

SOMMAIRE

DEDICACE	2
REMERCIEMENTS	3
Nomenclature	6
Liste des figures.....	7
Introduction générale	8
CHAPITRE I :Présentation de la société et le processus de fabrication de la levure.....	9
I. Présentation de la société.....	10
1. Présentation de LESAFFRE group	10
2. Historique	11
3. LESAFFRE en quelques chiffres.....	12
4. Organigramme de la société	12
II. Processus de la fabrication	13
1. Définition de la levure	13
2. La cellule de la levure	13
3. Les différentes étapes de la fabrication de la levure	13
CHAPITRE II :Généralités sur les échangeurs de chaleur et l'étude thermique.....	18
I. Introduction.....	19
1. Qu'est qu'un échangeur thermique ?	19
2. Les modes de transfert.....	19
3. Principe général.....	19
II. Type des échangeurs de chaleur	20
1. Les échangeurs tubulaires	20
2. Les échangeurs à plaques et joints.....	22
III. Etude thermique d'un échangeur	23
1. Les résistances thermiques	23
2. Bilan thermique	24
3. Rendement de l'échangeur	25
4. Dimensionnement de l'échangeur	25
Chapitre III :Elaboration du projet.....	29
I. Problématique	30
II. Etude de la problématique	30
III. Etude thermique.....	31
1. <i>Pratiquement.....</i>	32

2. <i>Théoriquement</i>	37
Conclusion générale	41
Références	42

Nomenclature

$c ; f$	Des indices correspondants aux thèmes chaud (le moût) et froid (l'eau)	/
$e ; s$	Des indices correspondants aux thèmes entrée et sortie	/
Φ	Flux de chaleur	Kcal/h ou KW
P	Puissance de l'échangeur	KW
K	Coefficient d'échange global	KW/m ² .°C
S_T	Surface d'échange total	m ²
S_p	Surface d'échange d'une plaque	m ²
dT	Différence de température	°C
ΔT_{Lm}	Différence de température logarithmique moyenne	°C
$\dot{m}$	Débit massique	Kg/h
Q	Débit volumique	m ³ /h
C_p	Chaleur calorifique	Kcal/Kg.°C ou J/Kg.°C
η	Rendement de l'échangeur	/
N	Nombre de plaques	/
ρ	Densité du fluide	Kg/m ³

Liste des figures

FIG.1 : LOGO DE LA SOCIETE	10
FIG.2 : ORGANIGRAMME DE LA SOCIETE LESAFFRE FES.....	12
FIG.3 : CELLULE DE LA LEVURE.....	13
FIG.4 : FERMENTATION DE LA LEVURE MERE	14
FIG.5 : FERMENTATION COMMERCIALE	15
FIG.6 : EMBALLAGE ET STOCKAGE DE LA LEVURE	17
FIG.7 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT.....	20
FIG.8 : ECHANGEUR A FAISCEAUX TUBULAIRES	20
FIG.9 : ECHANGEUR COAXIAL.....	21
FIG.10 : ECHANGEUR A TUBES AILETTES.....	21
FIG.11 : ECHANGEUR A PLAQUES ET JOINTS	22
FIG.12 : VARIATION DE TEMPERATURE DES FLUIDES.....	26
FIG.13 : PRINCIPE GENERAL	31
FIG.14 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	31
FIG.15 : VUE 3D DES PLAQUES	31
FIG.16 : TABLEAU DES RELEVES DE TEMPERATURES	33

Introduction générale

Dans le cadre de la troisième année à la FST, les étudiants sont amenés à réaliser un projet de fin d'étude. On a eu l'opportunité d'effectuer ce projet dans une entreprise multinationale en l'occurrence LESAFFRE.

Contexte du projet :

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, etc.

Parmi les appareils de transmission d'énergie, nous citons les échangeurs de chaleur à plaques qui font la base de notre travail. Ces appareils sont destinés à refroidir le fluide géothermique sortant avec une température élevée en utilisant de l'eau froide d'où la nécessité de réaliser un bilan thermique à ce dispositif.

Ce rapport est composé de quatre grandes parties :

- Une brève présentation de l'organisme d'accueil « LESAFFRE MAROC », ainsi qu'une vision générale sur le processus de fabrication de la levure.
- Une description générale sur les échangeurs ainsi que des rappels théoriques.
- Une étude thermique de l'échangeur Alfa Laval.
- Une conclusion.

CHAPITRE I :

Présentation de la société et le processus de fabrication de la levure

I. Présentation de la société

1. Présentation de LESAFFRE group

Les industries de production agro-alimentaires apparentées en biotechnologie dont la fabrication de la levure boulangère en fait partie, détient une place importante.

- Trois appartenant à la SOMADIR (à Casablanca et à El-Jadida).
- Une unité de LESAFFRE (à Fès).

LESAFFRE Group, est le leader mondial dans le domaine de la levure, de planification et des extraits de levure, présent dans plus de 170 pays.

L'hirondelle Symbole de proximité et de fidélité, est l'emblème fédérateur du groupe LESAFFRE à travers le monde. Son siège est situé au quartier industriel SIDI BRAHIM à Fès. L'entreprise compte, en plus du site de production à Fès, un Baking Center à Casablanca. Celui-ci constitue une vitrine des produits LESAFFRE où les boulangers peuvent suivre des formations et voir des démonstrations afin de consolider leurs connaissances et améliorer leur savoir-faire.



Figure 1 : logo de la société

La politique commerciale de la société LESAFFRE se base sur la qualité. Bénéficiant de l'expertise et du savoir-faire du groupe LESAFFRE, LESAFFRE Maroc possède un laboratoire d'analyse qui effectue chaque jour de nombreux tests physico-chimiques et bactériologiques. La qualité des levures est ainsi sans cesse évaluée afin d'optimiser leur performance : force fermentative, pureté, stabilité et résistance par rapport au contexte climatique.

L'entreprise bénéficie d'une reconnaissance à l'échelle mondiale puisqu'elle a reçu deux trophées :

- Le trophée du prestige arabe en 1984 à Barcelone.
- Le trophée international de la qualité en 1985 à Madrid.

2. Historique

1853 : Louis LESAFFRE-Roussel et Louis Bonduelle-Dalle créent une distillerie d'alcool de grains et genièvre à Marquette-lez-Lille.

1863 : Acquisition du premier moulin à Marcq-en-Barœul. C'est à partir de ce site que se développera la société industrielle LESAFRE.

1895 : Naissance de la marque de levure l'hirondelle. Une hirondelle dont le dessin va évoluer au fil du temps, jusqu'à devenir l'emblème du groupe en 2003.

1923 : Crise de l'alcool de grains dont l'état français décide brutalement d'abaisser le prix, ce qui rend sa production économiquement impossible. Il faut trouver d'urgence une nouvelle matière première pour la levure. Ce sera la mélasse, moyennant quelques aménagements techniques.

1974 : LESAFFRE crée son premier Baking center.

1993-1998: Associations et acquisitions en Australie, Chili et Europe de l'Est.

2001 : Création de LESAFFRE International et acquisition de la société américaine Red Star Yeast&Products.

2003-2004 : Première Coupe Louis LESAFFRE, sélection pour la Coupe du monde de la Boulangerie.

2006 : Joint-venture avec Donta, leader chinois dans le domaine des extraits de levure. Construction d'une nouvelle levurière haute technologie à Orizaba au Mexique.

2007 : Construction d'une usine en Iowa, construction d'une unité de production en Chine et acquisition des activités levure de Gilde (Amérique du sud, Royaume uni,...)

2008 : LESAFFRE, partenaire de Futurol, projet R&D de bioéthanol de deuxième génération.

2009 : Acquisition de la société allemande Asmussen GmbH et CokG.

2010 : Inauguration d'une usine de levure et d'extraits de levure à Laibin dans le Guangxi en Chine et mise en service d'une usine d'extraits de levure à Cedar Rapids (Iowa) aux Etats-Unis.

3. LESAFFRE en quelques chiffres

- Un groupe créé en 1853 et détenu par la famille LESAFFRE.
- 1^{er} fabricant mondial de levure.
- Environ 1,3 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2010.
- 7000 collaborateurs.
- 35 sites de production

4. Organigramme de la société

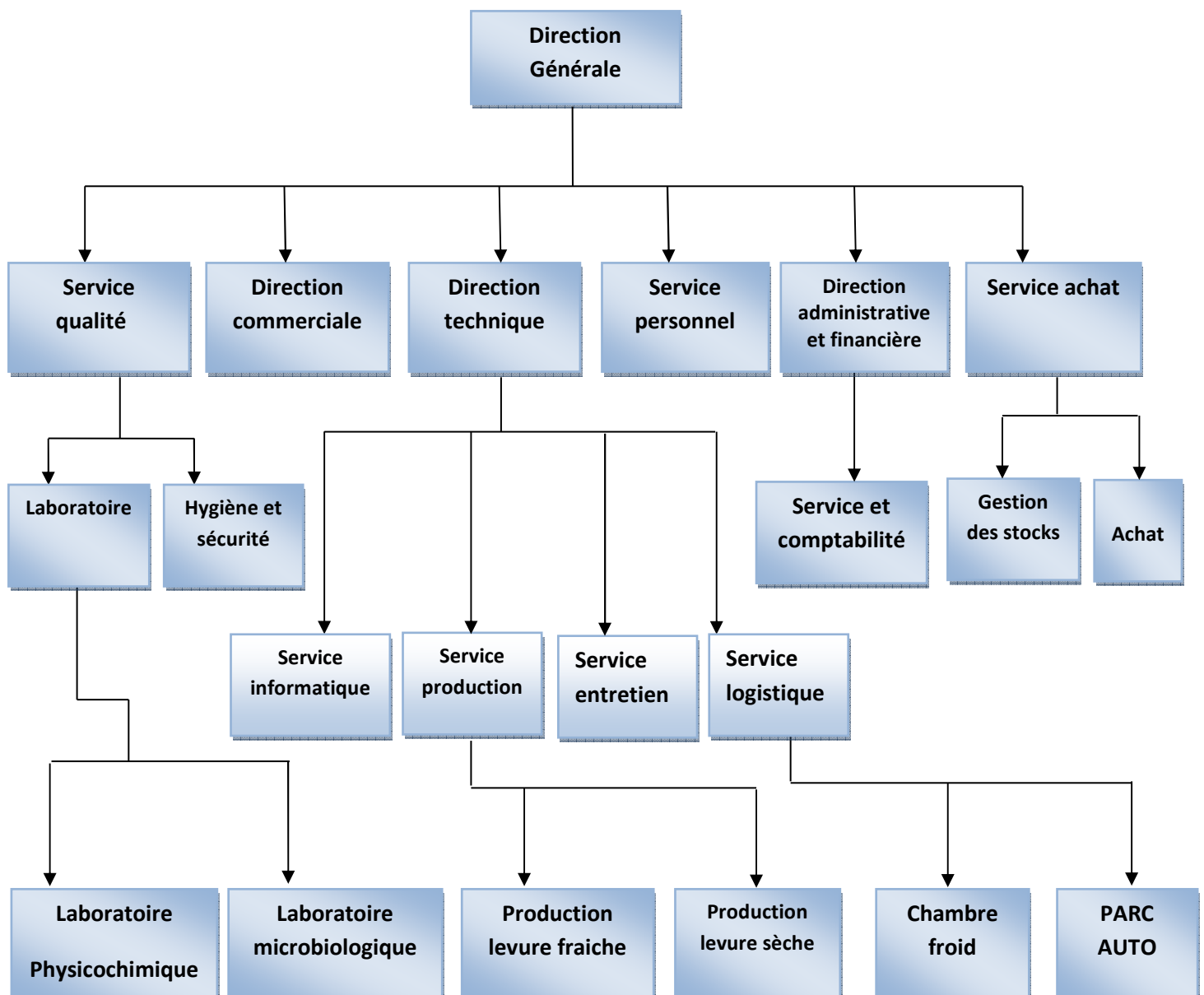


Figure 2 : Organigramme de la société LESAFFRE FES

II. Processus de la fabrication

1. Définition de la levure

Une levure est un champignon unicellulaire apte à provoquer la fermentation des matières organiques animales ou végétales. Les levures sont employées pour la fabrication du vin, de la bière, des alcools industriels, des pâtes levées et d'antibiotiques.

Tout comme celles de l'homme, les cellules de levures sont vivantes et naturelles. Elles ont besoin d'air pour se multiplier, mais l'absence d'air n'est pas non plus sans conséquence sur son développement.

2. La cellule de la levure

- **La paroi cellulaire** : c'est la véritable peau de la cellule.
- **La membrane cellulaire** : elle a pour rôle de réguler les échanges avec l'extérieur. Nourrir absorber, alcool et gaz carbonique rejetés. Elle veille à la bonne quantité d'eau contenue dans la cellule
- **Le cytoplasme** : partie vivante de la cellule qui contient un noyau qui est le « siège » des chromosomes de reproduction et un ou plusieurs vacuoles qui contiennent les cellules nutritives de la cellule.

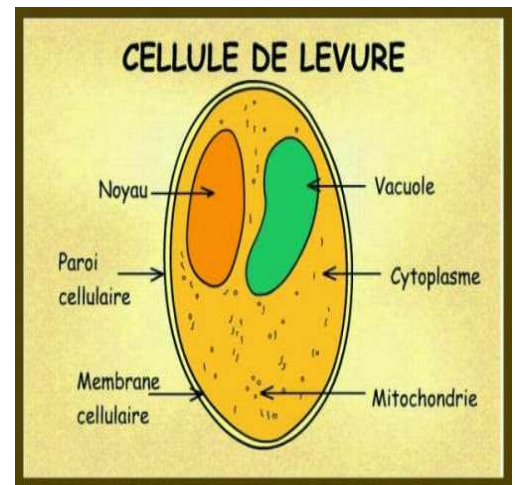


Figure 3 : cellule de la levure

3. Les différentes étapes de la fabrication de la levure

Dans une levurière, on utilise la fermentation aérobie¹ de la levure, la multiplication se fait par bourgeonnement². La durée totale du dédoublement de la cellule est d'au moins 1h30, avec production simultanée d'alcool, dans les conditions d'alimentation contrôlée.

¹Fermentation aérobie : c'est une réaction biochimique de conversion de l'énergie chimique contenue dans une source de carbone en une autre forme d'énergie directement utilisable par la cellule en l'absence de dioxygène.

²bourgeonnement : mode de multiplication des levures.

❖ Préparation du milieu de culture :

La mélasse³, l'urée, le sulfate d'ammonium et le mono ammonium phosphate se sont des éléments essentiels dont la levure besoin au cours de sa fermentation.

- Préparation de la mélasse : la mélasse présente pour la levure une source de carbone sa préparation (75% betterave + 25% canne) consiste à une dilution, décantation, stérilisation et clarification.
- Préparation de l'urée, sulfate d'ammonium et le mono ammonium phosphate : ses sels nutritifs offre pour les levures les sources d'azote et du phosphate et leurs préparations comprend seulement une dilution jusqu'à l'obtention du brix voulu.

Après la préparation, chaque élément sera stocké dans une cuve, en attendant sa consommation lors de la phase de fermentation.

❖ Fermentation successive pour obtenir la levure mère :

A partir de la souche pure reçue du laboratoire central, la levure est d'abordensemencée en tubes et ballons pour constituer l'inoculum⁴, source biologique de la production industrielle.

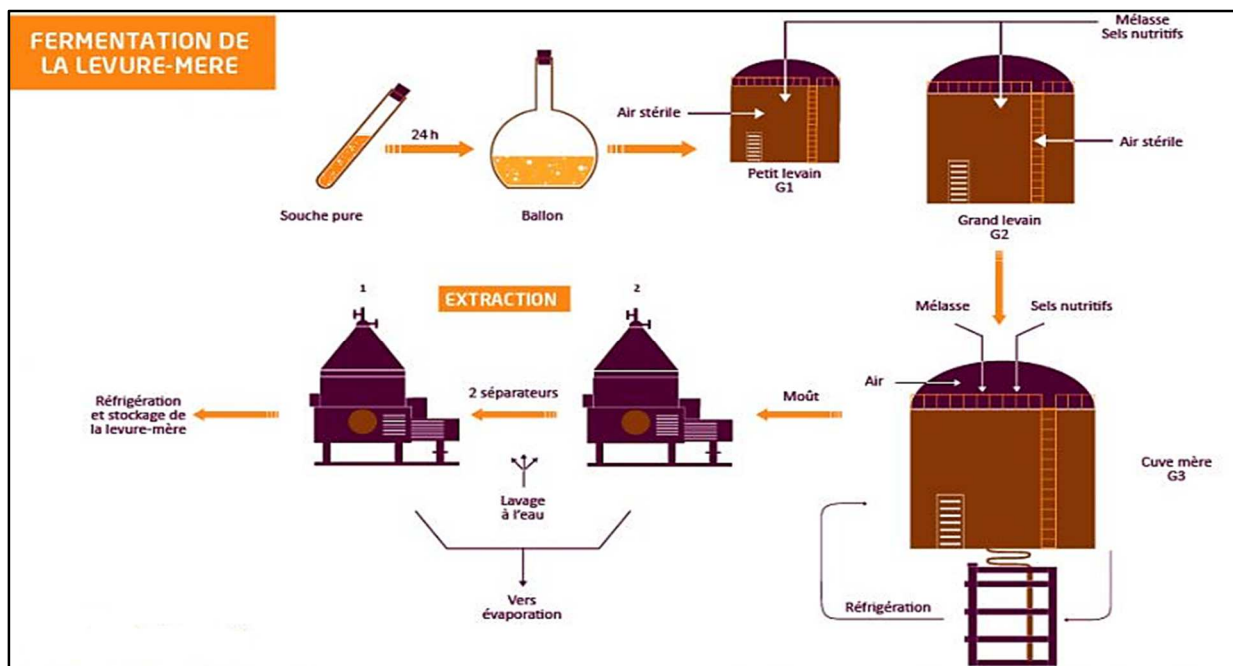


Figure 4 : Fermentation de la levure mère

³mélasse : résidu sirupeux de la cristallisation du sucre (mélasse de canne et de betterave).

⁴inoculum : Médecine Substance contenant les germes vivants, introduite ou destinée à l'être, en vue d'immuniser le sujet ou de le guérir.

L'inoculum est destiné à être propagé dans des cuves de tailles croissantes, depuis le tube à essais initial jusqu'à la phase finale en cuves géantes, il est appliqué à un contrôle strict de la pureté bactériologique et de l'hygiène des conditions de culture.

❖ **Séparation de la levure mère :**

En fin de fermentation par centrifugation, la levure est séparée des résidus de mélasse non fermentés (matières organiques et minérales) accumulés dans le fermenteur. Cette opération peut être répétée plusieurs fois, avec un lavage d'eau. La levure obtenue est la mère.

❖ **Fermentation pour l'obtention de la levure commerciale :**

Chaque cuve estensemencée par la levure-mère, avec des apports précis de mélasse, de sels nutritifs et d'air, et des contrôles stricts de température de l'alcool et de pH pour assurer le bon développement et le bon équilibre de la cellule. La fermentation commerciale dure environ 16 heures.

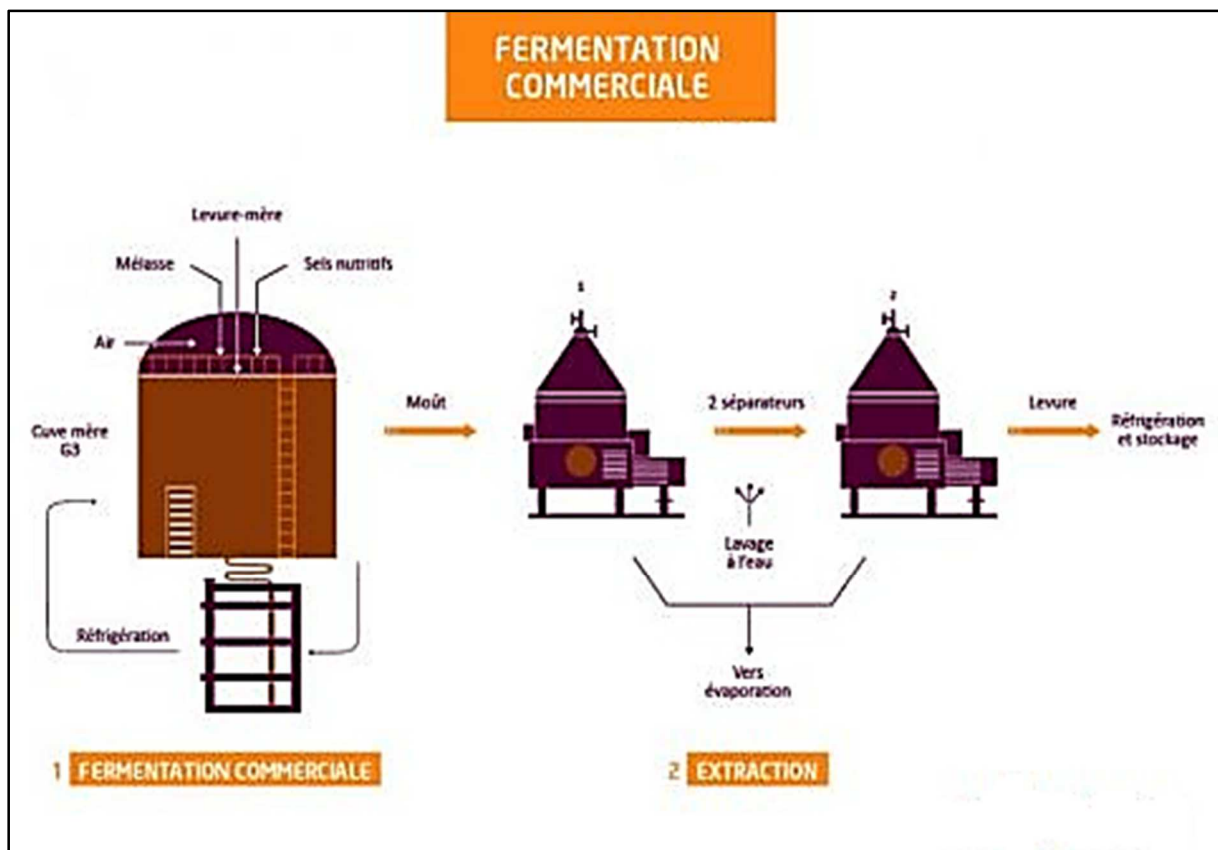


Figure 5 : Fermentation commerciale

Après 16 heures de fermentation, le contenu est refoulé vers la station de séparation.

❖ Séparation de la levure commerciale :

Cette station comporte trois lignes de séparation en parallèle, et au niveau de chaque ligne se trouvent deux séparateurs montés en série, le premier sépare le moût⁵ délevuré de la crème et le deuxième séparateur fini le travail en mélangeant la crème avec l'eau pour éliminer le maximum de moût délevuré et éclaircir sa couleur. La crème commerciale ainsi obtenue est stockée dans des cuves de garde à une température de 4°C.

La crème qui sort de chaque ligne de séparation est refroidit dans un échangeur de chaleur avant son stockage dans les cuves de garde.

❖ Stockage de la crème :

La crème obtenue après séparation est acidifiée par l'acide sulfurique à PH=2 pour éviter la contamination, puis stockée à 5°C pour ralentir le métabolisme cellulaire.

❖ Filtration :

Consiste à éliminer l'eau présentée dans la levure pour la préserver d'une éventuelle contamination.

La crème arrive au niveau d'un filtre rotatif qui contient une souche filtrante d'amidon⁶, dont le but de ne laisser pénétrer que l'eau.

La crème étalée sur la surface du filtre et ensuite récupérée.

❖ Séchage :

La levure sort du filtre à l'état pâteux et passe dans un mélangeur puis dans une grille percée de trous pour avoir une granulométrie bien déterminée. Donc, la levure granulée est récupérée dans des bols pour passer dans des séchoirs qui fonctionnent par l'envoi d'un courant d'air sec et chaud auparavant filtrer sur la levure granulée.

Il existe deux types de la levure sèche :

- **La levure sèche active ou S.P.H** : Sous forme de petits grains sphérique, sa durée de séchage est d'environ 4 H pour une quantité de 400Kg à 500Kg, et s'effectue à 45°C.
- **La levure sèche instantanée ou S.P.I** : Sous forme de bâtonnet, elle a une durée de séchage réduite, durant 20 minutes environ, pour une quantité de 1000Kg. Elle est caractérisée par une force fermentaire supérieure à celle de la S.P.H.

⁵moût : jus qui vient d'être extrait et n'a pas encore subit la fermentation alcoolique.

⁶amidon : un glucide complexe (polysaccharide) composé de chaînes de molécules de D-Glucose. Il s'agit d'une molécule de réserve pour les végétaux supérieurs et un constituant essentiel de l'alimentation humaine.

❖ Emballage :

Cette étape s'effectue grâce à une machine spécialisée composée de boudineuse, découpeuse et enveloppeuse.

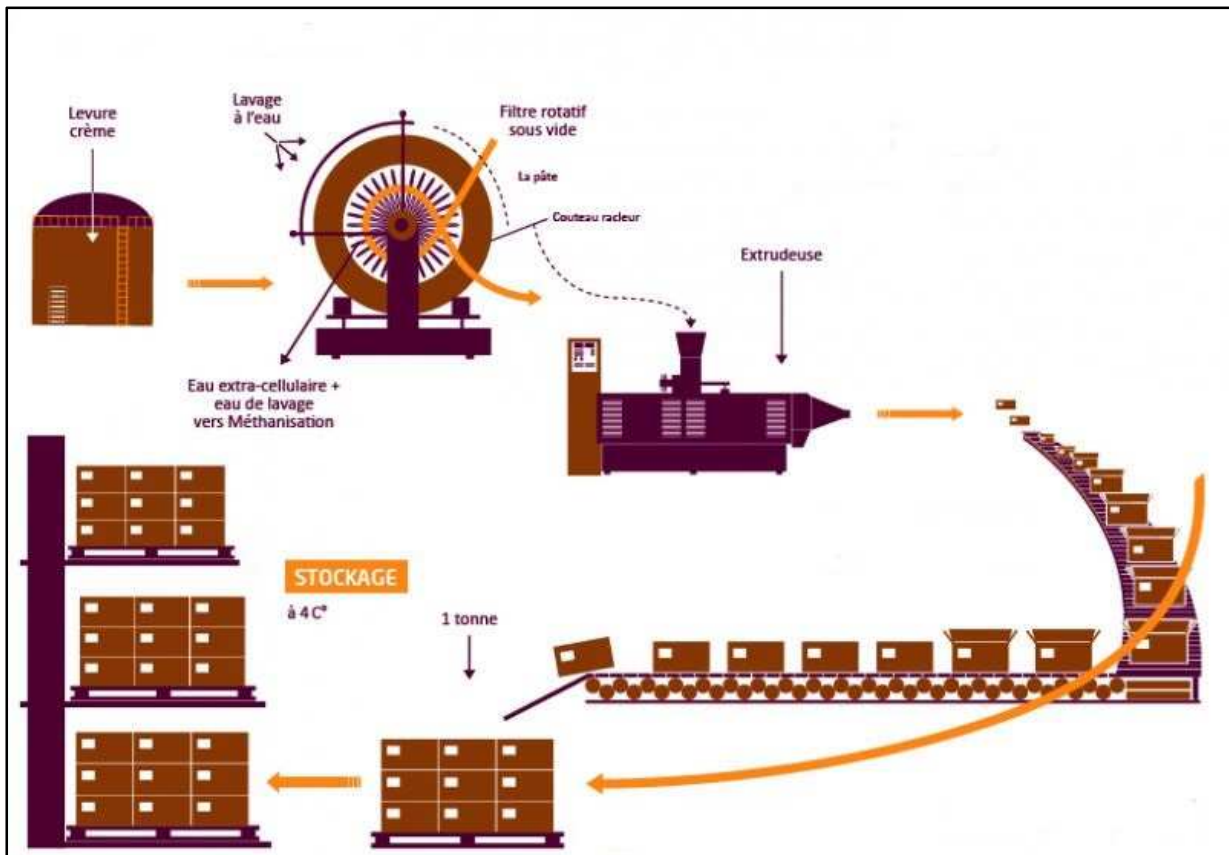


Figure 6 : emballage et stockage de la levure

- **Emballage de la levure fraîche :**

Quand la pâte de la levure fraîche passe par cette machine, on obtient en sortie un produit sous forme de paquets de poids net entre 497g et 513g, ceux-ci sont rangés dans des cartons qui sont automatiquement dirigés et déposés sur des palettes puis stockés dans une chambre froide.

- **Emballage de la levure sèche :**

Pour emballer de la levure sèche, elle passe dans un appareil d'emballage spécifique qui aspire l'air des paquets de poids net 250g pour une conservation à longue durée.

CHAPITRE II :

Généralités sur les échangeurs de chaleur et l'étude thermique

I. 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 (90%) 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. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : 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 des procédés.

1. Qu'est qu'un échangeur thermique ?

Un échangeur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique entre deux fluides, habituellement séparés par une paroi solide.

2. Les modes de transfert

L'échange de chaleur qui se produit entre 2 corps qui sont à des températures différentes peut se faire selon 3 modes :

- **CONDUCTION** : la chaleur se propage de proche en proche à travers la matière sans qu'il n'ait de transfert de cette dernière. La conduction assure un bon transfert de chaleur à travers les solides.
- **CONVECTION** : dans un fluide les différences de température produisent des différences de densité pouvant amener à des mouvements de la matière dits mouvements de convection
- **RAYONNEMENT** : Les corps émettent de l'énergie par leur surface sous forme des radiations. C'est un moyen qui n'a pas besoin de support matériel, on le rencontre donc dans le vide. Tous les corps transparents permettent à la chaleur de se propager ainsi.

3. Principe général

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduites qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur (en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid) comme montré ci-dessous :

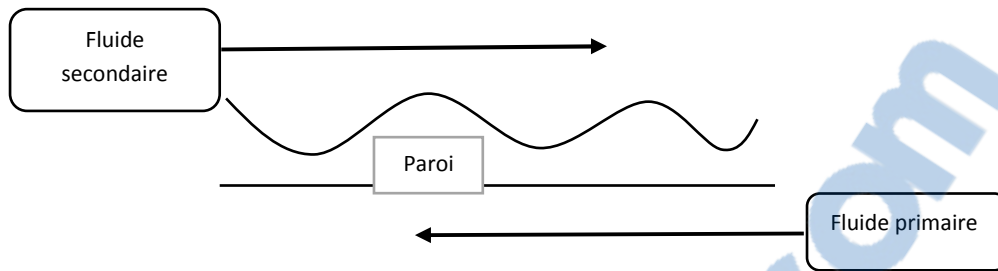


Figure 7 : principe général du fonctionnement

Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. On vient de le dire, la quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe.

Les flux de chaleur transférés vont aussi dépendre :

- Des températures d'entrée.
- Des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique).
- Des coefficients d'échange par convection.

II. Les types d'échangeurs de chaleur

1. Les échangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée.

1.1. Les échangeurs à faisceaux tubulaires

Type : liquide-liquide.

Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique.

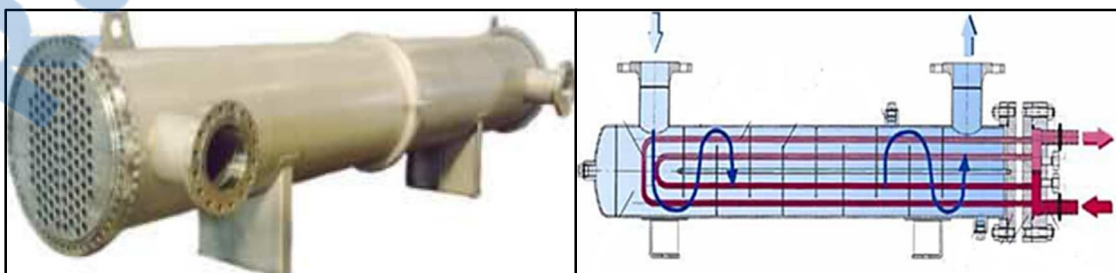


Figure 8 : échangeur à faisceaux tubulaires

1.2. Les échangeurs coaxiaux

Type : liquide-liquide.

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

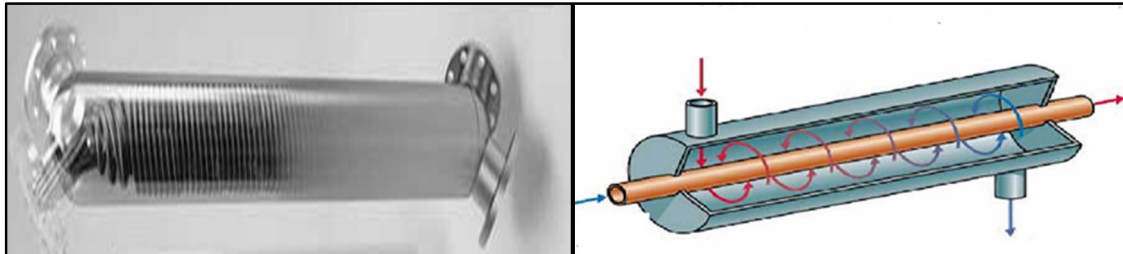


Figure 9 : échangeur coaxial

1.3. Les échangeurs multitubulaires

- Echangeur à tubes ailettes :

Type : Gaz-liquide.

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

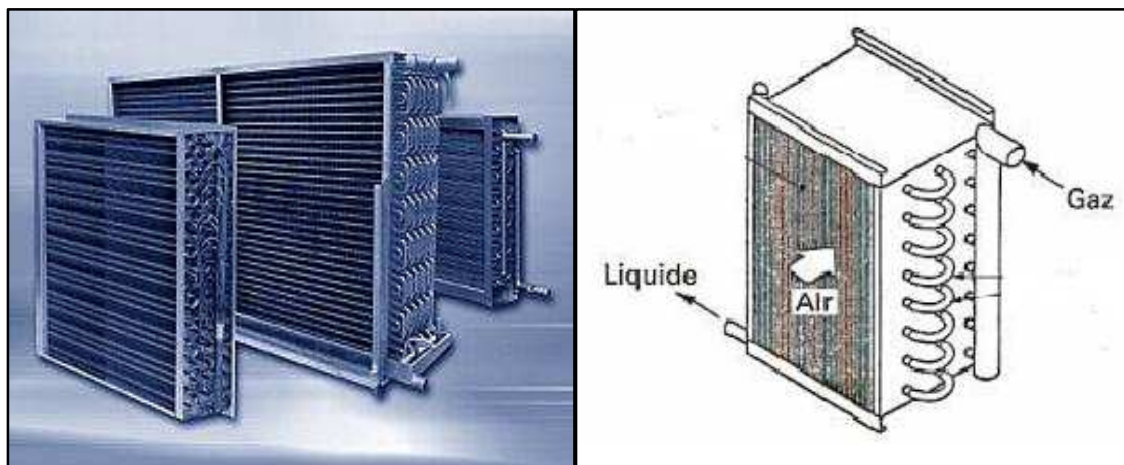


Figure 10 : échangeur à tubes ailettes

Les avantages des échangeurs tubulaires :

- Economique.
- Accepte des grands écarts de température.

Les inconvénients :

- Difficulté de nettoyage.
- Sensible aux vibrations.
- Dimensionnement complexe (échangeur à tubes ailettes).

2. Les échangeurs à plaques et joints

Type : Liquide-liquide/gaz-liquide.

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

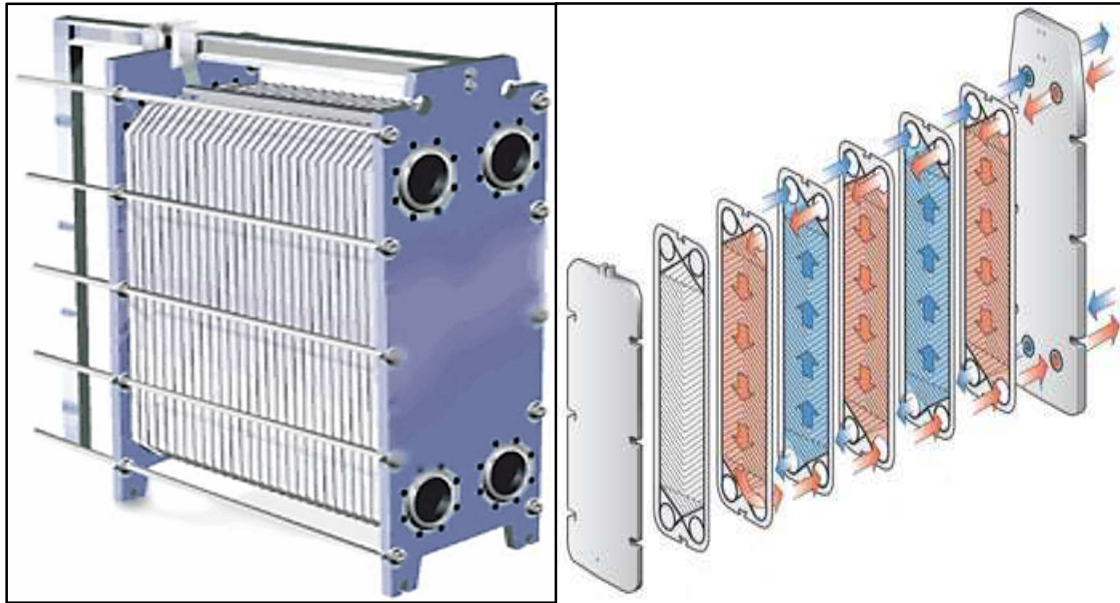


Figure 11 : échangeur à plaques et joints

Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. A noter que l'utilisation de joints en matière organique réduit la gamme de température de fonctionnement.

Les avantages des échangeurs à plaques :

- Simplicité/Moins coûteux.
- Facilité de l'adaptation.
- Limite des pertes thermiques.
- Turbulence.

Les inconvénients :

- Pertes de charge.



III. Etude thermique d'un échangeur

1. Les résistances thermiques

Entre deux domaines respectivement à la température T_1 et T_2 , le flux Φ transitant dans un tube est égal à $\frac{T_1 - T_2}{R}$ d'où R est la résistance entre ces deux domaines.

- **En convection** : pour une surface dS , la résistance thermique s'écrit sous la forme $\frac{1}{h \cdot dS}$.
- **En conduction** : la résistance thermique entre deux plans parallèles de surface dS est égal à $\frac{e}{\lambda \cdot dS}$. Dans le cas d'un tube de longueur dL et de rayon extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance thermique s'écrit sous la forme $\frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot dL} \ln \frac{r_2}{r_1}$.

Dans les échangeurs le transfert ne s'effectue que par convection et conduction (le transfert par rayonnement est négligeable). Les différentes résistances étant en série, il suffit de les additionner.

Par exemple : pour une plaque plane (épaisseur e , conductivité λ) séparant deux fluides 1 et 2 dont les coefficients d'échange superficiels sont respectivement h_1 et h_2 , la résistance mise en jeu par une surface dS est alors :

$$dR_T = \frac{1}{dS} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)$$

Pour un tube de longueur dL , de rayon extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance devient :

$$dR_T = \frac{1}{2\pi \cdot dL} \left(\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_2 r_2} \right)$$

Remarque :

- Pour des raisons de commodité, on utilise souvent pour les problèmes plans la conductance surfacique (inverse de la résistance) :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

De même pour les tubes, la conductance linéique est sous la forme :

$$K = 2\pi \frac{1}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

- Si la plaque ou le tube est constitué de plusieurs matériaux, il suffit d'additionner toutes les résistances de ces matériaux.

2. Bilan thermique

❖ Définition

Le but d'un bilan thermique est de déterminer les échanges thermiques qui ont eu lieu dans l'échangeur, afin d'améliorer sa performances, ou de les calculer pour assurer certains impératifs.

❖ Ecriture du bilan thermique

- Bilan thermique simple :

Ce type de bilan peut être utilisé pour la plupart des procédés. Dans notre cas on a deux fluides qui circulent sans être en contact.

Les fluides froid et chaud sont respectivement définis par les grandeurs suivantes : débits massiques ($\dot{m}$ et $\dot{m}'$), chaleurs massiques moyennes (C_p et C_p'), températures d'entrée (T_e et T_e') et de sortie (T_s et T_s').

On doit définir les flux de chaleur qui correspondent à des gains ou pertes d'énergie par unité de temps pour un fluide. Ce sont donc des puissances thermiques exprimées en W ou souvent encore en kJ.h^{-1} . Dans le cas le plus général le flux de chaleur s'écrit comme la somme d'un terme dû à une variation de température, on écrit pour chaque fluide les puissances thermiques (appelées aussi « flux de chaleur ») respectivement perdu par le fluide chaud et gagné par le fluide froid :

- Pour le fluide chaud : $\Phi_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{cs} - T_{ce})$
- Pour le fluide froid : $\Phi_f = \dot{m}_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_{fs} - T_{fe})$

On doit bien remarquer que les différences de température s'expriment entre la température de sortie et la température d'entrée pour un procédé continu (entre la température finale et la température initiale pour un procédé discontinu).

Par application du principe de la conservation de l'énergie on écrit donc le bilan suivant:

$$\Phi_c + \Phi_f + \Phi_{\text{pertes}} = 0 \text{ (avec } \Phi_{\text{pertes}} < 0)$$

Dans le cas particulier où les pertes sont négligeables, le bilan devient :

$$\boxed{\Phi_c + \Phi_f = 0}$$

Remarque :

- Il y a toujours des pertes, mais si les transferts entre les corps froid et chaud sont suffisamment rapides, alors, les pertes n'auront pas le temps de prendre de l'importance.

3. Rendement de l'échangeur

Le rendement est une notion très utile qui sert à caractériser la qualité d'un échangeur. Lorsqu'on cherche à transférer de l'énergie d'un fluide vers un autre fluide, l'échangeur idéal est celui qui permet l'échange maximal.

Le rendement d'un échangeur est alors définie par :

$$\eta = \frac{\text{Puissance pratiquement échangée}}{\text{Puissance theoriquement échangée}} = \frac{P_{\text{réel}}}{P_{\text{Idéal}}}$$

4. Dimensionnement de l'échangeur

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges.

La puissance d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante :

$$\Phi = K.S.\Delta T_m \quad (1)$$

Avec :

K : le coefficient de transmission thermique surfacique *moyen* (en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

S : la surface d'échange (en m^2).

ΔT_m : représente la différence de température *moyenne* entre les deux fluides, dans une section donnée de l'échangeur (en $^\circ C$).

Remarque :

- On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de K et de ΔT_m dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient K varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.

❖ Théorie de l'échangeur

L'approche théorie est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

- ✓ Vitesse constante en tout point du fluide ;
- ✓ Coefficient d'échange K constant ;
- ✓ Température du fluide est en fonction uniquement de x (isotherme perpendiculaire à l'axe des x) ;
- ✓ Conduction négligeable dans le fluide ;
- ✓ Caractéristiques thermo physiques (λ) et des échanges (h_1 et h_2) constantes ;
- ✓ Caractéristiques du fluide (C et ρ) constantes ;
- ✓ Température d'entrée du fluide connue.

L'équation (1) peut ainsi s'écrire :

$$\Phi = K.S.\Delta T_m = \dot{m}_c.Cp_c.dT_c = \dot{m}_f.Cp_f.dT_f$$

Avec :

$\dot{m}$: le débit massique (kg/h).

Cp : la chaleur spécifique (Kcal/kg. °C).

dT : La différence de température (°C).

La résolution de cette équation dépend du type d'échangeur considéré ; dans notre étude on s'intéresse aux échangeurs à courants parallèles.

❖ Echangeurs à courants parallèles

❖ Principe de fonctionnement

Dans ce cas les deux fluides circulent parallèlement dans le même sens (co-courant) ou dans le sens contraire (contre-courant). La variation de température des fluides est alors différente.

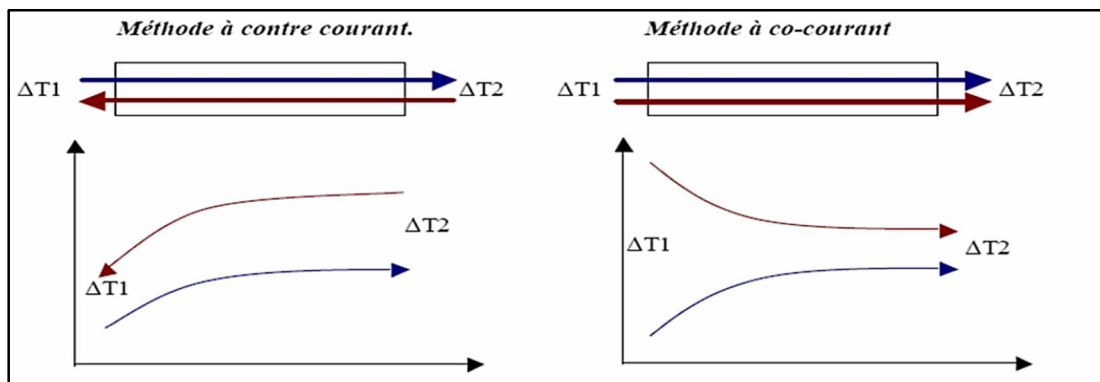


Figure 12 : variation de température des fluides

Dans ces deux configurations, il est possible en faisant un bilan thermique sur une tranche élémentaire, puis en intégrant sur toute la longueur de l'échangeur, de calculer l'écart de température moyen entre les fluides chaud et froid. On trouve ainsi :

$$d\Phi = K.dS.\Delta T_{Lm}$$

On appelle ΔT_{Lm} l'écart logarithmique moyen et on le note DTLM.

❖ Méthode de différence de température logarithmique moyenne (DTLM)

Hypothèse : échangeur sans pertes, c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid.

Dans ces conditions, le flux de chaleur $d\Phi$ transmis du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément dS s'écrit :

$$d\Phi = -\dot{m}_c.Cp_c.dT_c = \pm \dot{m}_f.Cp_f.dT_f$$

Avec :

$-\dot{m}_c.Cp_c.dT_c$: le flux cédé par le fluide chaud.

$\pm \dot{m}_f.Cp_f.dT_f$: le flux gagné par le fluide froid ((-) pour un écoulement à contre-courant et (+) pour un écoulement à co-courant).

Le bilan thermique s'écrit :

$$d\Phi = K.dS.(T_c - T_f) = -\dot{m}_c.Cp_c.dT_c = \pm \dot{m}_f.Cp_f.dT_f$$

En exprimant, à partir des 2 deuxièmes termes, l'écart de température on obtient :

$$\begin{aligned} dT_c - dT_f &= \frac{1}{-\dot{m}_c.Cp_c} + \frac{1}{\pm \dot{m}_f.Cp_f} \times d\Phi \\ &= \frac{1}{-\dot{m}_c.Cp_c} + \frac{1}{\pm \dot{m}_f.Cp_f} \times K \times dS \times (T_c - T_f) \\ \Rightarrow \frac{dT_c - dT_f}{T_c - T_f} &= \frac{1}{-\dot{m}_c.Cp_c} + \frac{1}{\pm \dot{m}_f.Cp_f} \times K \times dS \end{aligned}$$

En intégrant l'équation on trouve :

$$[\ln(T_c - T_f)]_a^b = \frac{1}{-\dot{m}_c.Cp_c} + \frac{1}{\pm \dot{m}_f.Cp_f} \times K \times [dS]_{S=0}^{S_T}$$

Avec : a correspond à $S=0$ et b correspond à $S=S_T$

En posant : $A = \frac{1}{-\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} + \frac{1}{\pm \dot{m}_f \cdot C_{p_f}}$

On obtient :

$$[\ln(\Delta T)]_a^b = A \times K \times [dS]_{S=0}^{S_T}$$

$$\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} = A \times K \times S_T$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{K \cdot S_T} \ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}$$

Le flux échangé pour l'élément dS s'écrivait :

$$\begin{aligned} d\Phi &= - \frac{d(T_c - T_f)}{A} \\ &= \frac{1}{A} (\Delta T_a - \Delta T_b) \end{aligned}$$

En remplaçant A par sa valeur on obtient le flux total échangé :

$$\Phi = K \times S_T \times \frac{(\Delta T_a - \Delta T_b)}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} = K \times S_T \times \Delta T_{Lm}$$

$\Delta T_{Lm} = \frac{(\Delta T_a - \Delta T_b)}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}}$ est la moyenne logarithmique des températures (en °C).

La relation s'applique aussi bien à un échangeur à contre-courant qu'à un échangeur à co-courant, mais les expressions de ΔT_a et ΔT_b ne sont pas identiques :

<u>Co-courant</u>	<u>Contre-courant</u>
$\Delta T_b = T_{ce} - T_{fe}$	$\Delta T_b = T_{ce} - T_{fs}$
$\Delta T_a = T_{cs} - T_{fs}$	$\Delta T_a = T_{cs} - T_{fe}$

Chapitre III :

Elaboration du projet

I. Problématique

La levure vit dans un milieu de température entre 32°C et 37°C. Au cours de sa multiplication elle exerce une réaction exothermique c'est-à-dire, elle cède de la chaleur ce qui cause la mort de la cellule d'où la nécessité d'un échangeur qui garantit le milieu de température convenable à cette dernière.

Notre travail consiste à faire une étude thermique de l'échangeur Alfa Laval et assurer sa bonne performance afin d'établir un bilan énergétique de ce dernier.

II. Etude de la problématique

— Schéma

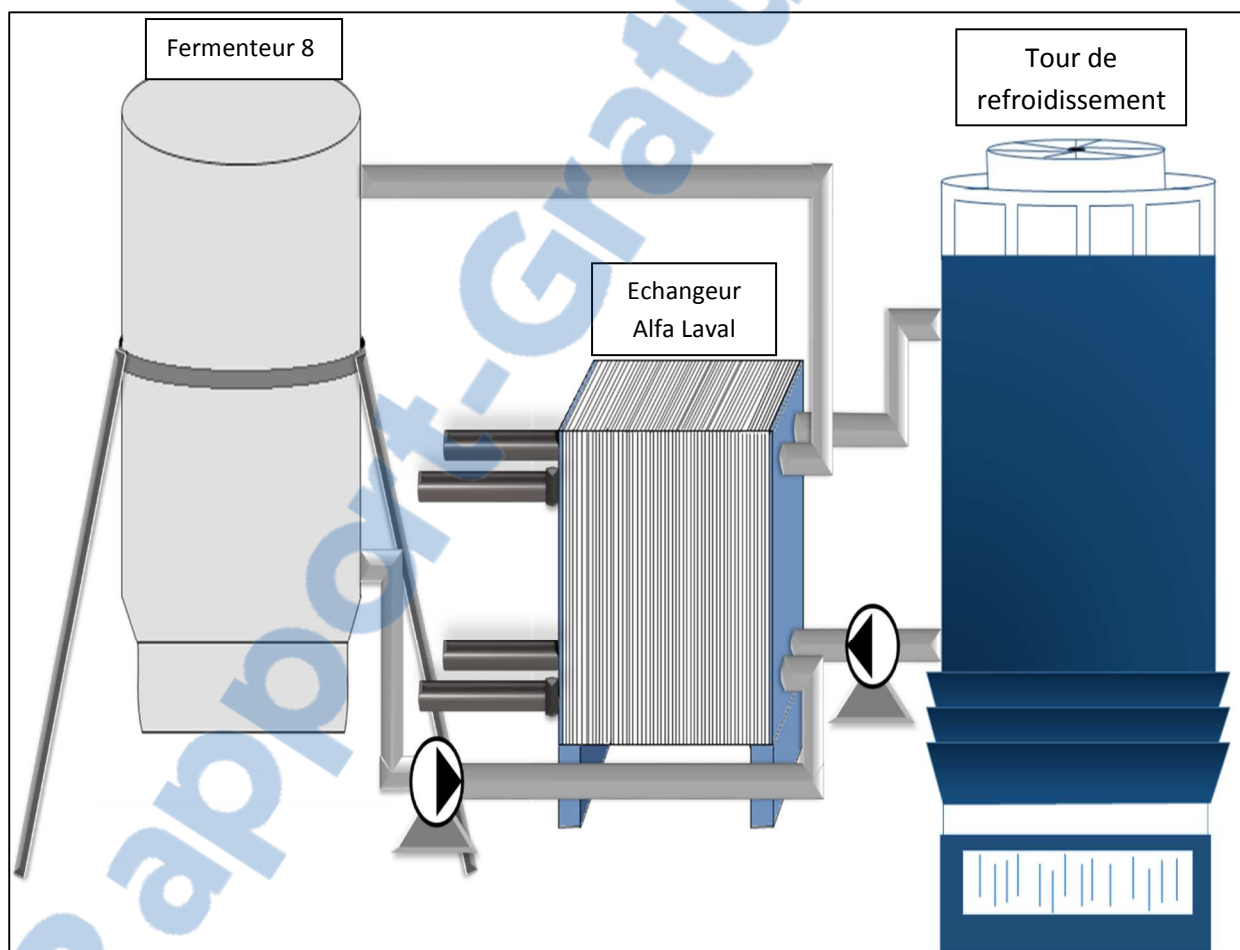


Figure 13 : principe général

– Principe de fonctionnement

Après la pré-fermentation (séparation de la levure mère) on obtient un moût dont 40 tonnes va être stocké dans le fermenteur F8. Au cours de la fermentation on observe l'augmentation de la température due au dégagement de la chaleur, ce qui nécessite le refroidissement du moût par son passage dans l'échangeur à plaques à contre-courant à l'aide de l'eau provenant des tours de refroidissement.

L'eau de la RADEEF stockée dans un grand réservoir de volume de 300 m³ sera refoulée à l'aide d'une pompe centrifuge vers la station de traitement d'eau pour devenir eau osmosée⁶, afin d'être envoyé au tour de refroidissement. L'eau froide sera refoulée vers l'échangeur qu'on va lui réaliser une étude thermique par la suite.

III. Etude thermique

L'échangeur thermique à plaques comme on l'a déjà cité se compose d'une série de plaques métalliques profilées présentant des orifices destinés au passage de deux fluides entre lesquels le transfert de chaleur va s'effectuer.

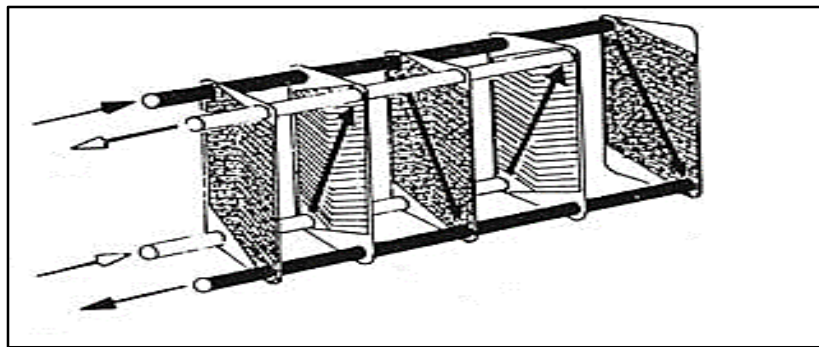


Figure 14 : principe de fonctionnement

Les plaques sont positionnées dans un bâti comprenant une partie fixe et un plateau de serrage mobile et sont comprimées au moyen de tirants latéraux.

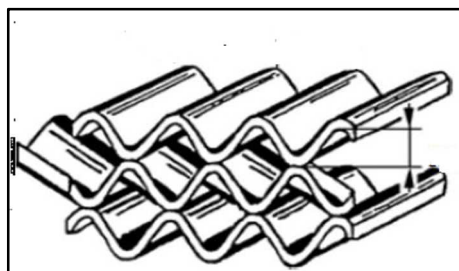


Figure 15 : vue 3D des plaques

⁶osmose : phénomène de diffusion entre deux liquides ou deux solutions séparées par une membrane semi-perméable laissant passer le solvant mais non la substance dissoute.

❖ Dimensionnement de l'échangeur :

Les données connus pour cet échangeur sont :

- Le débit massique du fluide chaud.
- Les températures d'entrée et de sorties des deux fluides.
- Les chaleurs calorifiques.
- Le coefficient d'échange global.
- Le nombre de plaques.

L'objectif consiste alors à déterminer :

- Le flux de chaleur dégagé par le moût.
- La surface d'échange requise.
- La puissance échangée.
- Le rendement.

1. Pratiquement

Pour déterminer le flux de chaleur échangé on a besoin des différences de température moyennes des deux fluides. Le tableau suivant regroupe les températures d'entrées et de sorties prélevées:

Jours	Température (en °C)			
	T_{ce}	T_{cs}	T_{fe}	T_{fs}
25-avr.	37,8	33,3	29	32,5
	37,2	32,7	28,5	32
	36	31,5	27,6	31,1
28-avr.	Nettoyage			
29-avr.	35,2	30,7	26	29,2
	35,1	30,6	26,6	30,1
	35,1	30,6	26,6	30,1
30-avr.	35,3	30,8	26,6	30,1
	36	31,5	26,7	30,2
	37,1	32,6	27,6	31,1
2-mai	37,3	32,8	27,2	30,7

	36,1	31,6	27,7	31,2
	35,1	30,6	26,8	32,3
5-mai	Nettoyage			
6-mai	36,1	31,6	26,6	30,1
	36,1	31,6	26,7	30,2
	36,1	31,6	26,6	30,1
8-mai	35,9	31,4	26,6	30,1
	35,9	31,4	26,7	30,2
	36	31,5	26,7	30,2
9-mai	36,1	31,6	26,6	30,1
	36	31,5	26,7	30,2
	36,2	31,7	25,1	30,2
12-mai	Nettoyage			
13-mai	36,5	32	27,6	31,1
	36,2	31,7	27,6	31,1
	36,1	31,6	27,7	31,2
14-mai	35,1	30,6	26,6	30,1
	35,4	30,9	27,1	30,6
	36	31,5	27,4	30,9
Moyenne	36,0	31,5	27,0	30,6

Figure 16 : tableau des relevés de températures

Interprétation : le moût entre à une température de 36°C et sort à la température 31,5°C ce qui donne $dT_1 = 4,5^\circ\text{C}$; or l'eau entre à la température 27°C et sort à 30,6°C d'où $dT_2 = 3,6^\circ\text{C}$.

— **Calcul des flux :**

Les données :

$$C_{p_c} = 0.85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} \quad ; \quad C_{p_f} = 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$\rho_1 = 1045 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad \rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$dT_1 = 4,5^\circ\text{C} \quad ; \quad dT_2 = 3,6^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Le débit massique du moût : $\dot{m}_c = \rho_1 \times Q_1 = 209000 \text{ kg/h}$
- Le flux de chaleur décipé par le moût est égal :

$$\Phi_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot \Delta T_1$$

A.N: $\Phi_c = 209000 \times 0.85 \times 4.5$

$$\Phi_c = 799425 \text{ kcal/h}$$

- Le débit massique de l'eau est :

On néglige les pertes thermiques $\implies \Phi_c = \Phi_f$

$$\Phi_f = \dot{m}_f \times C_{p_f} \times \Delta T_2 = \Phi_c$$

$$\implies \dot{m}_f = \frac{\Phi_c}{C_{p_f} \cdot \Delta T_2}$$

A.N: $\dot{m}_f = \frac{799425}{1 \times 3,6}$

$$\dot{m}_f = 222060 \text{ kg/h}$$

- Le flux reçu par l'eau est égal :

$$\Phi_f = \dot{m}_f \times C_{p_f} \times \Delta T_2$$

A.N: $\Phi_f = 222060 \times 1 \times 3,6$

$$\Phi_f = 799416 \text{ kcal/h}$$

- Le rendement est égal :

$$\eta = \frac{\text{flux reçu}}{\text{flux décipé}} \approx 100\% \text{ (Pertes négligées)}$$

Le flux cédé par le moût est égal au flux reçu par l'eau froide.

— **Dimensionnement de l'échangeur :**

Les données :

$$C_{p_c} = 0.85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} \quad ; \quad \dot{m}_c = 209000 \text{ kg/h}$$

$$\rho_1 = 1045 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad K = 400 \text{ KW/m}^2.^\circ\text{C}$$

$$dT_1 = 4,5^\circ\text{C} \quad ; \quad N = 563 \text{ plaques}$$

- Calcul du flux :

La relation du flux est donnée par : $\Phi_{\text{éch}} = K.S_T. \Delta T_{Lm}$

Or le flux échangé est le flux décipé par le moût ce qui donne :

$$d\Phi_{\text{éch}} = \dot{m}_c.C_{p_c}.dT_c = K.S_T. \Delta T_{Lm}$$

D'où on peut déduire la surface d'échange totale.

- Calcul de la température logarithmique moyenne :

$$\Delta T_{Lm} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Avec : $\Delta T_1 = T_{ec} - T_{sf}$ et $\Delta T_2 = T_{sc} - T_{ef}$

A.N: $\Delta T_1 = 5,4^\circ\text{C}$ et $\Delta T_2 = 4,5^\circ\text{C}$

D'où : $\Delta T_{lm} = 4,94^\circ\text{C}$

- Calcul de la surface d'échange totale :

On a : $\Phi_{\text{éch}} = K.S_T.\Delta T_{Lm}$

$$S_T = \frac{\Phi_{\text{éch}}}{K \times \Delta T_{Lm}}$$

Le flux échangé est calculé déjà : $\Phi_c = 799425 \text{ kcal/h} = 929731 \text{ KW}$

Donc la surface d'échange est :

A.N: $S_T = 470,51 \text{ m}^2$

La surface d'échange d'une seule plaque est :

$$S_p = \frac{S_T}{N}$$

A.N: $S_p = 0,84 \text{ m}^2$

- La puissance de l'échangeur est donnée par la relation :

$$P_{\text{éch}} = \frac{C_{p_c} \times m \times \Delta T_1}{\text{durée du cycle}} [\text{KW}]$$

$$C_{p_c} = 0,85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} = 3553 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

$$m = 40 \text{ Tonnes} = 40000 \text{ kg}$$

$$\text{Durée du cycle} = 1 \text{ heure} = 3600 \text{ secondes}$$

Donc la puissance de l'échangeur est :

A.N: $P_{\text{éch}} = 177,65 \text{ KW}$

Récapitulatif pratique: cette étude thermique nous a permis de déterminer les différents paramètres de l'échangeur qui sont :

$$\text{Le flux de chaleur : } \Phi_c = 799425 \text{ kcal/h}$$

$$\text{La surface d'échange totale : } S_T = 470,51 \text{ m}^2$$

$$\text{La puissance d'échange : } P_{\text{éch}} = 177.65 \text{ KW}$$

Pour assurer le bon fonctionnement de cet échangeur on va réaliser par la suite une étude théorique basée sur des températures moyennes données, qui vont nous permettre de calculer la puissance d'échange théorique afin d'établir le rendement de l'échangeur.

2. Théoriquement

Le moût entre dans l'échangeur à une température de 37°C et sort à la température 31°C ce qui donne $dT_1 = 6^\circ\text{C}$; or l'eau entre à la température 27°C et sort à 31°C d'où $dT_2 = 4^\circ\text{C}$.

— Calcul des flux :

Les données :

$$C_{p_c} = 0.85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} \quad ; \quad C_{p_f} = 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$\rho_1 = 1045 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad \rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$dT'_1 = 6^\circ\text{C} \quad ; \quad dT'_2 = 4^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Le débit massique du moût : $\dot{m}_c = \rho_1 \times Q_1 = 209000 \text{ kg/h}$
- Le flux de chaleur décipé par le moût est égal :

$$\Phi'_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot dT'_1$$

A.N: $\Phi'_c = 1,066.10^6 \text{ kcal/h}$

- Le débit massique de l'eau est :
- On néglige les pertes thermiques : $\Rightarrow \Phi'_c = \Phi'_f$

$$\Phi'_f = \dot{m}'_f \times C_{p_f} \times dT'_2 = \Phi'_c$$

$$\Rightarrow \dot{m}'_f = \frac{\Phi'_c}{C_{p_f} \times dT'_2}$$

A.N: $\dot{m}'_f = \frac{1,066 \times 10^6}{1 \times 4}$

$$\dot{m}'_f = 266500 \text{ kg/h}$$

- Le flux reçu par l'eau est égal :

$$\Phi'_f = \dot{m}'_f \times C_{p_f} \times dT'_2$$

A.N: $\Phi'_f = 266500 \times 1 \times 4$

$$\Phi'_f = 1,066.10^6 \text{ kcal/h}$$

– Dimensionnement de l'échangeur :

Les données :

$$C_{p_c} = 0.85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} \quad ; \quad \dot{m}_c = 209000 \text{ kg/h}$$

$$\rho_1 = 1045 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad K = 400 \text{ KW/m}^2.^\circ\text{C}$$

$$dT'_1 = 6^\circ\text{C} \quad ; \quad N = 563 \text{ plaques}$$

- Calcul du flux :

La relation du flux est donnée par : $\Phi'_{\text{éch}} = K.S'_T.\Delta T'_{\text{Lm}}$

Or le flux échangé est le flux décipé par le moût ce qui donne :

$$d\Phi'_{\text{éch}} = \dot{m}_c.C_{p_c}.dT'_c = K.S'_T.\Delta T'_{\text{Lm}}$$

D'où on peut déduire la surface d'échange totale.

- Calcul de la température logarithmique moyenne :

$$\Delta T'_{\text{Lm}} = \frac{(\Delta T'_2 - \Delta T'_1)}{\ln \frac{\Delta T'_2}{\Delta T'_1}}$$

Avec : $\Delta T'_1 = T_{\text{ec}} - T_{\text{sf}} \quad \text{et} \quad \Delta T'_2 = T_{\text{sc}} - T_{\text{ef}}$

A.N: $\Delta T'_1 = 6^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad \Delta T'_2 = 4^\circ\text{C}$

D'où : $\Delta T'_{\text{Lm}} = 4,93^\circ\text{C}$

- Calcul de la surface d'échange totale :

On a : $\Phi'_{\text{éch}} = K.S'_T.\Delta T'_{\text{Lm}}$

$$S'_T = \frac{\Phi'_{\text{éch}}}{K \times \Delta T'_{\text{Lm}}}$$

Le flux échangé est déjà calculé : $\Phi'_c = 1,066.10^6 \text{ kcal/h} = 1,24 \times 10^6 \text{ KW}$

Donc la surface d'échange est :

A.N: $S'_T = 519,27 \text{ m}^2$

La surface d'échange d'une seule plaque est :

$$S'_p = \frac{S_T}{N}$$

A.N: $S'_p = 0,92 \text{ m}^2$

- La puissance de l'échangeur est donnée par la relation :

$$P'_{\text{éch}} = \frac{C_{p_c} \times m \times dT'_1}{\text{durée du cycle}} [\text{KW}]$$

$$C_{p_c} = 0,85 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C} = 3553 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$$

$$m = 40 \text{ Tonnes} = 40000 \text{ kg}$$

$$\text{Durée du cycle} = 1 \text{ heure} = 3600 \text{ secondes}$$

Donc la puissance de l'échangeur est :

A.N: $P'_{\text{éch}} = 236,86 \text{ KW}$

- Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{\text{Puissance pratiquement échangée}}{\text{Puissance théoriquement échangée}} = \frac{P}{P'}$$

A.N: $\eta \approx 75\%$

Récapitulatif théorique: cette étude nous a permis de déterminer les différents paramètres de l'échangeur dans le cas idéal, qui nous ont servi par la suite à établir le rendement de cet échangeur.

➤ Interprétation :

Après avoir accompli les deux études pratique et théorique, on remarque que l'efficacité de l'échangeur est liée à certains paramètres qui influencent sur sa performance, et qui se résument comme suit :

- Le flux de chaleur
- Le débit des deux liquides à l'entrée de l'échangeur.
- Les pertes dues aux encrassements déposées sur la surface d'échange.
- L'efficacité des tours de refroidissement.

- Solutions proposées :

Action 1 : augmenter les débits des entrées des deux liquides.

Action 2 : nettoyer régulièrement l'échangeur ainsi que les plaques.

Action 3 : augmenter la surface d'échange par l'ajout de certains nombre de plaques qu'on va déterminer comme suit.

- Calcul de nombre de plaques à ajouter :

Pratiquement on a trouvé que la surface d'échange d'une seule plaque est :

$$S_p = 0,84 \text{ m}^2$$

Le nombre de plaques qu'on doit avoir pour cette surface d'échange est :

$$N = \frac{S'_T}{S_p}$$

A.N :

$$N' \approx 619$$

Avec :

S'_T : la surface d'échange totale obtenue théoriquement.

D'où :

$$N'' = N' - N$$

A.N :

$$N'' = 56 \text{ plaques}$$

Pour améliorer la performance de l'échangeur il faut ajouter 56 plaques pour s'adapter à la surface d'échange totale dans le cas idéal.

Action 4 : installer un échangeur à la sortie de la tour de refroidissement pour augmenter l'écart de température de l'eau froide, ce qui influence sur le flux de chaleur échangé.

Conclusion générale

Notre stage au sein de la société LESAFFRE a constitué une véritable expérience professionnelle qui nous a permis de bien connaître les détails du procédé de la fabrication de la levure.

En effet, on a présenté les solutions ci-dessous à opter pour atteindre les objectifs cités en cahier de charge :

- augmenter les débits des entrées des deux liquides
- nettoyer régulièrement l'échangeur ainsi que les plaques
- augmenter la surface d'échange par l'ajout de certains nombre de plaques
- installer un échangeur à la sortie de la tour de refroidissement pour augmenter l'écart de température de l'eau froide, ce qui influence sur le flux de chaleur échangé.

Enfin, on espère que nos propositions concernant l'amélioration de la consommation de l'énergie, soient bénéfiques pour assurer une bonne rentabilité des équipements énergétiques.

Références

- Cours échangeurs thermiques ; auteur E.Rouland.
- Cours transfert thermique ; auteur S.Houach (FST-Fès).
- J.F. SACADURA Initiation aux transferts thermiques - Technique et documentation – Paris.
- Document, Alfa Laval — technologie des plaques
- Cours LES ECHANGEURS DE CHALEUR ; auteur Pascal Tobaly.
- Cours BILAN THERMIQUE ; auteur PASCAL BIGOT.
- Cours LES ECHANGEURS DE CHALEUR ; auteur B. Bourret.
- Cours TRANSFERT THERMIQUE ; auteur Yves Jannot.
- <http://genie.industriel.iaa.free.fr>