \cdot (H_{v2} - H_{v1})$$

Ce travail correspond à l'état idéal, où la compression est isentropique (adiabatique réversible). Pour déterminer le travail réel absorbé par ce compresseur, on définit le rendement isentropique qui est le rapport entre le travail adiabatique et le travail réel.

Le rendement isentropique est donné par la relation :

$$\eta = \frac{W_{isent}}{W_{reel}} \quad (III.8)$$

Dans le cas général, Le rendement isentropique prend une valeur de 0.8, qui est une valeur courante, la valeur réelle est fournie par le constructeur du compresseur.

Dans notre cas, faute d'absence de documentations concernant le compresseur de l'unité, nous avons choisi la valeur 0.8

D'après la relation (III.8):

$$W_{reel} = \frac{W_{isent}}{\eta} = \frac{M_f \cdot (H_{V2} - H_{V1})}{\eta} = \frac{2.36(440.62 - 412.5)}{0.8} = 82.954 kW$$

La puissance calculée théoriquement (82.954kW) est beaucoup plus importante que celle du compresseur utilisé actuellement à l'unité (25kW). Ce qui explique la difficulté de refroidir l'eau jusqu'à 7°C.

A partir de là, nous concluons que le refroidisseur de l'unité est sous dimensionné.

❖ Bilan de condenseur :

Dans le condenseur, il n'y a pas d'échange d'énergie mécanique

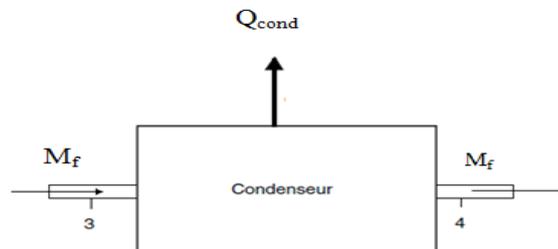


Figure III.10 : Flux de masse et d'énergie à travers le condenseur

L'expression de 1^{er} principe (III.7) s'écrit dans le condenseur comme suit :

$$Q_{cond} = M_f \cdot (H_{L4} - H_{V2r})$$

Tel que :

H_{V2r} : enthalpie réelle de la vapeur surchauffée à la sortie de compresseur. On la détermine à partir de l'expression du rendement isentropique.

$$\eta = \frac{W_{isent}}{W_{reel}} = \frac{(H_{V2} - H_{V1})}{(H_{V2r} - H_{V1})} \Rightarrow H_{V2r} = \frac{(H_{V2} - H_{V1})}{\eta} + H_{V1} = \frac{(440.62 - 412.5)}{0.8} + 412.5 = 447.65 kW$$

H_{L4} : enthalpie de liquide sous refroidie à la sortie de condenseur.

Donc $Q_{\text{cond}} = M_f \cdot (H_{L4} - H_{V2r}) = 2.36 (240.5 - 447.65) = - 488.874\text{kW}$ (condensation exothermique).

Bilan de détenteur :

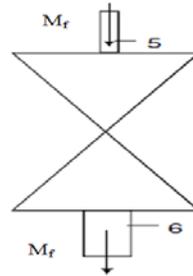


Figure III.11: Flux de masse et d'énergie à travers le détenteur

La détente du fluide frigorigène s'effectue sans échange de chaleur, et sans récupération du travail ; par conséquent, $Q_{\text{dét}} = 0$ et $W_{\text{dét}} = 0$. En régime permanent, les variations d'énergie potentielle et cinétique étant négligeables, l'équation de premier principe s'écrit :

$$0 = M_{fe} \cdot (H_{L5} - H_{L6}) = M_{fe} \cdot (H_{L4} - H_{L7}) \implies H_{L4} = H_{L7} \quad (\text{détente isenthalpique})$$

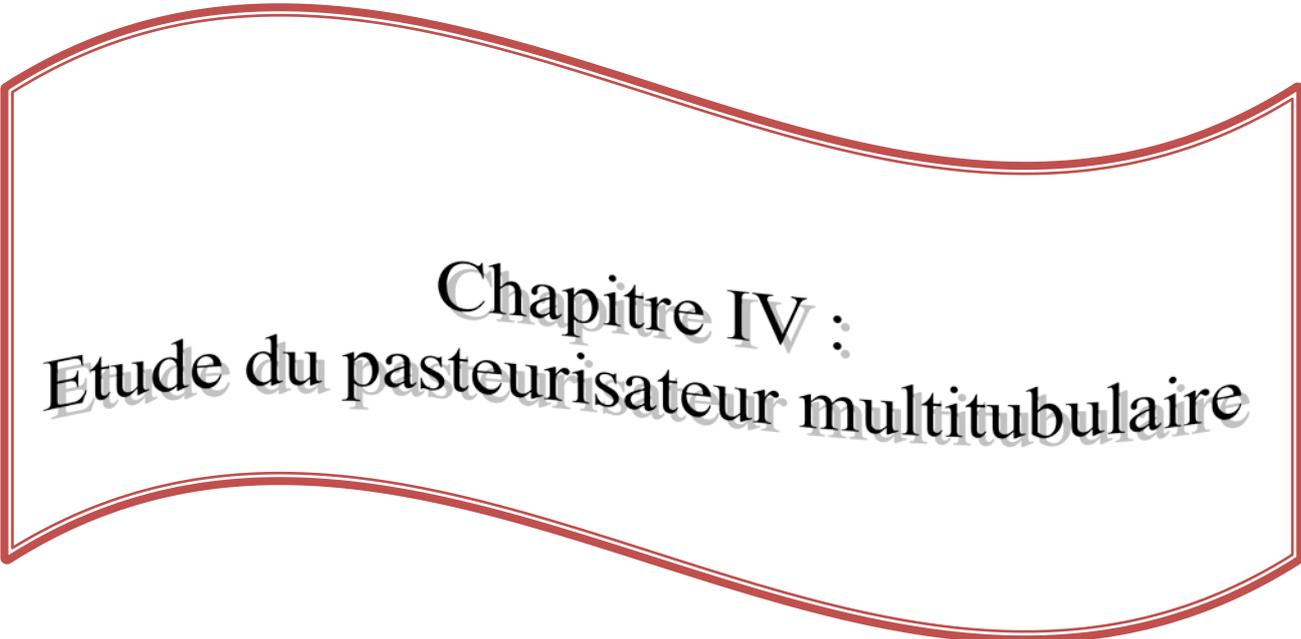
Conclusion :

A travers cette étude, nous concluons que le refroidisseur alimentant le pasteurisateur à plaques en eau froide est sous-dimensionné.

En se basant sur les bilans énergétiques effectués sur les équipements du cycle de froid, nous suggérons de changer le refroidisseur actuel.

Le refroidisseur qui pourra répondre aux exigences de pasteurisateur à plaques destiné à la pasteurisation de la boisson aromatisée doit être caractérisé par:

- Une puissance absorbée par le frigorigène (R22) au niveau de l'évaporateur de 407kW
- Un compresseur de puissance frigorifique d'environ 83kW.
- Une puissance thermique dégagée au condenseur d'environ 490kW.



Chapitre IV :
Etude du pasteurisateur multitubulaire

IV.1. Introduction

L'unité étudiée dispose d'un pasteurisateur multitubulaire de type faisceau de tubes et calandre (figure IV.1) destiné à la pasteurisation de la boisson fruitée.



Figure IV.1. Pasteurisateur multitubulaires (photo prise sur site)

Ce pasteurisateur est constitué de trois sections et un chambreur.

La section de pasteurisation est alimentée par une eau chaude chauffée dans un circuit secondaire par échange de chaleur avec de la vapeur provenant d'une chaudière (la vapeur circule à l'intérieur des tubes et l'eau circule à l'extérieur du faisceau).

C'est au niveau de ce circuit que se manifeste **l'encrassement** touchant la partie parcourue par l'eau chaude.

Les trois sections sont parcourues par des fluides à contre-courant :

♣ *La section de pasteurisation :*

Dans cette section, la pasteurisation du produit circulant à l'intérieur du faisceau à raison de 20000 l/h se fait par échange de chaleur avec de l'eau chaude (102°C) circulant à l'extérieur du faisceau, à raison de 30000 l/h

A cause du problème d'encrassement, le pasteurisateur ne peut traiter actuellement que 4000l/h de produit. Au-delà de ce débit, l'échange de chaleur ne se fait pas convenablement dans les diverses sections.

♣ *La section de récupération de chaleur:*

Dans cette section, le produit subit un prérefroidissement et/ou un préchauffage.

♣ *La section de refroidissement:*

Dans cette section, le produit est refroidi avant de quitter le pasteurisateur. Ce refroidissement s'effectue par échange de chaleur avec une eau froide (40000l/h) provenant du refroidisseur souffrant du **problème de corrosion**.

Dans cette dernière section, le produit circule à l'intérieur des tubes et l'eau froide circule à l'extérieur du faisceau.

L'étude des phénomènes de corrosion et d'encrassement touchant l'échangeur multitubulaire fait l'objet de ce chapitre.

Dans le but de déterminer les principales causes de ces deux problèmes (encrassement et corrosion), et de suggérer quelques solutions pratiques permettant leur résolution, nous avons proposé d'effectuer quelques analyses physico-chimiques et microbiologiques pour des échantillons d'eau prélevés en différents points du circuit.

IV.2. Analyses, résultats, interprétations et recommandations:[36 à38]

L'eau est omniprésente dans l'industrie. Elle est partie intégrante des procédés et intervient dans la composition des produits alimentaires et chimiques.

Quelle soit la source de son approvisionnement (forage, eau de surface,.....), la qualité requise détermine et influence l'obtention de produit final tout en respectant des exigences sanitaires, économiques et environnementales. C'est la raison pour laquelle, elle doit subir divers traitements répondant aux normes définies par la réglementation.

IV.2.1: Les paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau:[36 et 38]

I. Les paramètres physiques:

I.1. La température: [19 et 39]

La température joue un rôle important dans la solubilité des sels donc sur la conductivité électrique.

I.2. La conductivité : [19 et 41]

Les sels minéraux en solution résultent d'un mélange de cations et d'anions. Ils conduisent un courant électrique quand une tension est appliquée entre deux électrodes placées dans l'eau. Plus il y a d'ions présents, plus l'intensité du courant est grande et plus la conductivité électrique augmente.

La conductivité est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$, et est utilisée pour mesurer la qualité de l'eau. En effet, la conductivité électrique d'une eau est directement proportionnelle à sa minéralisation.

La réglementation Algérienne fixe le niveau guide de la conductivité électrique à 20°C d'une eau destinée à la consommation humaine à une limite maximale de $2800\mu\text{S}/\text{cm}$.

I.3. Les matières en suspension: (MES) [19 et 42]

Ce sont des particules solides très fines et généralement visibles à l'œil nu. Théoriquement, elles ne sont ni solubilisées, ni à l'état colloïdale.

Les MES contribuent à déséquilibrer le milieu aquatique en accroissant la turbidité.

I.4. La turbidité: [19]

La turbidité caractérise une eau dont la transparence est limitée par la présence de matières solides en suspension.

Les éléments qui provoquent une turbidité élevée peuvent causer des problèmes de goût, d'odeur et réduisent l'efficacité du rayonnement ultraviolet pour le traitement de désinfection.

La turbidité est exprimée (selon la normalisation ASTM) dans les unités suivantes qui sont considérées comme comparables:

- unité JTU (Jackson Turbidité Unit)
- unité FTU (Formazine Turbidité Unit)
- unité NTU (Nephelometric Turbidité Unit)

Les normes de potabilité algériennes précisent un niveau guide de turbidité de 1 NTU et une limite maximale de 5 NTU.

I.5. La couleur: [39]

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelle et apparente sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité.

I.6. L'odeur: [19 et 39]

L'odeur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.

Il est assumé que l'odeur dans l'eau est créée par des processus de décomposition chimiques (particulièrement les composés organiques) ou naturels de la matière végétale ou par l'activité biologique des microorganismes.

I.7. Le goût: [19 et 39]

Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives perçues lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche.

Les problèmes de goût dans l'eau dérivent en partie des sels dissous et de la présence des métaux, tels que le fer, le cuivre, le manganèse, et le zinc. D'autres sels spécifiques peuvent être plus significatifs en termes de goût, notamment chlorure de magnésium et bicarbonate de magnésium.

II. Paramètres Chimiques:

II.1. Potentiel d'hydrogène (pH): [19 et 38]

La mesure du pH renseigne sur l'acidité de l'eau, et donc sur son agressivité et sa corrosivité.

L'eau destinée à la consommation humaine doit avoir un pH compris entre 6.5 et 9 selon les normes algériennes.

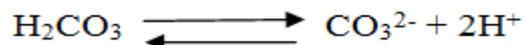
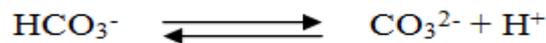
Une valeur faible de pH provoque des problèmes de corrosion.

II.2. Titre alcalimétrique ou Alcalinité: [19, 39 et 43]

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes. Elle mesure le pouvoir tampon de l'eau.

Si l'alcalinité de l'eau est élevée, son pH ne change pratiquement pas avec l'ajout de larges doses d'acide et de base, et si elle est faible, le pH de l'eau est facilement modifié avec l'ajout de faibles quantités d'acide ou de base.

Le CO₂ dissous dans l'eau forme l'acide carbonique H₂CO₃, qui se dissocie et forme les carbonates et les bicarbonates selon les réactions suivantes :



Si le milieu est acide (plus d'ions H⁺), l'équilibre se déplace dans le sens de la formation de H₂CO₃, ce qui conduit à un dégagement de CO₂ vers l'atmosphère. Lorsque la quantité de carbonates et de bicarbonates est faible, l'ajout d'acide conduit à une diminution du pH.

La figure IV.2 présente les résultats de l'étude des équilibres carboniques en fonction du pH à la température de 20°C, Pour pH < 4.4 l'espèce prédominante est le CO₂. Pour pH = 6.4 on a égalité des concentrations en CO₂ et HCO₃⁻, de même pour pH = 10.3 on a égalité des concentrations en ions bicarbonates et carbonates.

Au-dessus du pH = 12.4 l'espèce prédominante est l'ion carbonates.

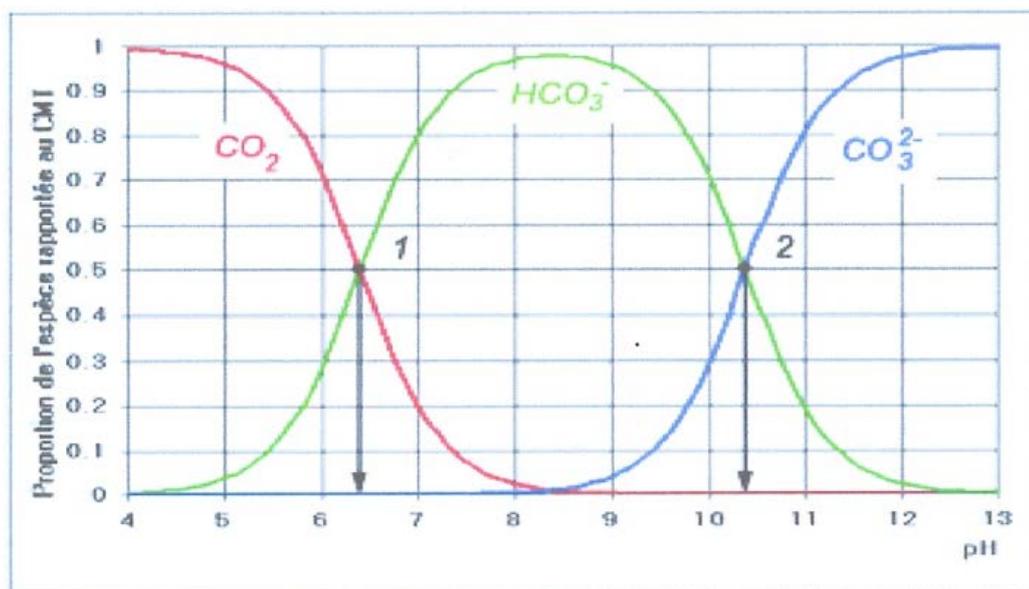


Figure IV.2. Variation en fonction du pH des rapports $[\text{CO}_2]/\text{CMT}$, $[\text{HCO}_3^-]/\text{CMT}$ et $[\text{CO}_3^{2-}]/\text{CMT}$ en % en fonction du pH (CMT : carbonates minérales totales)

Pour la détermination de l'alcalinité, il faut définir deux paramètres :

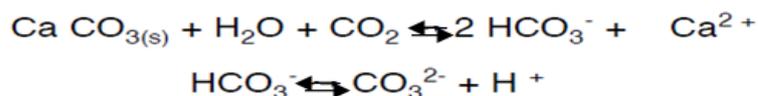
- * Le titre alcalimétrique simple (TA) mesure la teneur de l'eau en alcalins libres et en carbonates alcalines caustiques. Il permet la mesure des concentrations de OH^- et CO_3^{2-} et exprime la totalité des hydroxydes et la moitié des carbonates.
- * Le titre alcalimétrique complet (TAC) mesure la teneur de l'eau en alcalins libres, carbonates et hydrogénocarbonates: OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- . Il exprime la totalité des hydroxydes, carbonates et bicarbonates.

II.3. Dioxyde de carbone: CO_2 [19, 38 et 40]

Le CO_2 peut être dans l'eau sous forme d'ions ou sous forme libre. Le CO_2 libre mesure la concentration de dioxyde de carbone dissous : $\text{CO}_{2\text{aq}}$. Une eau riche en $\text{CO}_{2\text{aq}}$ est dite « agressive » suite à son acidité, par contre une eau riche en ions carbonates est dite « incrustante ».

L'exemple suivant permet d'expliquer le phénomène : **(équilibre calco-carbonique de l'eau)**

Les ions bicarbonate et calcium majoritairement présents dans les eaux naturelles ont pour origine la dissolution du carbonate de calcium par l'intervention de CO_2 dissous dans l'eau et provenant de l'air atmosphérique :



Si la teneur en CO_2 libre est inférieure à celle prévue par l'équilibre ($< \text{CO}_2$ équilibrant), le premier équilibre ci-dessus se déplace vers la gauche et on observe la formation de carbonate de calcium solide (eau entartrante). A contrario, si la teneur en CO_2 libre est supérieure au CO_2 équilibrant, l'équilibre se déplace vers la droite et on observe une dissolution du carbo-

nate de calcium solide (eau agressive), cette destruction empêche la formation de dépôt carbonaté protecteur sur la paroi métallique en contact avec cette eau.

Le CO₂ total se mesure par la somme des bicarbonates, des carbonates et du CO₂ libre.

II.4. La dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH): [36, 38, 19 et44]

La dureté totale de l'eau est principalement causée par la présence de composés de calcium et de magnésium. Elle est généralement exprimée en « degrés Français » :

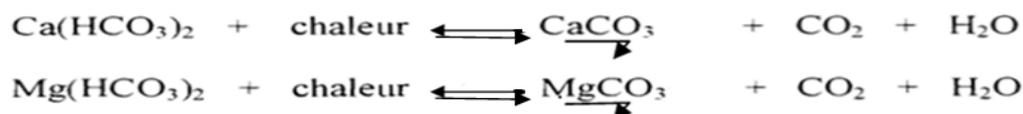
$$1^{\circ}\text{Français} : 10 \text{ mg/l de CaCO}_3$$

La dureté totale est subdivisée en deux types :

* *Dureté temporaire (ou carbonatée):*

Les bicarbonates et les carbonates de calcium, de magnésium et de fer sont à l'origine de la dureté dite carbonatée. Cette dureté peut être précipitée par une élévation de la température de l'eau jusqu'à l'ébullition.

Par exemple :



* *dureté permanente (ou non-carbonatée) :*

Les sulfates et les chlorures de calcium et de magnésium produisent la dureté non-carbonatée. Ces constituants ne peuvent se décomposer qu'au-delà de températures élevées (>90°C) [44]

Remarque :

- Si l'alcalinité totale > la dureté totale alors : la dureté carbonatée = dureté totale
- Si l'alcalinité totale < la dureté totale alors : la dureté carbonatée = alcalinité totale

Le tableau suivant donne la variation de la qualité d'eau selon la valeur de TH:

Tableau IV.1: Variation de la qualité d'eau selon la valeur de TH [19]

TH(°F)	0-7	7-15	15-25	25-42	>42
Eau	Très douce	douce	moyennement dure	dure	Très dure

Les normes algériennes acceptent un niveau guide de 100mg/l de CaCO₃ et une limite maximale de 500mg/l de CaCO₃.

II.5. Les solides totaux dissous (STD ou TDS): [19]

Les TDS représentent la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Les substances dissoutes sont composées de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau sont le calcium, le magnésium, le potassium, sodium, carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates.

L'influence des solides dissous sur la corrosivité est très complexe elle dépend des espèces d'ions impliquées et de leur concentration qui ont des effets différents sur la corrosion. Par exemple, certains des solides dissous (carbonate et le bicarbonate) réduisent la corrosion, tandis que d'autres (chlorure et sulfate) l'augmentent.

II.6. Les chlorures: [19 et 39]

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl).

A des concentrations élevées, les chlorures tendent à accélérer la vitesse de corrosion du fer, de l'acier et des métaux de la tuyauterie, surtout en présence d'une faible alcalinité.

La réglementation algérienne fixe une teneur de 200mg/l comme niveau guide et 500mg/l comme limite maximale.

II.7. Les sulfates: [19 et 45]

Les concentrations importantes en sulfates peuvent être corrosives pour les tuyauteries en particulier les tuyauteries en cuivre. Dans les endroits où l'on retrouve des concentrations importantes en sulfate, il est commun d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion, comme des tuyaux en plastique.

Les normes de potabilité algériennes précisent un niveau guide de 200mg/l et fixe une limite maximale à 400mg/l.

II.8. Le calcium [19 et 38]

Le calcium est le composant principal de la dureté. Il est le résultat de la dissolution de roches calcaires par l'eau. Il cause des précipitations, et l'on peut l'éliminer en adoucissant l'eau. On en trouve généralement 2 à 200 ppm dans l'eau, plus souvent 100 ppm ou plus.

La réglementation algérienne précise un niveau guide de 75mg/l et une limite maximale de 200mg/l.

II.9. Le magnésium: [19 et 38]

On trouve typiquement 10 à 50 ppm de magnésium dans l'eau, mais il pose moins de problèmes que le calcium car il est plus soluble. Il représente en général environ 1/3 de la dureté de l'eau.

Les normes algériennes fixent 150mg/l comme limite maximale.

II.10. Le sodium [19]

Ce métal alcalin se présente fréquemment sous forme ionisée, il se retrouve partout dans les milieux aquatiques. Sa présence, même en quantités élevées ne provoque pas de risques significatifs sur la santé humaine, mais sa concentration dans ces eaux est limitée à 200mg/l selon la réglementation algérienne. En effet, sa présence en forte concentration provoque un goût désagréable.

II.11. Le fer: [19 et 38]

Le fer est présent sous forme ionique dans toutes les eaux souterraines, donc pratiquement toutes les eaux potables. Sa présence même à de faibles concentrations peut être liée à des problèmes esthétiques et opérationnels telles que le mauvais goût, la coloration ainsi que les dépôts dans le système de distribution d'eau menant à l'incidence de la forte turbidité. Il cause aussi l'entartrage, et il doit donc être éliminé dans les systèmes de purification d'eau industriels.

L'état de fer dans l'eau dépend avant tout du pH. En augmentant le pH, le fer dissous (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) s'hydrolyse pour former des précipités.

Les normes algériennes fixent 0,3mg/l comme limite maximale.

II.12. Le zinc:[19]

Cet élément n'est pas considéré comme toxique. En général, il est présent en faibles quantités dans les eaux. Si sa concentration dépasse 5 mg/l, l'eau a tendance à laisser une pellicule grasseuse après ébullition et à prendre un goût indésirable.

La réglementation algérienne fixe une valeur limite de 5mg/l pour sa concentration.

II.13. Le cuivre

Le cuivre présent dans l'eau favorise la corrosion de l'aluminium et du zinc (effet néfaste sur les produits galvanisés). Il donne également un goût amer indésirable à l'eau.

La réglementation algérienne fixe une valeur limite de 2mg/l pour sa concentration.

IV.2.2. Les paramètres microbiologiques :[39, 46, 47 et 48]

1. Les coliformes:

Les coliformes se répartissent en deux catégories : les coliformes totaux et les coliformes fécaux.

- *Les coliformes totaux* étant largement répartis dans la nature n'indiquent pas nécessairement qu'il y a une contamination. Par ailleurs, ces organismes survivent plus longtemps dans l'eau et résistent à la chloration. Ils constituent un indicateur de l'efficacité de traitement de l'eau.

- *Les coliformes fécaux* : ces coliformes sont capables de se développer à 44°C alors qu'aucune croissance n'est observée à cette température pour les souches non fécales. La principale bactérie coliforme spécifiquement d'origine fécale est *Escherichia Coli* (*E. Coli*). Cette bactérie apparaît toujours en grandes quantités dans les déjections animales et humaines et ne se trouve qu'exceptionnellement dans les sols et les eaux qui n'ont pas été l'objet d'une pollution fécale. Les coliformes fécaux constituent un bon test de contamination des eaux par les matières fécales.

Les coliformes ont une vie de courte durée s'ils se retrouvent en dehors du corps. Leur présence indique une contamination assez récente.

2. Les streptocoques :

Les streptocoques regroupent un vaste ensemble de microorganismes ubiquitaires. En raison de leur nombre, on distingue les espèces pathogènes et saprophytes (qui se nourrissent des matières mortes et ne nuisent pas à l'organisme).

Les streptocoques sont aérobies - anaérobies, mais la majorité des souches poussent mieux en anaérobiose relative ou en atmosphère enrichie en CO₂

3. Les streptocoques fécaux : ce sont des hôtes normaux de l'intestin de l'homme et des animaux. Généralement, ils ne sont pas considérés comme pathogènes. Toutefois, leur recherche associée à celle des coliformes fécaux constitue un bon indice de contamination fécale.

4. Les clostridium sulfite-réducteurs : ce sont des formes résistantes d'organismes anaérobies. Elles sont normalement présentes dans les matières fécales mais en petites quantités. Elles sont également présentes dans le sol, les rivières.

5. Les levures et les moisissures :

Les moisissures et les levures, regroupées sous le nom « Mycètes » ou « champignons », forment, comme les bactéries, un groupe imposant de micro-organismes.

- ♣ *Les levures* : sont des micro-organismes aérobies acidophiles et mésophiles se multipliant à des pH compris entre 3 et 7,2, et à des températures optimales variant entre 25 et 28°C.
- ♣ *Les moisissures* : sont des micro-organismes aérobies, en général acidophile, ils se développent à des pH compris entre 3 et 7. Ils sont aussi mésophiles, ils se développent à des températures optimales comprises entre 20 et 30°C. Dans le cadre de leur cycle reproducteur, les moisissures produisent des milliers de minuscules particules, dangereuses pour la santé, appelées spores. Ces spores peuvent former d'autres colonies de moisissures.

IV.2.3. Interprétation des résultats d'analyse et recommandations :

Des échantillons ont été prélevés le 22/05/2012 en quatre points différents :

- Eau de forage
- Eau de process (traitée)
- Eau de pasteurisateur multitubulaire (eau chaude)
- Eau de refroidisseur alimentant le pasteurisateur multitubulaire.

Ces échantillons ont été transmis immédiatement vers le laboratoire de l'unité (analyses microbiologiques) et vers le laboratoire d'analyse et de contrôle de qualité de « SEAAL » situé à Kouba.

1) La qualité d'eau de process (eau traitée)

Au niveau de la station de traitement de l'unité, l'eau subit

1. Une chloration par l'eau de javel (l'hypochlorite de sodium : NaClO): pour inactiver et/ou éliminer les pathogènes d'origine hydrique présents dans l'eau brute (désinfection primaire).
2. Une filtration sur sable pour éliminer les matières en suspension.
3. Une filtration sur charbon actif : pour améliorer les qualités organoleptiques de l'eau en éliminant les matières organiques responsables du goût, de l'odeur et de la couleur, ainsi que d'autres polluants tels que: les phénols, les hydrocarbures, les détergents, et quelques métaux lourds (principalement : le zinc, le plomb, le cadmium et le nickel). Le charbon actif permet également la réduction de la concentration du chlore libre.
4. Un adoucissement sur une résine échangeuse d'ions de type R-Na qui permet l'élimination des cations Ca^{2+} et Mg^{2+} responsables de la dureté de l'eau en libérant les ions de sodium (Na^+).
5. Une désinfection par UV, dite désinfection secondaire, permettant de maintenir la qualité microbiologique de l'eau traitée pendant la distribution en limitant la prolifération de micro-organismes saprophytes et/ou pathogènes.

❖ Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques:

Le tableau ci-dessous illustre les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de forage et de l'eau traitée, comparés à la norme algérienne:

Tableau IV.2 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de forage et de l'eau traitée comparés à la norme algérienne.

Elément	Eau de forage	Eau traitée	Norme Algérienne J.O N° 18 DU 23/03/2011
pH à 19°C	7,4	7,2	6,5-9
Conductivité à 18°C $\mu\text{S/cm}$	1560	1627	Max 2800
Turbidité FTU/NTU	1,6	0,8	5
Titre Alcalimétrique simple (TA) °F	00	00	/
Carbonate (CO_3^{2-}) mg/l	00	00	
Alcalinité totale (TAC) °F	26	26	/
Bicarbonates (HCO_3^-) mg/l	317,2	317,2	/
Dureté totale (TH) °F	49,2	5,6	Max 50
Calcium mg/l	130	2,73	200
Magnésium mg/l	39	1,1	150
Chlorure mg/l	230	230	Max 500
Sulfate mg/l	41,15	41,15	Max 400
Fer mg/l	00	00	Max 0,3
Cuivre mg/l	0,09	0,03	Max 0,05
Zinc mg/l	0,33	0,2	Max 5

La comparaison entre l'eau de forage et l'eau traitée permet de déduire:

- Une diminution importante de la concentration de calcium (97.9%) et de magnésium (97.2%) dans l'eau traitée, comme le montre la figure suivante :

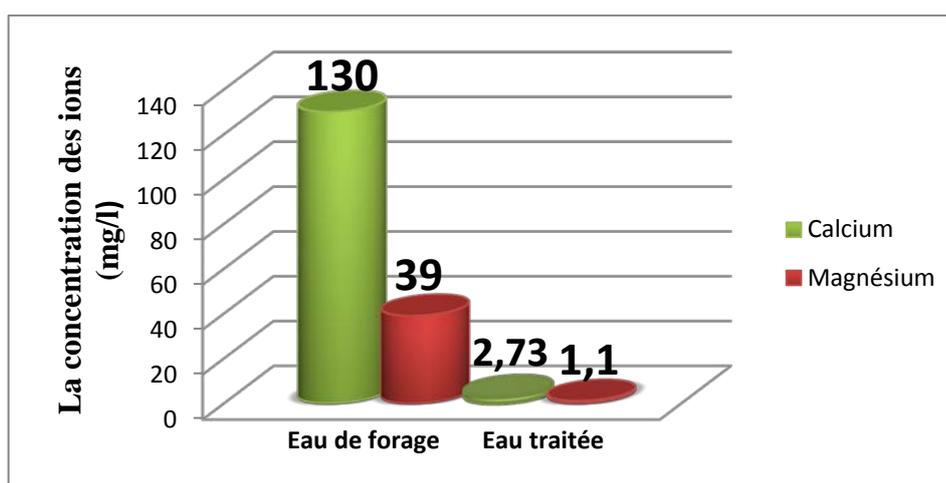
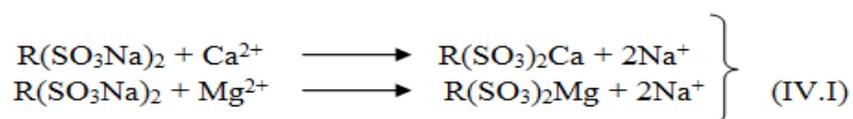


Figure IV.3 : Variation de la concentration de calcium et de magnésium dans l'eau traitée en comparaison avec l'eau de forage.

Cette diminution s'explique par l'utilisation d'une résine cationique de type R-Na, présentant une sélectivité d'échange aux ions calcium et magnésium, tout en libérant des ions sodium, comme le montre les réactions suivantes : [44]



Le principe de fonctionnement de la résine cationique R-Na est illustré sur la figure IV.2.

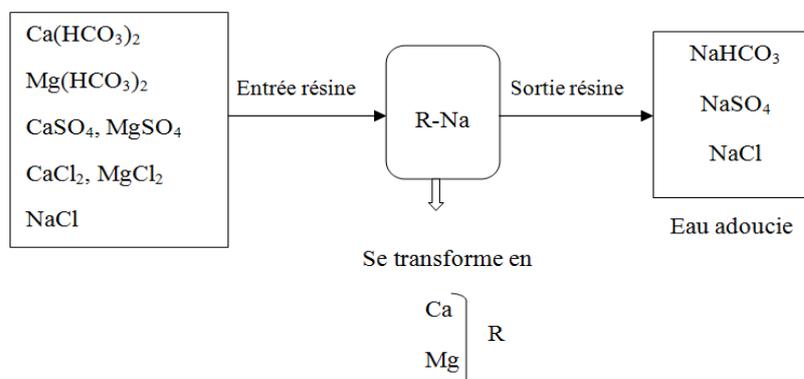


Figure IV.4 : Adoucissement d'eau : résine cationique [46]

Les pourcentages éliminés de calcium et de magnésium conduisent à une diminution de la dureté totale de 88.6%, ce qui a permis le passage d'une eau très dure à une eau très douce (Tableau IV.1).

La figure suivante illustre la diminution remarquable du titre hydrotimétrique (TH) dans l'eau de process en comparaison avec l'eau de forage :

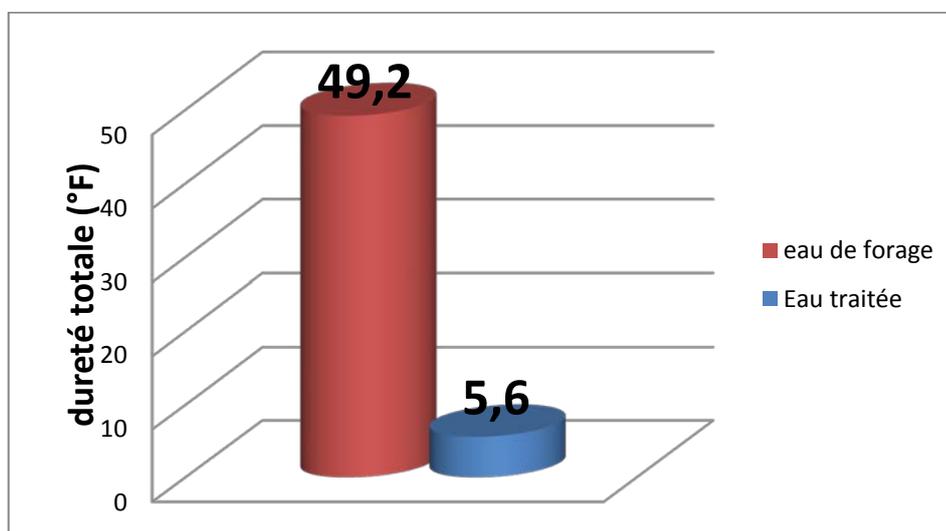


Figure IV.5 : Variation de la dureté totale entre l'eau de forage et l'eau traitée.

- Concernant l'alcalinité, les résultats montrent que
 - * le titre alcalimétrique (TA) est nul pour l'eau de process et l'eau de forage.
 - * La concentration en ions carbonates est nulle dans l'eau traitée et l'eau de forage.

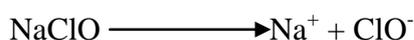
- * Des valeurs constantes pour le titre alcalimétrique complet (TAC= 26°F) et pour la concentration en ions bicarbonates (317.2 mg/l)

Cela s'explique par le fait que le pH est inférieur à 8, ce qui signifie que le TAC représente uniquement des ions bicarbonates et l'absence des carbonates et d'hydroxyde.

En ce qui concerne l'eau traitée, la dureté carbonatée correspond à la dureté totale car l'alcalinité totale a une valeur plus importante par rapport à la dureté totale (26>5.6).

- Aucune variation de concentrations des ions chlorures, sulfates et bicarbonates n'a été remarqué, ce qui s'explique par l'absence d'une résine anionique permettant l'ajustement de la salinité anionique.
- Une légère diminution des concentrations de Zinc et du Cuivre s'explique par leur rétention par le charbon actif qui contribue à l'élimination par adsorption des métaux lourds.
- L'eau après traitement est moins turbide que l'eau de forage. Cela s'explique par l'élimination des matières en suspension dans le filtre à sable.
- Malgré la diminution des concentrations de calcium et magnésium dans l'eau traitée, on constate une augmentation de la conductivité par rapport à l'eau de forage.

Cette augmentation s'explique par une augmentation importante de la concentration de sodium provenant en grande quantité de la résine échangeuse d'ions (les réactions (IV.1)), ainsi que de l'ionisation de l'eau de javel selon la réaction suivante :



❖ Interprétation des résultats des analyses microbiologiques:

Le tableau ci-dessous illustre les résultats des analyses microbiologiques de l'eau de forage et de l'eau traitée, comparés à la norme algérienne:

Tableau IV.3 : Résultats d'analyses microbiologiques de l'eau de forage et de l'eau traitée comparés à la norme algérienne.

Espèces	Eau de forage	Eau traitée	Norme Algérienne J.O N° 35 27/05/1998
Coliforme/100ml	Absence	Absence	15
Coliforme fécaux/100ml	Absence	Absence	Absence
Streptocoques/100ml	Absence	Absence	Absence
Streptocoques fécaux/100ml	Absence	Absence	/
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C.	Absence	Absence	Absence
Germe aérobies à 37°C	100	Absence	20
Germe aérobies à 20°C	20	Absence	< 10 ²
Levure	Absence	Absence	/
Moisissure	Absence	Absence	15

Le traitement a permis la suppression de tous les micro-organismes, ce qui prouve la performance du traitement de désinfection (la chloration et l'UV).

A travers cette étude comparative, on peut retenir deux points importants:

- ✚ En ce qui concerne l'eau de process, la comparaison avec la réglementation algérienne de potabilité montre que tous les paramètres mesurés respectent les normes. A partir de là, on conclue que chaque équipement de la station de traitement de l'eau remplit sa fonction.
- ✚ La faible valeur de TH dans l'eau traitée indique sa forte agressivité ce qui peut induire à un fort pouvoir corrosif.

Remarque:

Il ne faut pas confondre corrosivité et agressivité de l'eau. En effet:

- ♣ La corrosivité est le résultat de l'interaction électrochimique entre le caractère électrolytique de l'eau (présence d'anions et de cations) et le métal. Cette interaction conduit à la dissolution du métal et sa transformation en oxydes insolubles (le plus connu: acier + eau = rouille). On mesure le degré de corrosivité par la conductivité. Moins il y a de cations et d'anions dans l'eau, moins cette eau sera corrosive.
- ♣ L'agressivité est la tendance à dissoudre du carbonate de calcium dans l'eau; elle est due au CO₂ libre présent dans l'eau. Une eau agressive est généralement corrosive mais pas l'inverse.

Pour vérifier la corrosivité de l'eau, on définit l'indice de Larson (indice de corrosivité): [50]

Cet indice permet de déterminer la tendance de l'eau à la corrosion. Il est défini comme suit :

$$I_c = ([Cl^-] + 2.[SO_4^{2-}])/[HCO_3^-]$$

Les concentrations sont exprimées en mole/l.

Selon la valeur trouvée, on distingue quatre domaines:

$I_c < 0.2$: pas de tendance à la corrosion

$0.2 < I_c < 0.5$: faible tendance à la corrosion

$0.5 < I_c < 1$: tendance moyenne à la corrosion

$I_c > 1$: nette tendance à la corrosion

Dans notre cas:

$$[Cl^-] = 230 \text{ mg/l} = 6.48 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$[SO_4^{2-}] = 41.15 \text{ mg/l} = 4.29 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$$

$$[HCO_3^-] = 317.2 \text{ mg/l} = 5.20 \cdot 10^{-3}$$

Ce qui donne $I_c = 1.41$

La valeur trouvée est supérieure à 1, donc l'eau de process a une nette tendance à la corrosion. La tuyauterie de l'unité est en inox, ce qui la protège contre l'importante corrosivité de l'eau de process.

On peut vérifier l'agressivité et la corrosivité de cette eau en utilisant un logiciel basé sur l'étude de l'équilibre calco-carbonique, portant le nom « Equil V1.5 »



Description du logiciel :

Ce logiciel est un programme développé par Pierre RAVARINI, (ingénieur/ hydrologue), inspiré de la méthode de Hallopeau et Dubin.

Ce logiciel permet de déterminer la qualité de l'eau tout en évaluant l'indice de stabilité (indice de Ryznar), l'indice de saturation et l'indice de Larson.

1- Indice de stabilité(indice de Ryznar) [12 et 49]

La détermination de cet indice permet de mesurer le pouvoir agressif ou entartrant d'une eau.

Cet indice est basé sur la mesure du pH réel de l'eau considérée et son pH de saturation (pH_s). Le pH_s est le pH d'équilibre au delà duquel il va être observé une précipitation des ions calcium et bicarbonates sous forme de carbonates de calcium.

Sa formule est donnée comme suit :

$$\mathbf{IR = 2 \cdot \text{pH}_s - \text{pH}}$$

Selon la valeur trouvée, on détermine la qualité de l'eau :

IR < 6 Eau d'autant plus entartrante que la valeur est faible.

6 < IR < 6,5 Eau à l'équilibre

IR > 6,5 Eau d'autant plus agressive que la valeur est élevée.

2- Indice de saturation [39]

Il permet également la détermination de la qualité de l'eau. Sa formule est donnée par :

$$\mathbf{i = \text{pH} - \text{pH}_s}$$

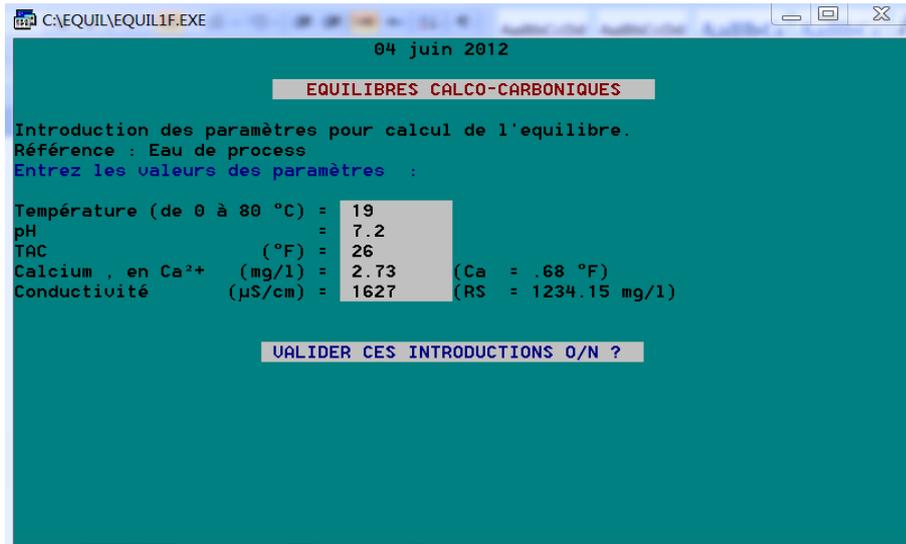
Selon sa valeur, l'eau peut être agressive ou incrustante :

i < 0 Eau agressive

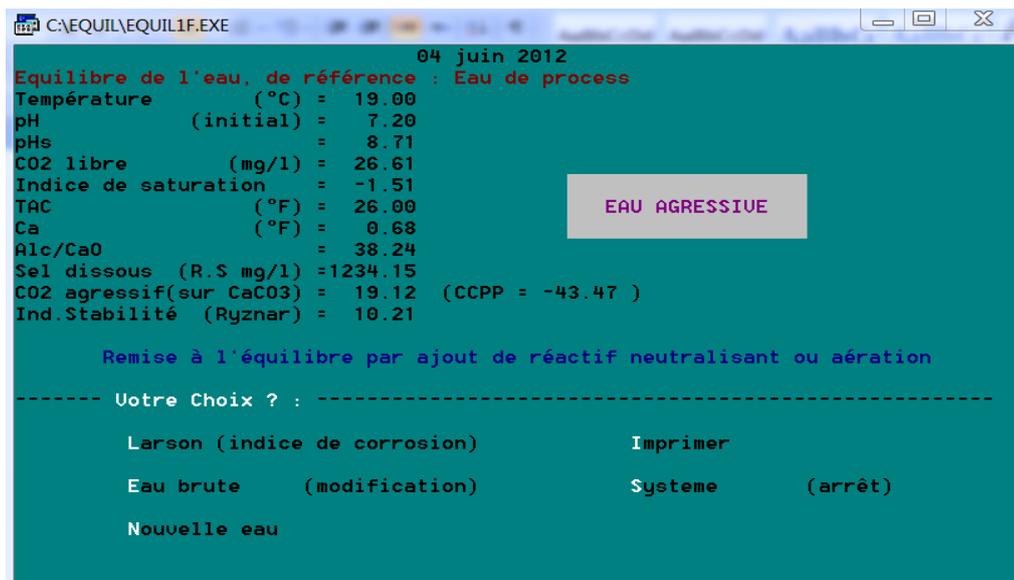
i = 0 Eau inerte

i > 0 Eau incrustante

✚ Introduction des paramètres nécessaires:



✚ La qualité de l'eau de process est donnée par le logiciel comme suit :



L'eau est agressive, tel qu'on remarque que les deux indices : de saturation et de stabilité sont dans le domaine de l'agressivité : ($i = -1,51 < 0$ et $IR = 10,21 > 6,5$).

Vérification de la tendance à la corrosion :

```

C:\EQUIL\EQUILIF.EXE
CORROSION
INDICE DE LARSON
Indice de Larson ou Larson Ratio (LR) : [Cl] + 2[SO4] / [HCO3] - (en mol/l)
Chlorures (mol/l) = 0.00649 (230.00 mg/l)
Sulfates (mol/l) = 0.00043 (41.15 mg/l)
TAC, en HCO3 (mol/l) = 0.00520 (26.00 °F )
Ind. Corrosion (LR) = 1.41
-----
Conclusion, selon LR :
Nette tendance à la corrosion des métaux
Rappel selon Ryznar (IR =10.15) :
Corrosion tres importante
-----
Choix ? > Continuer ( retour ) Imprimer
> Reprendre (nouveau LR) (NB : ind.Larson non memorise)

```

❖ Recommandations:

Etant donné que les salinités anioniques et cationiques sont élevées, nous recommandons que l'étape d'adoucissement soit remplacée par une étape de déminéralisation permettant de diminuer la minéralisation de l'eau de forage afin de réduire sa corrosivité. Cette installation sera constituée de deux colonnes d'échange cationique et anionique opérant avec des résines de forme R-H et R-OH. Une première colonne pour éliminer les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ suivie d'une deuxième colonne (échangeuse anionique) pour éliminer les ions Cl^- , SO_4^{2-} et le TAC.

La station de traitement de l'unité a fait l'objet d'un travail de Magister en 2010-2011 [19] Cette étude s'est intéressée au dimensionnement d'une installation de déminéralisation constituée de deux résines de type R-H et R-OH. Les dimensions de cette installation sont données en annexe 6.

2) Etude de phénomène d'encrassement dans le pasteurisateur multitubulaire:

Le pasteurisateur multitubulaire souffre d'un problème d'encrassement dans sa partie parcourue par l'eau chaude (circuit secondaire).

Cette eau circule en circuit fermé entre la section de pasteurisation et la zone secondaire là où elle subit un réchauffement par échange de chaleur avec de la vapeur d'eau.

L'étude de ce phénomène peut se faire en se basant sur les résultats d'analyses physico-chimiques et microbiologiques de cette eau.

❖ Analyses physico-chimiques et interprétation des résultats

Le tableau ci-dessous illustre les résultats d'analyse physico-chimique de l'eau à la sortie du pasteurisateur multitubulaire (coté chaud), comparés à ceux de l'eau de process et à la norme algérienne:

Tableau IV.4 : Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau chaude et de l'eau de process comparés à la norme algérienne.

Elément	Eau de process	Eau du pasteurisateur multitubulaire	Norme Algérienne J.O N° 18 DU 23/03/2011
pH à 19°C	7,2	7,3	6,5-9
Conductivité à 18°C µS/cm	1627	1632	Max 2800
Turbidité FTU/NTU	0,8	1,3	5
Titre Alcalimétrique simple (TA) °F	00	00	/
Carbonate (CO ₃ ²⁻) mg/l	00	00	
Alcalinité totale (TAC) °F	26	31	/
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) mg/l	317,2	378,2	/
Dureté totale (TH) °F	5,6	9,4	Max 50
Calcium mg/l	2,73	20,44	200
Magnésium mg/l	1,1	10	150
Chlorure mg/l	230	230	Max 500
Sulfate mg/l	41,15	31,15	Max 400
Fer mg/l	00	0,06	Max 0,3
Cuivre mg/l	0,03	0,04	Max 0,05
Zinc mg/l	0,2	0,2	Max 5

L'échange de chaleur entre la vapeur et l'eau dans le circuit secondaire conduit à l'augmentation de la température de l'eau (102°C), ce qui entraîne la formation de composés solides entartrants (carbonates de calcium et de magnésium), selon les réactions suivantes:



Ces composés précipitent immédiatement.

Normalement, la précipitation de CaCO₃ et MgCO₃ conduit à une diminution des concentrations de calcium, magnésium et bicarbonates mais les résultats d'analyse montrent l'inverse.

La comparaison entre l'eau chaude du pasteurisateur et l'eau de process permet de déduire:

- Une augmentation des concentrations du calcium et du magnésium dans l'eau chaude (ce qui se traduit par une élévation de la dureté totale (TH)).
- Une augmentation de la concentration de HCO₃⁻ et une augmentation de TAC.

Ces résultats obtenus s'expliquent comme suit:

L'agressivité de l'eau et son débit élevé provoquent un réentraînement des particules déposées (par érosion, écaillage et par effet des forces de cisaillement) (voir chapitre I: *Apparition et développement de l'encrassement*). Ce phénomène de réentraînement est vérifié par l'augmentation de la turbidité qui prouve la présence des matières solides en suspension.

La présence de fuites tout au long du circuit provoque d'énormes pertes d'eau. Pour maintenir le débit d'eau chaude, les quantités d'eau perdues sont remplacées par des apports en eau trai-

tée (eau parasite), Cela explique l'augmentation des concentrations de calcium, de magnésium et de bicarbonates.

- La diminution de la concentration des sulfates s'explique par leur précipitation sous forme de sulfates de calcium et de magnésium.

Même si les sulfates de calcium et de magnésium forment la dureté permanente, l'augmentation de la température au-delà de 90°C provoque leur précipitation.

La présence de sulfate dans le dépôt explique son durcissement.

- L'apparition d'une faible quantité de fer dans l'eau chaude peut être expliquée par un début de manifestation de la corrosion.

❖ Interprétation des résultats des analyses microbiologiques:

Le tableau ci-dessous illustre les résultats d'analyse microbiologique de l'eau chaude au niveau du pasteurisateur tubulaire et de l'eau traitée :

Tableau IV.5 : Résultats des analyses microbiologiques de l'eau chaude et d'eau process comparés à la norme algérienne.

Espèces	Eau traitée	Eau de pasteurisateur multitubulaire	Norme Algérienne J.O N° 35 27/05/1998
Coliforme/100ml	Absence	Absence	15
Coliforme fécaux/100ml	Absence	Absence	Absence
Streptocoques/100ml	Absence	Absence	Absence
S. fécaux/100ml	Absence	Absence	/
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C.	Absence	Absence	Absence
Germe aérobies à 37°C	Absence	Absence	20
Germe aérobies à 20°C	Absence	Absence	< 10 ²
Levure	Absence	Absence	/
Moisissure	Absence	Absence	15

L'analyse microbiologique permet de déduire l'absence de micro-organismes du fait de leur absence dans l'eau de process et de l'impossibilité de leur développement à des températures élevées (>100°C).

A travers cette étude, nous constatons que l'encrassement est le résultat de la combinaison de deux types de phénomène : l'entartrage et l'encrassement particulaire.

❖ Recommandation :

Pour faire face au problème d'encrassement, nous proposons les solutions suivantes :

- ✓ Eliminer toute source de fuites en s'assurant de l'étanchéité de la tuyauterie afin de pouvoir travailler en circuit fermé.
- ✓ Utiliser des inhibiteurs d'entartrage.

Afin de proposer l'inhibiteur permettant l'élimination ou la réduction de phénomène d'entartrage, nous avons contacté un fournisseur Espagnol « Chemipol », spécialisé dans la recherche et la production de biocides et d'additifs pour l'industrie. Selon les résultats des ana-

lyses physico-chimiques et microbiologiques de l'eau chaude du pasteurisateur multitubulaire de l'unité étudiée, ainsi que son débit, il nous a proposé un antitartre portant le nom commercial « CHEMIPOL WT600».

Ce produit est un mélange de phosphore organique et polymères polycarboxylique, La dose proposée est de 0.05g/l. Les caractéristiques de ce produit sont données en annexe 6.

3) Etude du phénomène de corrosion dans le refroidisseur alimentant le pasteurisateur multitubulaire:

La section de refroidissement de ce pasteurisateur est alimentée par une eau froide de couleur rougeâtre, provenant d'un refroidisseur.

Cette eau circule en circuit fermé entre la section de refroidissement du pasteurisateur et l'évaporateur de cycle de froid tout en passant par un réservoir de stockage (en acier galvanisé) ouvert à l'air libre.

Cette eau ne se mélange en aucun point avec le produit pasteurisé (boisson fruitée).

Des analyses sur le produit sortant du pasteurisateur se font régulièrement au niveau du laboratoire de l'unité. Aucun d'entre eux n'a montré la présence d'une contamination.

Cette étude de corrosion nous a été proposée par mesure préventive.

L'étude de ce phénomène peut se faire en se basant sur les résultats d'analyse physico-chimiques et microbiologiques de cette eau.

❖ Discussion des résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques:

Le tableau (IV.6) illustre les résultats d'analyse physico-chimique de l'eau de refroidisseur et de l'eau traitée, et le tableau (IV.7) illustre les résultats microbiologiques :

Tableau IV.6 : Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau de refroidisseur et de l'eau de process comparés à la norme algérienne.

Elément	Eau traitée	Eau de refroidisseur	Norme Algérienne J.O N° 18 DU 23/03/2011
pH à 19°C	7,2	8,4	6,5-9
Conductivité à 18°C $\mu\text{S}/\text{cm}$	1627	1654	Max 2800
Turbidité FTU/NTU	0,8	60,7	5
Titre Alcalimétrique simple (TA) °F	00	01	/
Carbonate (CO_3^{2-}) mg/l	00	02	
Alcalinité totale (TAC) °F	26	23	/
Bicarbonates (HCO_3^-) mg/l	317,2	21	/
Dureté totale (TH) °F	5,6	19,5	Max 50
Calcium mg/l	2,73	30,46	200
Magnesium mg/l	1,1	29	150
Chlorures mg/l	230	240	Max 500
Sulfates mg/l	41,15	123,46	Max 400
Fer mg/l	00	1,66	Max 0,3
Cuivre mg/l	0,03	0,26	Max 0,05
Zinc mg/l	0,2	0,45	Max 5

Tableau IV.7: Résultats des analyses microbiologiques de l'eau chaude et de l'eau de process comparés à la norme algérienne.

Espèces	Eau traitée	Eau de refroidisseur	Norme Algérienne J.O N° 35 27/05/1998
Coliforme/100ml	Absence	+	15
Coliforme fécaux/100ml	Absence	Absence	Absence
Streptocoques/100ml	Absence	+	Absence
S. fécaux/100ml	Absence	Absence	/
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C.	Absence	+	Absence
Germe aérobies à 37°C	Absence	10 ²	20
Germe aérobies à 20°C	Absence	250	< 10 ²
Levure	Absence	Absence	/
Moisissure	Absence	(+) (+)	15

Remarque : l'échantillon de l'eau de refroidisseur est prélevé à la partie supérieure de réservoir (ouverte à l'air ambiant).

La comparaison entre l'eau traitée et l'eau de refroidisseur permet de déduire :

- Une augmentation considérable de la dureté totale de l'eau du refroidisseur suite à l'augmentation de la concentration de calcium et de magnésium comme le montre la figure suivante:

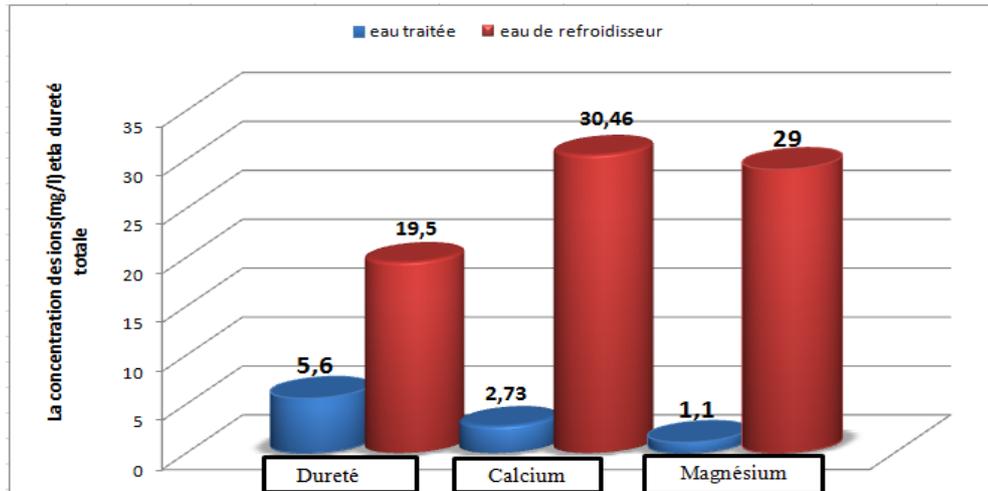


Figure IV.6. Variation de la dureté totale et des concentrations de calcium et de magnésium entre l'eau de process et l'eau du refroidisseur.

- Une augmentation du titre alcalimétrique simple (TA) et l'apparition des carbonates (CO_3^{2-}).
- Une diminution remarquable de l'alcalinité totale (TAC).

Ces phénomènes peuvent être expliqués comme suit :

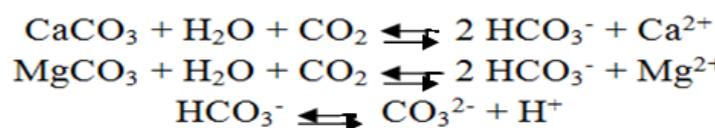
L'eau traitée contenant une quantité importante de bicarbonate arrive dans la section de refroidissement avec une température faible. Après avoir subi un échange de chaleur avec le produit pasteurisé, sa température augmente, ce qui favorise la formation de CaCO_3 et de MgCO_3 , et explique la diminution de la concentration des bicarbonates.

Les réactions suivantes illustrent le phénomène :



Les quantités de CaCO_3 et de MgCO_3 formées ne sont pas très importantes du fait de la faible augmentation de la température.

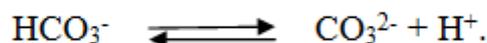
Une faible quantité de CaCO_3 et MgCO_3 est précipitée dans le pasteurisateur, le reste est entraîné suite à l'agressivité et au débit important de l'eau, et acheminé vers le réservoir du refroidisseur contenant d'énormes quantités de CO_2 libre (car il est ouvert à l'air ambiant), ce qui conduit à la dissolution de CaCO_3 et de MgCO_3 formées dans le pasteurisateur selon les réactions suivantes:



Et donc, formation à nouveau du calcium, du magnésium et des bicarbonates. L'eau qui arrive au refroidisseur, normalement, doit présenter des concentrations plus faibles en ces éléments.

Néanmoins, les valeurs enregistrées sont élevées par suite d'ajout d'eau parasite en remplacement des fuites occasionnées dans le circuit.

L'augmentation de la concentration de bicarbonates déplace l'équilibre dans le sens d'une formation de carbonates, ce qui explique la diminution de la concentration de HCO_3^- et l'augmentation de celle de CO_3^{2-} .



Toutes ces réactions expliquent l'augmentation du TH et de TA et la diminution de TAC.

- Les résultats montrent également l'augmentation de la concentration des sulfates dans l'eau de refroidisseur. Cela peut s'expliquer par la présence de l'oxygène provenant de l'air ambiant et des bactéries aérobies (tableau IV.7) qui sont capables d'oxyder H_2S pour former du soufre puis éventuellement l'acide sulfurique (H_2SO_4).

Le phénomène est expliqué par la réaction suivante:



En milieu aérobie, il y a apparition des sulfates SO_4^{2-} .

En bas du réservoir, c'est l'opération inverse qui se manifeste, tel que la présence des bactéries anaérobies réductrices (Clostridium sulfito-réducteurs) conduisant à la réduction des sulfates pour former le sulfure (H_2S).



Toutes ces étapes constituent le cycle de soufre. [44]

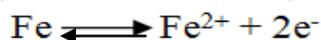
- L'ensemble de ces phénomènes et l'agressivité de l'eau de process expliquent l'évolution considérable de la corrosion qui est, en fait, une combinaison de deux types : corrosion électrochimique et corrosion biochimique.

Le mécanisme de base de cette corrosion est donné comme suit : [12 et 44]

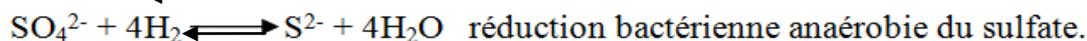
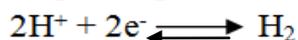
La réaction électrochimique implique le passage d'un courant sous l'action d'une différence de potentiel existant dans le système. Le métal se dissout à l'anode, région du potentiel plus faible, sous la forme d'ions qui migrent vers la cathode, région du potentiel plus élevé.

En pratique, plusieurs réactions anodiques et cathodiques différentes peuvent se produire simultanément à la surface du métal:

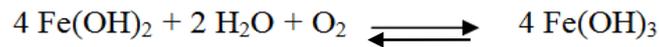
- 1) Dissolution du métal à l'anode (la surface de réservoir):



- 2) L'eau de refroidisseur est riche en oxygène et le milieu est basique, la réaction cathodique est essentiellement une réduction de l'oxygène :



Les ions ferreux (Fe^{2+}) réagissent ensuite avec les ions hydroxydes pour former l'hydroxyde ferreux (couche protectrice), puis ce précipité est facilement oxydé pour former des complexes d'oxyde ferrique (la rouille) suivant la réaction:



- L'influence des chlorures est très marquée: lors du processus initial de corrosion, il y a accroissement de la concentration de la plage anodique en ions Cl^- (traversent facilement les dépôts recouvrant éventuellement les métaux et pénètrent dans les microfissures qui existent toujours à la surface du métal) conduits par le courant et également apparition d'ions H^+ par précipitation d'ions OH^- à distance sous forme d'hydroxyde ferreux. Ceci provoque la formation d'une concentration locale importante en ions H^+ et Cl^- qui empêchent la précipitation sur place des hydroxydes.

L'augmentation de la teneur d'une eau en ions chlorures accroît la probabilité de réalisation d'une infinité de microanodes en entraînant le développement d'une corrosion généralisée et d'une corrosion par piqûres.

- Les résultats montrent également une augmentation importante de la turbidité de l'eau duréservoir à la sortie du refroidisseur, due en partie à la formation de la rouille de couleur rougeâtre.
- L'augmentation des concentrations des ions Fe^{2+} , Cu^{2+} et Zn^{2+} est due à leur remise en solution par suite du phénomène de corrosion.

❖ Recommandations:

Pour faire face au problème de corrosion, nous proposons les solutions suivantes :

- ✓ Utiliser un réservoir fermé pour empêcher la pénétration de l'oxygène et du dioxyde de carbone qui sont les principaux facteurs de corrosion.
- ✓ Choisir un matériau résistant à la corrosion, par exemple réservoir en inox, en fibre de verre ou en matière plastique.
- ✓ Eliminer toute source de fuites en s'assurant de l'étanchéité de la tuyauterie afin de pouvoir travailler en circuit fermé.
- ✓ Utiliser des inhibiteurs de corrosion

Le même fournisseur « Chemipol » nous a proposé deux inhibiteurs de corrosion en se basant sur les résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques de l'eau du refroidisseur, ainsi que son débit. Ces produits portent les noms commerciaux suivants :

CHEMIPOL IC340 : la dose proposée est de 2.1g/l.

CHEMIPOL IC351 : La dose proposée est de 1.9g/l.

Les caractéristiques de ces deux produits sont données en annexe 6.

Conclusion générale

Notre travail s'est intéressé à l'étude des dysfonctionnements liés aux échangeurs de chaleur dans une unité de production des boissons rafraichissantes sans alcools.

Une étude bibliographique a été effectuée et nous a permis de:

1. Cerner les problèmes couramment rencontrés dans les échangeurs de chaleurs, à savoir l'encrassement, la corrosion et la vibration.
2. Comprendre les procédés industriels de production de froid.
3. Déterminer les indicateurs de qualité de l'eau pour pouvoir choisir les paramètres à analyser en fonction de l'objectif recherché.

Un bilan thermique a été effectué sur l'échangeur de chaleur à plaques. Les résultats obtenus ont montré que celui-ci avait été correctement dimensionné et que le problème se situait en amont, c'est-à-dire au niveau du refroidisseur servant à l'alimenter en eau froide.

Un bilan sur le refroidisseur a montré que celui-ci était sous dimensionné. Pour répondre aux besoins de l'échangeur à plaques, le refroidisseur doit être caractérisé par :

1. Une puissance absorbée par le frigorigène (R22) au niveau de l'évaporateur de 407kW
2. Une puissance frigorifique d'environ 83kW
3. Une puissance thermique dégagée au condenseur d'environ 490kW.

En ce qui concerne l'échangeur multitubulaire et le refroidisseur l'alimentant, nous avons constaté que ceux ci ne présentaient pas de problème du point de vue thermique. Cependant des problèmes de corrosion et d'encrassement ont été constatés au niveau de ces deux appareils.

Des analyses physico-chimiques et microbiologiques de l'eau ont été effectuées. L'exploitation des résultats obtenus a permis de proposer des solutions pour remédier aux problèmes de corrosion et d'encrassement. Nous suggérons:

1. De régler le problème d'encrassement en éliminant toutes les fuites dans le circuit d'eau chaude et en utilisant des inhibiteurs d'entartrage.
2. De régler le problème de corrosion, en s'assurant de l'étanchéité du circuit d'eau froide afin d'empêcher la pénétration de l'oxygène et du dioxyde de carbone dans le réservoir de stockage liant le pasteurisateur multitubulaire et le refroidisseur, et en utilisant des inhibiteurs de corrosion.

Nous proposons aussi de réduire la corrosivité de l'eau par l'amélioration de sa qualité en termes de sels dissous et cela en effectuant des changements au niveau de la station de traitement de l'eau par le remplacement de l'étape d'adoucissement par une étape de déminéralisation constituée de deux colonnes d'échange d'ions cationique et anionique respectivement de forme R-H et R-OH.



Annexes

Annexe 1 : Les caractéristiques techniques du pasteurisateur à plaques.



Instruction générale

1.1 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Capacité	: 18.000 L/H
Type de produit	: EAU AROMATIQUE
Cycle thermique produit	
Température initiale	: +25°C
Préchauffage	: +85°C
Pasteurisation	: +95°C
Arrêt en temp. 30 sec.	: +95°C
Prérefroidissement	: +35°C
Refroidissement	: +15°C
Cycle thermique eau froide	
Température entrée	: +07°C
Température sortie	: +12°C
Quantité de vapeur à 1-2 bar	: 400 Kg/h (200.000 Kcal/h)
Quantité eau froide	: 70.000 L/h
Puissance pompe produit :	: 3Kw
Alimentation Air	: 8 bar
Alimentation électrique	: 380 Volt 50 Hz

❖ Les mesures de température prises sur site à l'aide d'une sonde:

Cycle thermique produit :

Température d'entrée produit (initiale) : 25°C

Température de pasteurisation : 95°C

Température prérefroidissement : 35°C

Température de sortie du produit: 23,5°C

Cycle thermique d'eau

Température d'entrée de l'eau froide : 21°C

Température de sortie d'eau froide: 26,5°C

Annexe 2: Le programme informatique sur le bilan thermique du pasteurisateur à plaques:

```

disp('LE BILAN THERMIQUE')
qf= input('introduisez le debit volumique du fluide froid (m3/h) ')
qc= input('introduisez le debit volumique du fluide chaud (m3/h) ')
pf= input('introduisez la masse volumique du fluide froid (Kg/m3) ')
pc= input('introduisez la masse volumique du fluide chaud (kg/m3) ')
c= input('introduisez la capacite calorifique du fluide froid (KJ/Kg.K) ')
C= input('introduisez la capacite calorifique du fluide chaud (KJ/kg.K) ')
T1= input('introduisez la temperature d entree du fluide chaud (°C) ')
m=qf*pf;
M=qc*pc;
o=m*c;
O=M*C;
A=input('si vous avez la valeur du produit U*S tapez 1, sinon tapez 0')
if A==1
    x=input('introduisez le produit U*S')
else
    S= input('introduisez la surface d echange ')
    L= input('introduisez la longueur de la plaque ')
    e= input('introduisez l epaisseur de la plaque ')
    visc= input('introduisez la viscosite du fluide chaud ')
    visf= input('introduisez la viscosite du fluide froid ')
    cond= input('introduisez la conductivité thermique de la plaque ')
Vc= qc/S;
Vf= qf/S;
Rec= (Vc*pc*L)/visc;
Ref= (Vf*pf*L)/visf;
Prf= (visf*c)/cond;
    Prc= (visc*C)/cond;

if Rec>5*10^5;
Nuc=0.029*(Rec^0.8)*(Prc^0.33);
else
    Rec<10^5;
Nuc=0.664*(Rec^0.5)*(Prc^0.33);
%calcul du coeff de transfert
hc= (cond*Nuc)/L;
hf= (cond*Nuf)/L;
    R1= 1/(hc*S);
    R2= e/(cond*S);
R3= 1/(hf*S);
    U=1/(R1+R2+R3)
    disp('x est le produit de U et S')
x=U*S
end
end
end
B= (1-((M*C)/(m*c)))* (x/(M*C));
disp('la temperature d entree du fluide froid t1 (°C) ')
T2= input('introduisez la valeur de la temperature de sortie de fluide
chaud souhaitee (°C) ')

```

```

t1= (((M*C)/(m*c))-1)/(exp(B)-1)*T1 + ((exp(B)- ((M*C)/(m*c)))/(exp(B)-
1))*T2
disp('la temperature de sortie du fluide froid t2 (°C) ')
t2=t1+(((M*C)/(m*c))*(T1-T2))
%calcul de lefficacite
if O<o
Eff=(T1-T2)/(T1-t1)
else Eff= (t2-t1)/(T1-T1)
end

```

L' execution de programme :

LE BILAN THERMIQUE

introduisez le debit volumique du fluide froid (m3/h) 70

qf =
70

introduisez le debit volumique du fluide chaud (m3/h) 18

qc =
18

introduiser la masse volumique du fluide froid (Kg/m3) 1000

pf =
1000

introduiser la masse volumique du fluide chaud (kg/m3) 1060

pc =
1060

introduiser la capacite calorifique du fluide froid (KJ/Kg.K) 4.186

c =
4.1860

introduiser la capacite calorifique du fluide chaud (KJ/kg.K) 3.8

C =
3.8000

introduiser la temperature d entree du fluide chaud °C 35

T1 =
35

si vous avez la valeur du produit U*S tapez 1, sinon tapez O1

A =
1

introduisez le produit U*S102118.31

x =
1.0212e+005

disp =
la temperature d entree du fluide froid t1 (°C)

introduisez la valeur de la temperature de sortie de fluide chaud souhaitee (°C) 15

T2 =
15

t1 =
7.0204

disp =
la temperature de sortie du fluide froid t2 (°C)

t2 =
11.9692
Eff =
0.7148

Remarque : Le programme informatique que nous avons établie est valable pour la détermination des températures et des efficacités de tout échangeur à plaques, quelques soit leurs caractéristiques et les fluides qui le parcourent.

Annexe 3 : Les caractéristiques du fréon R22 [29], [34]

R22 est un hydrochlorofluorocarbure (HCFC), il a comme formule chimique CHClF_2 (Chlorodifluorométhane). Ce fluide est peu odorant, incolore sous ses formes gazeuses et liquides, et il n'est ni toxique, ni irritant, ni inflammable, ni corrosif, ni explosif. Il est chimiquement stable.

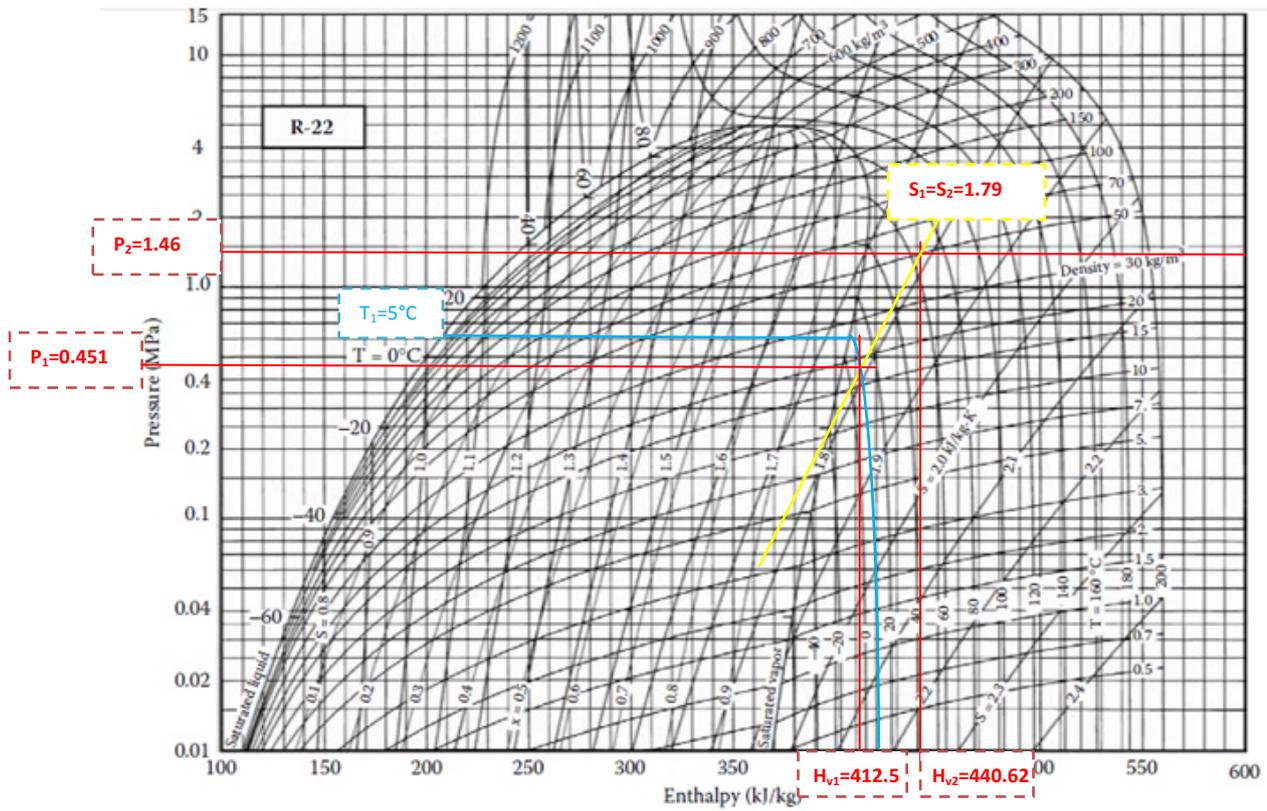
- Sa masse molaire est de 86,47 g/mole
- Sa température d'ébullition est de $-40,81^\circ\text{C}$ sous la pression atmosphérique normale (1,013 bar)
- Sa température critique est de $96,15^\circ\text{C}$ et sa pression est de 4990 kPa.

• Propriétés du fréon R22

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid v_f	Vapour v_g	Liquid d_f	Vapour d_g	Liquid H_f	Latent H_{fg}	Vapour H_g	Liquid S_f	Vapour S_g	
-46	78.9	0.0007	0.2684	1424.0	3.726	148.4	236.9	385.3	0.794	1.838	-46
-45	82.9	0.0007	0.2583	1421.0	3.901	149.4	236.4	385.8	0.799	1.835	-45
-44	87.1	0.0007	0.2450	1418.0	4.082	150.5	235.8	386.3	0.804	1.833	-44
-43	91.3	0.0007	0.2342	1416.0	4.270	151.6	235.1	386.7	0.809	1.830	-43
-42	95.8	0.0007	0.2240	1413.0	4.464	152.7	234.5	387.2	0.813	1.828	-42
-41	100.4	0.0007	0.2144	1410.0	4.665	153.8	233.9	387.7	0.818	1.825	-41
-40	105.2	0.0007	0.2052	1407.0	4.873	154.9	233.2	388.1	0.823	1.823	-40
-39	110.2	0.0007	0.1965	1404.0	5.088	156.0	232.6	388.6	0.827	1.821	-39
-38	115.4	0.0007	0.1883	1401.0	5.311	157.1	232.0	389.1	0.832	1.819	-38
-37	120.7	0.0007	0.1805	1398.0	5.541	158.2	231.3	389.5	0.837	1.816	-37
-36	126.3	0.0007	0.1730	1395.0	5.779	159.3	230.7	390.0	0.841	1.814	-36
-35	132.0	0.0007	0.1660	1392.0	6.025	160.4	230.0	390.4	0.846	1.812	-35
-34	138.0	0.0007	0.1593	1389.0	6.279	161.5	229.4	390.9	0.851	1.810	-34
-33	144.1	0.0007	0.1529	1386.0	6.541	162.6	228.7	391.3	0.855	1.808	-33
-32	150.5	0.0007	0.1468	1383.0	6.811	163.7	228.1	391.8	0.860	1.806	-32
-31	157.1	0.0007	0.1410	1380.0	7.090	164.8	227.4	392.2	0.864	1.804	-31
-30	163.9	0.0007	0.1355	1377.0	7.379	165.9	226.8	392.7	0.869	1.802	-30
-29	170.9	0.0007	0.1303	1374.0	7.676	167.0	226.1	393.1	0.873	1.800	-29
-28	178.2	0.0007	0.1253	1371.0	7.982	168.1	225.5	393.6	0.878	1.798	-28
-27	185.7	0.0007	0.1205	1368.0	8.298	169.2	224.8	394.0	0.882	1.796	-27
-26	193.4	0.0007	0.1160	1365.0	8.623	170.3	224.2	394.5	0.887	1.794	-26
-25	201.4	0.0007	0.1116	1362.0	8.958	171.4	223.5	394.9	0.891	1.792	-25
-24	209.7	0.0007	0.1075	1359.0	9.304	172.6	222.7	395.3	0.896	1.790	-24
-23	218.2	0.0007	0.1035	1356.0	9.659	173.7	222.1	395.8	0.900	1.788	-23
-22	227.0	0.0007	0.0998	1353.0	10.030	174.8	221.4	396.2	0.905	1.786	-22
-21	236.0	0.0007	0.0961	1350.0	10.400	175.9	220.7	396.6	0.909	1.784	-21
-20	245.3	0.0007	0.0927	1347.0	10.790	177.0	220.1	397.1	0.914	1.783	-20
-19	254.9	0.0007	0.0894	1343.0	11.190	178.2	219.3	397.5	0.918	1.781	-19
-18	264.8	0.0008	0.0862	1340.0	11.600	179.3	218.6	397.9	0.922	1.779	-18
-17	275.0	0.0008	0.0832	1337.0	12.020	180.4	217.9	398.3	0.927	1.777	-17
-16	285.4	0.0008	0.0803	1334.0	12.450	181.6	217.1	398.7	0.931	1.776	-16
-15	296.2	0.0008	0.0775	1331.0	12.900	182.7	216.5	399.2	0.935	1.774	-15
-14	307.3	0.0008	0.0749	1328.0	13.360	183.8	215.8	399.6	0.940	1.772	-14
-13	318.7	0.0008	0.0723	1324.0	13.830	185.0	215.0	400.0	0.944	1.771	-13
-12	330.4	0.0008	0.0699	1321.0	14.310	186.1	214.3	400.4	0.949	1.769	-12
-11	342.4	0.0008	0.0675	1318.0	14.810	187.3	213.5	400.8	0.953	1.767	-11
-10	354.8	0.0008	0.0653	1315.0	15.320	188.4	212.8	401.2	0.957	1.766	-10
-9	367.5	0.0008	0.0631	1311.0	15.850	189.6	212.0	401.6	0.962	1.764	-9
-8	380.5	0.0008	0.0610	1308.0	16.380	190.7	211.3	402.0	0.966	1.763	-8
-7	393.9	0.0008	0.0590	1305.0	16.940	191.9	210.5	402.4	0.970	1.761	-7
-6	407.7	0.0008	0.0571	1302.0	17.500	193.0	209.8	402.8	0.974	1.760	-6
-5	421.8	0.0008	0.0553	1298.0	18.090	194.2	209.0	403.2	0.979	1.758	-5
-4	436.3	0.0008	0.0535	1295.0	18.680	195.3	208.2	403.5	0.983	1.757	-4
-3	451.1	0.0008	0.0518	1292.0	19.300	196.5	207.4	403.9	0.987	1.755	-3
-2	466.4	0.0008	0.0502	1288.0	19.920	197.7	206.6	404.3	0.992	1.754	-2
-1	482.0	0.0008	0.0486	1285.0	20.570	198.8	205.9	404.7	0.996	1.752	-1
0	498.0	0.0008	0.0471	1282.0	21.230	200.0	205.0	405.0	1.000	1.751	0
1	514.4	0.0008	0.0457	1278.0	21.910	201.2	204.2	405.4	1.004	1.749	1
2	531.2	0.0008	0.0442	1275.0	22.600	202.4	203.4	405.8	1.008	1.748	2
3	548.4	0.0008	0.0429	1271.0	23.310	203.5	202.6	406.1	1.013	1.746	3
4	566.1	0.0008	0.0416	1268.0	24.040	204.7	201.8	406.5	1.017	1.745	4
5	584.1	0.0008	0.0403	1264.0	24.790	205.9	200.9	406.8	1.021	1.744	5
6	602.6	0.0008	0.0391	1261.0	25.560	207.1	200.1	407.2	1.025	1.742	6
7	621.5	0.0008	0.0380	1257.0	26.340	208.3	199.2	407.5	1.030	1.741	7

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m ³ /kg]		Density [kg/m ³]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid v _l	Vapour v _g	Liquid d _l	Vapour d _g	Liquid H _l	Latent H _{lg}	Vapour H _g	Liquid S _l	Vapour S _g	
8	640.9	0.0008	0.0368	1254.0	27.150	209.5	198.4	407.9	1.034	1.739	8
9	680.7	0.0008	0.0358	1250.0	27.970	210.7	197.5	408.2	1.038	1.738	9
10	680.9	0.0008	0.0347	1247.0	28.820	211.9	196.7	408.6	1.042	1.737	10
11	701.7	0.0008	0.0337	1243.0	29.690	213.1	195.8	408.9	1.046	1.735	11
12	722.9	0.0008	0.0327	1239.0	30.570	214.3	194.9	409.2	1.051	1.734	12
13	744.5	0.0008	0.0318	1236.0	31.480	215.5	194.0	409.5	1.055	1.733	13
14	766.7	0.0008	0.0309	1232.0	32.410	216.7	193.2	409.9	1.059	1.732	14
15	789.3	0.0008	0.0300	1229.0	33.360	217.9	192.3	410.2	1.063	1.730	15
16	812.4	0.0008	0.0291	1225.0	34.340	219.1	191.4	410.5	1.067	1.729	16
17	836.1	0.0008	0.0283	1221.0	35.340	220.4	190.4	410.8	1.071	1.728	17
18	860.2	0.0008	0.0275	1217.0	36.360	221.6	189.5	411.1	1.076	1.726	18
19	884.8	0.0008	0.0267	1214.0	37.410	222.8	188.6	411.4	1.080	1.725	19
20	910.0	0.0008	0.0260	1210.0	38.480	224.1	187.6	411.7	1.084	1.724	20
21	935.7	0.0008	0.0253	1206.0	39.570	225.3	186.6	411.9	1.088	1.722	21
22	961.9	0.0008	0.0246	1202.0	40.700	226.5	185.7	412.2	1.092	1.721	22
23	988.7	0.0008	0.0239	1198.0	41.850	227.8	184.7	412.5	1.096	1.720	23
24	1016.0	0.0008	0.0232	1195.0	43.030	229.0	183.8	412.8	1.100	1.719	24
25	1044.0	0.0008	0.0226	1191.0	44.230	230.3	182.7	413.0	1.105	1.717	25
26	1072.0	0.0008	0.0220	1187.0	45.470	231.5	181.8	413.3	1.109	1.716	26
27	1101.0	0.0009	0.0214	1183.0	46.730	232.8	180.7	413.5	1.113	1.715	27
28	1131.0	0.0009	0.0208	1179.0	48.020	234.1	179.7	413.8	1.117	1.714	28
29	1161.0	0.0009	0.0203	1175.0	49.350	235.3	178.7	414.0	1.121	1.712	29
30	1192.0	0.0009	0.0197	1171.0	50.700	236.6	177.7	414.3	1.125	1.711	30
31	1223.0	0.0009	0.0192	1167.0	52.090	237.9	176.6	414.5	1.129	1.710	31
32	1255.0	0.0009	0.0187	1163.0	53.520	239.2	175.5	414.7	1.133	1.709	32
33	1288.0	0.0009	0.0182	1158.0	54.970	240.5	174.4	414.9	1.138	1.707	33
34	1321.0	0.0009	0.0177	1154.0	56.460	241.8	173.3	415.1	1.142	1.706	34
35	1355.0	0.0009	0.0172	1150.0	57.990	243.1	172.2	415.3	1.146	1.705	35
36	1389.0	0.0009	0.0168	1146.0	59.550	244.4	171.1	415.5	1.150	1.704	36
37	1424.0	0.0009	0.0164	1142.0	61.150	245.7	170.0	415.7	1.154	1.702	37
38	1460.0	0.0009	0.0160	1137.0	62.790	247.0	168.9	415.9	1.158	1.701	38
39	1497.0	0.0009	0.0155	1133.0	64.470	248.3	167.8	416.1	1.162	1.700	39
40	1534.0	0.0009	0.0151	1129.0	66.190	249.6	166.6	416.2	1.166	1.698	40
41	1571.0	0.0009	0.0147	1124.0	67.960	251.0	165.4	416.4	1.171	1.697	41
42	1610.0	0.0009	0.0143	1120.0	69.760	252.3	164.3	416.6	1.175	1.696	42
43	1649.0	0.0009	0.0140	1115.0	71.610	253.7	163.0	416.7	1.179	1.695	43
44	1689.0	0.0009	0.0136	1111.0	73.510	255.0	161.8	416.8	1.183	1.693	44
45	1729.0	0.0009	0.0133	1106.0	75.460	256.4	160.6	417.0	1.187	1.692	45
46	1770.0	0.0009	0.0129	1101.0	77.450	257.7	159.4	417.1	1.191	1.691	46
47	1812.0	0.0009	0.0126	1097.0	79.500	259.1	158.1	417.2	1.196	1.689	47
48	1855.0	0.0009	0.0123	1092.0	81.590	260.5	156.8	417.3	1.200	1.688	48
49	1899.0	0.0009	0.0119	1087.0	83.740	261.9	155.5	417.4	1.204	1.687	49
50	1943.0	0.0009	0.0116	1082.0	85.950	263.2	154.2	417.4	1.208	1.685	50
51	1988.0	0.0009	0.0113	1077.0	88.220	264.6	152.9	417.5	1.212	1.684	51
52	2033.0	0.0009	0.0110	1072.0	90.540	266.0	151.6	417.6	1.216	1.682	52
53	2080.0	0.0009	0.0108	1067.0	92.930	267.5	150.1	417.6	1.221	1.681	53
54	2127.0	0.0009	0.0105	1062.0	95.380	268.9	148.7	417.6	1.225	1.680	54
55	2175.0	0.0010	0.0102	1057.0	97.900	270.3	147.4	417.7	1.229	1.678	55
56	2224.0	0.0010	0.0100	1052.0	100.500	271.8	145.9	417.7	1.233	1.677	56
57	2274.0	0.0010	0.0097	1047.0	103.100	273.2	144.5	417.7	1.238	1.675	57
58	2324.0	0.0010	0.0094	1041.0	105.900	274.7	142.9	417.6	1.242	1.674	58
59	2375.0	0.0010	0.0092	1036.0	108.700	276.1	141.5	417.6	1.246	1.672	59
60	2427.0	0.0010	0.0090	1030.0	111.600	277.6	139.9	417.5	1.250	1.670	60
61	2480.0	0.0010	0.0087	1025.0	114.600	279.1	138.4	417.5	1.255	1.669	61

Annexe 4 : Diagramme de Molier (diagramme Enthalpie-Pression) du Freon R22 [31]



Annexe 5 : Les dimensions de l'installation de déminéralisation :

		Résine cationique	Résine anionique	
Dimensions de la colonne	Diamètre (m)	1	1,25	
	Hauteur (m)	2,4	2,5	
	Volume résine (m ³)	1,25	2,04	
Phase de service	Débit à traiter (m ³ /h)	25	25	
	Temps de service (h)	7,24	7,24	
Phase Régénération	soulèvement	Débit (m ³ /h)	8,3	
		Temps (min)	15	
	Produits de Régénération	Volume du régénérant	0,125 m ³ d'HCl	0,95 m ³ de NaOH
		Volume d'eau (m ³)	1,69	3,88
		Temps de contact (min)	20	20

Le dimensionnement des colonnes de cette installation a été fait pour une capacité de traitement de **25 m³/h**.

Annexe 6: Les inhibiteurs de la corrosion et d'entartrage.

Présentation de la société :

Chemipol est une société chimique qui produit et fournit un catalogue ample de biocides et additifs d'usage industriel et produits chimiques pour le traitement de l'eau. Créé en 1979 à TERRASSA en Espagne, ces produits sont actuellement disponibles sur les cinq continents.

Caracteristiques des inhibiteurs de corrosion et d'entartrage proposés :



CHEMIPOL WT 600

Scale inhibitor and dispersant for cooling and process water systems

<i>Characteristics</i>		<i>Doses guidelines</i>
<p>CHEMIPOL WT 600 is based on organic phosphorous compounds and poly carboxylic acid derivatives.</p> <p>It is a highly threshold inhibitor that prevent the formation of crystal caused by water hardness even in waters which are highly over-saturated. It is formed amorphous deposition which is dispersed and does not form a rigid scale, beings removed from the cooling circuit. It is also a dispersant of silt, limes and sludge.</p> <p>The product is stable at high temperatures and high pH's and it is chlorine resistant.</p>		<p>The product dosage depends on many factors such as: the characteristic of the circuit to be treated, water parameters, hardness, operation conditions, holding or retention time and cleaning of the circuit.</p> <p>As a general idea CHEMIPOL WT 600 should be in the cooling water at a range of 10- 50 ppm.</p>
<i>Technical Data</i>		
Aspect	Transparent liquid	
Colour	Colourless to yellowish	
pH (20° C)	1.0 - 3.0	
Specific weight at 20°C	1.12 - 1.16 gr/cc	
Freezing point	Lower than 0 °C	
Solubility	Total soluble in water	
<i>Application</i>		
<p>Recommended for use in open circulation systems, condensers and scrubbers to avoid the formation of deposits under high water hardness or high level of silt and sludge.</p> <p>CHEMIPOL WT 600 should be added directly by a metering pump in a point that guarantees its rapid distribution in the system. Materials in contact should be made of acid proof material, such as synthetic materials: polyethylene, polypropylene, PVC.</p>		
<i>General information, safety and transport</i>		<i>Storage</i>
<p>CHEMIPOL WT 600 is an acid industrial product. Use gloves and eye protection goggles. Avoid contact with skin and eyes, in case of contact wash immediately with water.</p> <p>For further information refer to the material safety data sheet</p>		<p>Keep containers tightly closed.</p> <p>Protect form freezing, heat and direct sunlight. Store between 0 °C and 40 °C in the original container.</p>

Our recommendations regarding our products are based on in-depth tests developed by our Technical Department. They are given in good faith, but no liability can be derived from them.



CHEMIPOL, S.A. Joan Monpeó 149. 08223 TERRASSA. Barcelona
 Tel + 34 93 7831044 Fax + 34 93 7837580 e-mail chemipol@chemipol.com

Le prix de ce produit est: 650DA/Kg.



Chemipol

CHEMIPOL® IC 340

Inhibiteur de corrosion pour circuits d'eau de recirculation

Caractéristiques

CHEMIPOL IC 340 inhibiteur de corrosion sur la base de différents molybdate, nitrites spécifique pour cuivre, de fer, d'aluminium et de ses alliages.

Le produit protège contre la corrosion des surfaces métalliques de circuits fermés et des circuits ouverts avec de l'eau déminéralisée, la dureté osmotique ou faible, en acier au carbone contenant, le fer fondu, les alliages de cuivre et d'aluminium.

Applications et dosage

Le dosage optimal du CHEMIPOL IC 340 dépend des caractéristiques du système pour traiter et la qualité de l'eau d'alimentation. En règle générale, nous recommandons un dosage de 1,5 à 2,0 gr / l. Il est conseillé de maintenir le système à 50 ppm minimum de molybdate résiduelle et de travail à un pH compris entre 8,5 et 9,5.

Pour une formation rapide de la pellicule de protection à l'intérieur du circuit, recirculer une concentration plus élevée de CHEMIPOL IC 340 pendant quelques jours lors du démarrage du traitement et après un nettoyage.

Caractéristiques techniques

Apparence	Liquide transparent
Colour	Incolore à légèrement rose
pH (à 20°C)	12,50 - 13,90
Poids spécifique (à 20°C)	1,25 - 1,30 gr/cc
Point de congélation	< 10 °C
Solubilité	Totalement soluble dans l'eau

Directrices d'emploi

CHEMIPOL IC 340 est spécialement recommandé pour contrôler la corrosion dans des lieux fermés de recirculation des circuits d'eau de refroidissement, dans les systèmes d'eau froide ou le refroidissement du moteur. Il s'agit d'une bonne passivation des surfaces en acier au carbone.

Informations générales sur le stockage, la sécurité et le transport

CHEMIPOL IC 340 est un produit à usage industriel et doit être adopté les précautions typiques de la manipulation de ces produits. Eviter le contact avec la peau et les yeux. En cas de contact laver immédiatement la zone affectée.

Pour plus d'informations reportez-vous à la feuille de données de sécurité.

Maintenir CHEMIPOL IC 340 dans l'emballage d'origine bien fermé, éviter les températures extrêmes (la boutique > 0 ° C et < 40 ° C) et protégé de la lumière directe du soleil.

Emballage:
25 KG bidon (net tenue de 30 kg)
IBC 1000 KG (net Holding KG 1200).
Autres forfaits disponibles sur demande.

Nos recommandations concernant nos produits sont basés sur des essais approfondis développés par notre département technique. Ils sont donnés de bonne foi et aucune responsabilité ne peut être dérivée d'eux. Toujours lire l'étiquette et les informations produites avant utilisation.



CHEMIPOL, S.A. Joan Monpeó 149 · 08223 TERRASSA · Barcelona · Spain
Tel + 34 937 831 044 Fax + 34 937 837 580 e-mail chemipol@chemipol.com

Le prix de ce produit est : 765DA/Kg.



Chemipol

CHEMIPOL® IC 351

Multifonctionnel inhibiteur de corrosion pour circuits fermés de recirculation d'eau

Caractéristiques

CHEMIPOL IC 351 est un inhibiteur de corrosion sur la base de différents molybdate-nitrites, spécifiques pour cuivre et ses alliages, l'échelle de lutte contre les agents dispersants.

Le produit protège contre la corrosion des surfaces métalliques de circuits fermés.

Applications et dosage

Le dosage optimal du CHEMIPOL IC 351 dépend des caractéristiques du système pour traiter et la qualité de l'eau d'alimentation. A titre d'indication générale, peut être recommandé une dose de 1,0 à 3,0 gr / l.

Pour une formation rapide de la pellicule de protection à l'intérieur du circuit, recirculer une concentration plus élevée de CHEMIPOL IC 351 pendant quelques jours lors du démarrage du traitement et après un nettoyage afin d'assurer la passivation rapide du système.

Caractéristiques techniques

Apparence	Liquide transparent
Colour	légèrement jaunâtre
pH (at 20°C)	< 12,0
Poids spécifique (à 20°C)	1,15- 1,19 gr/cc
Point de congélation	< 0 °C
Solubilité	Totalement soluble dans l'eau

Directrices d'emploi

CHEMIPOL IC 351 est spécialement recommandé pour contrôler la corrosion dans les établissements fermés de recirculation des circuits d'eau de refroidissement, réfrigérés ou chauffer de l'eau. Le pH de travail optimal est dans la gamme 8,5 - 9,5. Il est recommandé pour être utilisé dans de l'eau déminéralisée ou filtrée par osmose ou alternativement dans l'eau de faible dureté.

Informations générales sur le stockage, la sécurité et le transport

CHEMIPOL IC 351 est un produit à usage industriel et doit être adopté les précautions typiques de la manipulation de ces produits. Eviter le contact avec la peau et les yeux. En cas de contact laver immédiatement la zone affectée.

Pour plus d'informations reportez-vous à la feuille de données de sécurité.

Maintenir CHEMIPOL IC 351 dans l'emballage d'origine bien fermé, éviter les températures extrêmes (la boutique > 0 ° C et < 40 ° C) et protégé de la lumière directe du soleil.

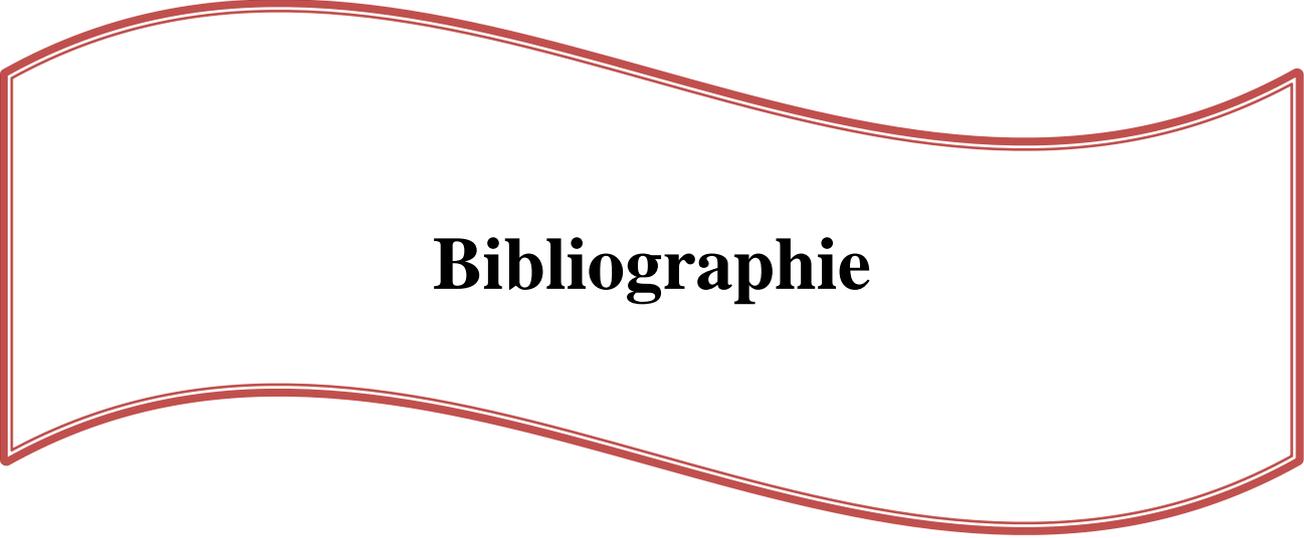
Emballage:
25 KG bidon (net tenue de 30 kg)
IBC 1000 KG (net Holding KG 1150).
Autres forfaits disponibles sur demande.

Nos recommandations concernant nos produits sont basés sur des essais approfondis développés par notre département technique. Ils sont donnés de bonne foi et aucune responsabilité ne peut être dérivée d'eux. Toujours lire l'étiquette et les informations produites avant utilisation.



CHEMIPOL, S.A. Joan Monpeó 149 · 08223 TERRASSA · Barcelona · Spain
Tel + 34 937 831 044 Fax + 34 937 837 580 e-mail chemipol@chemipol.com

Le prix de ce produit est: 1125 DA/Kg.



Bibliographie

- [1] A. Degiovanni «Transmission de l'énergie thermique: Conduction», techniques de l'ingénieur [BE 8200].
- [2] J-L. Battaglia, A. Kusiak, J-R Puiggali «Introduction aux transferts thermiques», édition Dunod, Paris, 2010.
- [3] J-F. Sacadura «Initiation aux transferts thermiques», technique et documentation Lavoisier, 1982.
- [4] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, R. Vidil «Description des échangeurs de chaleur», techniques de l'ingénieur [B2341], 2012.
- [5] P.Wuithier «Pétrole: Raffinage et génie chimique», Tome II. Editions technip, Paris, 1972.
- [6] Y. Bafouloulou, Dj. Bekkouche, «Etude de faisabilité de remplacement d'une batterie d'échangeurs (he1101-1106) au niveau du module"0" a Hassi R'mel en vue d'une optimisation de la production.», PFE, INH, Boumerdes 2005.
- [7] P.Trambouze «Le raffinage du pétrole: 4- Matériels et équipements» Document de l'IFP, Editions technip, 1999.
- [8] R.Vidil «Les échangeurs à plaques et joints, description, éléments de dimensionnement», Lavoisier février, 1982.
- [9] A.Bontemps, A.Garrigue, C.Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, R. Vidil «Problèmes de fonctionnement» techniques de l'ingénieur [B2344], 2012.
- [10] H. Sadouk «Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois», thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2009.
- [11] S. Kebiri «encrassement d'un échangeur de chaleur à plaque lors de la stérilisation de lait» thèse da Magister Génie des procédés USTHB, 2010.
- [12] C.Duffau, J.M.Grillot, J.M.Navarro, R.Vidil «L'encrassement dans les échangeurs : description, prévention, remèdes» édition GREth, 1991.
- [13] B.Fosset, J-B. Baudin, F.Lahitète, V.Prévoist «Chimie TOUT-EN-UN», édition Dunod, Paris, 2008.
- [14] R.Perrin, G.P.Scharff «Chimie industrielle», édition Masson, Paris, 1995.
- [15] A.Galerie, L.Antoni «Corrosion sèche des métaux - Méthodes d'étude», techniques de l'ingénieur, [M4220], 2003.
- [16] A.Galerie, L.Antoni «Corrosion sèche des métaux - Choix des alliages», techniques de l'ingénieur, [M4228], 2003.
- [17] C. Dagbert «Biocorrosion», techniques de l'ingénieur, [COR130], 2009.
- [18] C.Gabrielli, H.Takenouti «Méthodes électrochimiques appliquées à la corrosion Techniques stationnaires», techniques de l'ingénieur, [COR810], 2010.
- [19] S.Keddous «Etude d'une installation de traitement des eaux de process d'une unité agroalimentaire», Mémoire de Magister. ENP, 2011.

- [20] Rapport d'audit environnemental de l'unité étudiée, centre national des technologies de production plus propre (CNTPP), 2010.
- [21] A. Etievant, X. Delolme «Formulation des préparations de fruits» techniques de l'ingénieur [F6290], 2011.
- [22] J. Roux «Conserver les aliments, Comparaison des méthodes et des technologies» Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 1994
- [23] M. Guerra, M. Sauvage «Conservation des aliments ; plus de sécurité, plus de nature», Vie et santé, N: 1242, 1998.
- [24] P. Millet «Liquides alimentaires Conditionnement et stabilisation en emballages primaires», techniques de l'ingénieur [AG6521], 2010.
- [25] N.Larbi, D.Madouni «extraction et analyse de la fraction volatile de jus d'orange: effet du flash pasteurisation et de stockage», PFE, INA, 2000.
- [26] C. Marvillet, A. Bontemps, J. Huetz, A. Garrigue, R. Vidil, C. Goubier, P. Mercier «Échangeurs de chaleur - Définitions et architecture générale», technique de l'ingénieur [B2340], 1994.
- [27] A. Vadrot, J. Delbès «Réseaux de froid urbain - Production et stockage du froid» technique de l'ingénieur [9321], 2012.
- [28] H. Beghoul, L. Ouis «Cycle de réfrigération, réfrigération et congélation avec condensation à air», ENP, 1996.
- [29] F.Meuneir, P.Rivet, M-F.Terrier «Froid industriel», 2^{ème} édition, Edition DUNOD, Paris, 2005.
- [30] J.Desmons «Aide-mémoire Froid industriel», 2^{ème} édition, Edition DUNOD, Paris, 2010.
- [31] J.Héng «Pratique de la maintenance préventive», 2^{ème} édition, Edition DUNOD, Paris, 2002.
- [32] R. Radermacher, Y. Hwang «Vapor Compression Heat Pumps. With Refrigerant Mixtures», Taylor & Francis group, 2005
- [33] G. Vrinat «Production de froid - Exemples de calcul de machines» technique de l'ingénieur [B9745], 1996.
- [34] R. Kling «thermodynamique générale et applications», édition Technip, Paris, 1980
- [35] www.Dupont.com Site internet de fournisseur de R22.
- [36] M. Mamadou Sylla «Modélisation et optimisation de l'encrassement des échangeurs thermiques dans l'industrie chimique de Sénégal», PFE, Ecole supérieure polytechnique de Thiès, 2000
- [37] Frank N. Kemmer, J. McCallin « Manuel de l'eau», Technique & Document. Lavoisier, Paris, 1984
- [38] E. Riboni «Purification de l'eau dans l'industrie» Chézard-Saint-Martin, Suisse, 2002.
- [39] J.Rodier, B.Legube, N.Merlet et coll «L'analyse de l'eau» 8^{ème} et 9^{ème} éditions, Dunod, Paris, 2008, 2009.

- [40] K.S.Venkateswarlu «Water chemistry; industrial and power station water treatment», new age international publishers, 1996.
- [41] Frank N « Kemmer, The nalko water hand book», second edition, McGraw-Hill book compan, 1988.
- [42] j.Bontoux «Introduction à l'étude des eaux douces: eaux naturelles, eaux usées, eaux de boissons», qualité et santé, CEBEDOC, Liège, 1993.
- [43] Bontoux «Introduction à l'étude des eaux douces; eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson, qualité et santé», CEBEDOC, Liège, 1993.
- [44] Degrémont et la Lyonnaise des Eaux «mémento technique de l'eau» 8^{ème} et 9^{ème} éditions, Lavoisier- technique et documentation, Paris, 1978, 1989.
- [45] F. Beré, J. Donnier «Traitement des eaux», édition Technip, Paris, 1992.
- [46] A.Merzoug «caractéristiques microbiologiques et physico-chimiques d'une boisson gazeuse «class». Etude de la stabilité à différentes températures», PFE, USTHB, 2010.
- [47] J.P. Giraud «microbiologie alimentaire», édition Dunod, 2003.
- [48] Priscott, Harley, Klein «microbiologie», 2^{ème} édition De Boeck, 2003.
- [49] Osmonics «pure water handbook», 2^{ème} edition, 1997.
- [50] P.R. Roberg « handbook of corrosion engineering », Edition McGraw-Hill, 2000.