



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE INDUSTRIEL



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur -
grade master

EXPERIMENTATION D'UNE COLONNE DE RECTIFICATION D'ALCOOL

Présenté par

NJATOARIVELO Tojonirina Alain

Directeur de mémoire

RANDRIAMORASATA Josoa Albert, Professeur

Date de soutenance : 08 aout 2015 à Vontovorona

Promotion 2014



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

MENTION GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL

PARCOURS GENIE INDUSTRIEL



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur -
grade master

EXPERIMENTATION D'UNE COLONNE DE RECTIFICATION D'ALCOOL

Présenté par :

NJATOARIVELO Tojonirina Alain

Membres de jury :

Président du Jury :

RAKOTOMANANA Charles Rodin, Enseignant
chercheur de l'E.S.P.A

Directeur de mémoire :

RANDRIAMORASATA Josoa Albert, Professeur

Les examinateurs :

ANDRIAMANALINA William, Enseignant
chercheur de l'E.S.P.A

RAKOTONINDRINA Tahiry, Enseignant chercheur
de l'E.S.P.A

RAVELOJAONA Johnson, Enseignant chercheur de
l'E.S.P.A

Promotion 2014

REMERCIEMENT

Je rends grâce à Dieu tout puissant pour son amour et sa bonté, de m'avoir donné la force et la santé durant la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Je tiens également à adresser les vifs remerciements aux personnes suivantes sans qui ce travail de mémoire n'aurait pas pu être réalisé :

- Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine, Directeur de l'E.S.P.A qui m'a autorisé la soutenance de ce mémoire ;
- RAKOTOMANANA Charles Rodin, responsable de la mention Génie mécanique et Industriel, qui a assumé sa responsabilité dans le bon fonctionnement des enseignements au sein du département ;
- RANDRIAMORASATA Josoa Albert, un grand professeur au sein du département, pour sa patience et ses directives pendant la réalisation de ce mémoire ; j'avoue que c'était un grand honneur pour moi de travailler avec vous ;
- les membres du jury,
 - ANDRIAMANALINA William, Enseignant chercheur de l'E.S.P.A
 - RAKOTONINDRINA Tahiry, Enseignant chercheur de l'E.S.P.A
 - RAVELOJAONA Johnson, Enseignant chercheur de l'E.S.P.A
- tous les enseignants de l'ESPA,
- La société ARTICOM pour tous les privilèges qu'elle nous a apporté pour la réalisation de cette ouvrage et à tous ses personnels de nous avoir aidé durant tout notre recherche ;
- nos chers parents et famille pour leurs soutiens tant moraux que matériel,
- nos collègues et amis à l'ESPA,
- tous les personnels du Bloc Technique de Vontovorona,
- A tous ceux qui ont contribué de près et de loin au bon accomplissement de ce mémoire.

Veillez trouver ici mes sincères remerciements

Table des matières

Introduction	1
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA DISTILLATION	2
I.1 Quelques définitions:.....	2
a) Distillation	2
b) Bouilleur	2
c) Condenseur	2
d) Reflux	3
e) La chaudière	4
I.2 Quelques rappels :.....	4
a) La chaleur latente de vaporisation.....	4
b) Vapeur saturée	4
c) Vapeur surchauffée	4
d) La courbe de la vapeur d'eau	5
I.3 Principe de la distillation :	7
CHAP. II : LA RECTIFICATION	8
II.1 Principe	8
a) Rectification continue.....	9
b) Rectification discontinue.....	10
CHAP. III. COLONNE DE RECTIFICATION	17
III.1 Les différents types de colonne.....	17
a) Colonnes à plateaux.....	17
b) Colonnes à garnissage	18
III.2 Comparaisons des colonnes à plateaux et à garnissages	21
CHAP. IV : TRANSFERT DE CHALEUR.....	22
IV.1 LA CONDUCTION.....	22
a) Définition	22
b) Flux de chaleur transmis par conduction.....	22
IV.2 CONVECTION	23
IV.3 LE RAYONNEMENT	26
Introduction	29
CHAP V : LES ELEMENTS DE CONCEPTIONS D'UNE UNITE DE DISTILLATION	30
V.1 Unité de chauffage ou chaudière.....	30
a) Définition	30

b) Réaction	30
c) Les combustibles	31
d) Caractéristique physiques des combustibles	31
e) Matériaux utilisés	32
V.2 Bouilleur	32
a) Dimensionnement	32
b) Matériaux utilisés	34
V.3 Condenseur	36
V.4 Colonne	38
CHAP VI : LES MATIERES PREMIERES DE LA DISTILLERIE ET LA FERMENTATION ALCOOLIQUE	41
VI.1 Les matières premières de la Distillerie	41
a) Matières sucrées	41
b) Matières amylacées	41
c) Matières cellulosiques	41
VI.2 La fermentation alcoolique	42
a) Objectif	42
b) Définitions	42
c) Levures	43
d) Conditionnement de la fermentation	43
VI.3 Appareil de mesure d'alcool	43
CHAP. VII : LA DISTILLATION	47
VII.1 Les étapes à suivre	47
VII.2 Résultat	48
VII.3 Problème rencontrés et solutions requises	48
VII.4 Rôle de l'alcool 90°GL sur le vin	50
a. Sur le plan organoleptique	50
b. Sur le plan biologique	50
c. Sur le plan commercial	50
d. Sur le plan écologique	51
VII.5 Table de dilution d'alcool ou table de Gay-Lussac	51
CHAP. VIII EVALUATIONS ECONOMIQUES	53
VIII.1 Devis de confection des appareils	53
a) Chaudière	53
b) Bouilleur	53
c) Condenseur	53

d) Colonne.....	54
e) Coût total des appareillages.....	54
VIII.2 Coût d'extraction.....	54
VIII.3 ETUDE DE FAISABILITE	54
a) Le cash-flow brut annuel	54
b) Rentabilité du projet	56
i. Le temps de remboursement ou POT (Pay Out Time)	56
ii. Rentabilité globale.....	56
iii. Le taux de rentabilité interne (TRI).....	56
CHAP. IX REGARD SUR L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL.....	61
IX.1 Introduction	61
a. Définition	61
b. Les éléments de l'environnement	61
IX.2 Les menaces à l'environnement	62
a) La pollution et menace de dégradation des eaux	62
b) La pollution de l'air.....	63
c) La pollution du sol et des eaux souterraines	63
d) La pollution sonores et nuisances.....	64
IX.3 Les normes relatives en vigueur sur l'environnement	64
a) Les normes dites d'organisation dont.....	64
b) Les normes mis en vigueur sur la qualité	66
c) Les normes de sécurité	66
IX.4 Les risques de dégradation de l'environnement causés par la ligne de production	66
IX.5 Les impacts économiques et sociaux.....	67

Liste des symboles

Abréviation	Signification
$^{\circ}\text{GL}$	Degré-Gay-Lussac
$\%$	Pourcent
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius
Ar	Ariary
Kg	Kilogramme
cal	Calorie
g	Gramme
KJ	kilojoule
Kcal	Kilocalorie
L	Litre
m^2	Mètre carré
mm^2	Millimètre carré
m^3	Mètre cube
mL	Millilitre
mn	Minute
t_{max}	température maximale
t_{min}	Température minimale
Φ	flux de chaleur
λ	conductivité thermique du corps cylindrique
Θ_1	température moyenne sur la paroi interne du cylindre
Θ_2	température moyenne sur paroi externe du cylindre
g/L	Gramme par litre
pH	Potentiel hydrogène
ρ_{liq}	masse volumique du liquide
mg/L	milligramme par litre
mmHg	Millimètre de mercure
m^3/Kmol	Mètre cube par kilomolaire
W	Watt
s	Seconde
τ	Taux de reflux

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
a	taux d'imposition sur les bénéfices
A	amortissement annuel constant
B	bénéfice bruts annuels
C.F	cash-flow
CA	Chiffre d'affaire
Cf.	confer
CNaPS	Caisse Nationale de Prévoyance Sociale
DDT	dichlorodiphényltrichloroéthane
DVP	duré de vie probable de l'appareil
EBE	excédent brut d'exploitation
HEPT	Hauteur équivalent des plateaux théoriques
I	investissement
i	intérêt
IBS	impôt sur les bénéfices
IGR	impôt générale sur les revenus
ISO	International organization for standardization
JIRAMA	jiro sy rano malagasy
L	longueur du cylindre
NET	Nombre d'étage théorique
P.O.Ps	pollutions organiques persistantes
PCB	byphényls polychlorés
POT	Pay Out Times
PPR	polypropylène
Re	rayon extérieur du cylindre
Ri	rayon intérieur du cylindre
SME	système de Management Environnemental
TRI	Taux de rentabilité interne
TVA	taxe sur les valeurs ajoutées
VAN	Valeur actuelle nette

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeur des fractions d'éthanol dans le liquide et le vapeur dans un mélange eau-éthanol à l'équilibre.....	7
Tableau 2: comparaison des colonnes à plateaux et à garnissages.....	21
Tableau 3: composition du bois combustible.....	31
Tableau 4: pouvoir calorifique.....	31
Tableau 5: Matériaux utilisés pour la chaudière.....	32
Tableau 6: Matériaux utilisés pour le bouilleur.....	34
Tableau 7: Manipulation pratiqué pour le bouilleur.....	34
Tableau 8: Matériaux utilisés pour le condenseur.....	36
Tableau 9: Manipulation pratiqué pour le condenseur.....	37
Tableau 10: Manipulation pratiqué pour la colonne.....	39
Tableau 11: Taux d'alcool en fonction du sucre ajouté.....	46
Tableau 12: Problèmes et solutions requises.....	48
Tableau 13: table de dilution d'alcool ou table de Gay Lussac.....	52
Tableau 14: devis chaudière.....	53
Tableau 15: devis bouilleur.....	53
Tableau 16: devis condenseur.....	53
Tableau 17: devis colonne.....	54
Tableau 18: coût total des appareillages.....	54
Tableau 19: devis du coût d'extraction.....	54
Tableau 20: Les différentes charges financières de l'exploitation.....	58
Tableau 21: T.V.A.....	59

Tableau 22: Charge totale du personnel.....	59
Tableau 23: E.B.E.....	59
Tableau 24:Compte de résultat en liste.....	60
Tableau 25:dimensions spatiales de l'environnement.....	62

Liste des figures

Figure 1: Mouvement des fluides dans une colonne de rectification.....	3
Figure 2: courbe de vapeur d'eau.....	5
Figure 3: Diagramme d'équilibre liquide-vapeur.....	6
Figure 4: Principe de la distillation.....	7
Figure 5: Représentation simplifiée d'une colonne de rectification.....	9
Figure 6: mouvement des fluides dans la zone d'épuisement.....	13
Figure 7: bilan sur le plateau d'alimentation.....	14
Figure 8: Représentation de la méthode de McCabe et Thiele.....	16
Figure 9: Mouvement des phases dans une colonne.....	17
Figure 10: anneau de Raschig.....	19
Figure 11: anneau de Pall.....	20
Figure 12: Selles Intalox.....	20
Figure 13: cylindre creux.....	22
Figure 14: Transmission de chaleur par convection.....	23
Figure 15: Circulation de fluide à travers des tubes.....	26
Figure 16: corps subissant un rayonnement.....	27
Figure 17: Principe de Rhuston.....	32
Figure 18: Condenseur à contre-courant.....	37
Figure 19: alcoomètre.....	44

Liste des photos

Photo 1 : bouilleur.....	35
Photo 2 : condenseur final.....	38
Photo 3 : colonne de rectification avec l'échafaudage nécessaire pour son assemblage.....	40
Photo 4 : fût avec son caisson.....	45
Photo 5 : paper dosatest.....	45

Introduction

La distillation est une des techniques les plus anciennes et constitue encore aujourd'hui un instrument puissant au service de l'industrie [12].

Au Moyen Age la distillation comportait deux techniques aujourd'hui bien distinctes : la condensation des vapeurs humides, telles que l'eau, l'alcool, les essences, et la condensation des vapeurs sèches, que nous désignons aujourd'hui sous le nom de sublimation. [2]

La fabrication d'alcool est donc une activité qui avait existé depuis des siècles. Sa méthode de fabrication évolue dans le temps et dans l'espace. Actuellement, il en existe plusieurs méthodes de fabrication ou de synthèse de l'alcool mais la plus utilisée est la méthode par fermentation.

Plusieurs matières peuvent être fermentées pour produire de l'alcool mais la plus facile c'est la fermentation des matières sucrées.

D'où, il nous est venu à l'idée de fabriquer une colonne de distillation d'alcool puisque notre grande île offre une grande variété de ressources végétales, plus particulièrement en matière sucrée. De plus, l'alcool joue un rôle considérable dans nos civilisations modernes : c'est par centaines de millions que l'on compte le produit des impôts qui pèsent sur lui dans le budget des grands États ; c'est par milliards qu'il faudrait évaluer les gains tirés de cette fabrication, soit dans les villes, soit dans les campagnes. Et aussi, selon l'OMS l'organisation mondiale de la santé Madagascar s'est placée au deuxième rang mondial sur la consommation d'alcool en 2010. L'alcool se répand actuellement dans les quatre coins de l'île.

Notre but consistera donc à concevoir une colonne de rectification d'alcool capable de rectifier de l'alcool fermenté (7 à 12°GL) en éthanol hydraté (90°GL).

Cet ouvrage sera composé de trois grandes parties dont la première est le résultat des recherches et études théoriques selon la bibliographie nécessaire tout au long de nos travaux. La deuxième sera dédiée à l'expérimentation de la colonne. La dernière partie concerne les évaluations économiques et environnementales du projet.

PARTIE I

ETUDES
BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA DISTILLATION

I.1 Quelques définitions:

a) Distillation

[13]

La distillation est une méthode de séparation permettant de séparer un ou plusieurs constituants d'un mélange homogène liquide en mettant à profit la différence de volatilité des constituants. C'est une opération unitaire qui est réalisée en mettant en contact une phase liquide et une phase vapeur qui utilise la faculté plus ou moins grande pour chaque composé de passer d'une phase à une autre.

Pratiquement cette opération est réalisée dans un appareil conçu pour assurer le meilleur contact possible entre les phases liquide et vapeur et comportant plusieurs étages : ce sont des colonnes ou tours de fractionnement.

b) Bouilleur

Les bouilleurs sont des appareils dont le but est d'effectuer une vaporisation partielle des fonds de colonnes de distillation afin d'engendrer la phase vapeur qui assurera le fractionnement dans la section d'épuisement. La quantité vaporisée s'appelle « le taux de rebouillage ».

Il s'agit d'une partie importante d'une installation de distillation. Dans l'industrie le bouilleur correspond en général au réacteur sur lequel est montée la colonne de distillation, même si d'autres configurations sont possibles.

Il existe trois types de bouilleurs différenciés par leur type de chauffe :

- ✓ Électrique
- ✓ Vapeur
- ✓ À récupération

c) Condenseur

Un condenseur est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide froid provoque un changement de phase du fluide chaud, qui passe de l'état de vapeur à l'état liquide.

Dans un condenseur, on va produire à la surface d'échange un film liquide. Ce film liquide entraîne une résistance thermique supplémentaire qui tend à diminuer le flux de chaleur. Autrement dit, l'objet même que l'on souhaite obtenir (la condensation de la vapeur) constitue un frein à sa propre production. L'épaisseur du film est ainsi à considérer pour optimiser la condensation.

Il y a deux types de condenseurs :

✓ les condenseurs par surface : la vapeur à condenser et le liquide réfrigérant sont en contact par l'intermédiaire d'une surface d'échange (habituellement métallique et inoxydable).

✓ les condenseurs par mélange : la vapeur à condenser et le liquide réfrigérant sont mélangés dans une enceinte munie d'un dispositif spécial pour faciliter le mélange.

d) Reflux

[30]

C'est le liquide descendant. Il est toujours provoqué par un réfrigérant appelé condenseur ou déflegmateur. Pour qu'une colonne à distiller puisse jouer son rôle ; il faut un contact entre la phase liquide et la phase vapeur.

Taux de reflux : Deux rapports différents sont acceptés pour définir le taux de reflux.

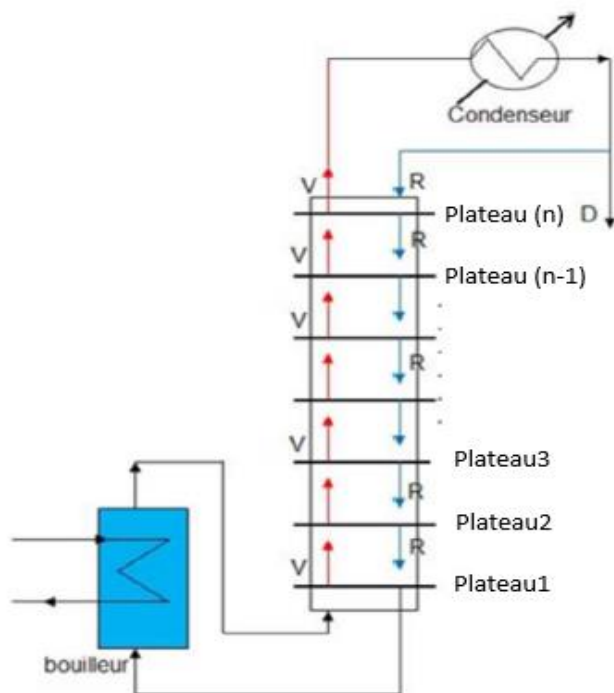
$$\tau = \frac{R}{V} \quad (1-1)$$

Le bilan matière en tête de la colonne donne :

$$V = R + D$$

Si on ne soutire pas, on aura $V=R$, le reflux est total.

D'où, avec la première définition du taux de reflux $\tau = 1$



V : quantité de vapeur montant

R : quantité du liquide descendant

D : quantité du distillat

Figure 1: Mouvement des fluides dans une colonne de rectification

e) La chaudière

La chaudière, indiquée sous le nom de générateur de vapeur, est un dispositif permettant de produire de la vapeur à partir de l'eau. Cette dernière est chauffée à une température et à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Elle est composée de deux compartiments : le premier pour le corps contenant l'eau à chauffer et le second pour la chambre dans laquelle brûle le combustible (ou encore « foyer »).

Il existe deux types de chaudière :

- La chaudière à tube de fumée
- La chaudière à tube d'eau

1.2 Quelques rappels :

a) La chaleur latente de vaporisation.

C'est l'énergie nécessaire pour transformer 1 kg d'eau bouillante en vapeur sans changement de température, notamment l'énergie thermique nécessaire permettant la transformation de l'état liquide à l'état vapeur.

b) Vapeur saturée

Au moment où le point d'ébullition de l'eau est atteinte, la température de l'eau cesse d'augmenter et reste constante tant que la totalité de l'eau contenue dans le milieu ne s'est pas évaporée. A cet instant, l'eau passe de l'état liquide à l'état vapeur par l'énergie qu'il reçoit de la chaleur latente de vaporisation. Tant qu'il reste encore une goutte d'eau, la température de la vapeur est proche de celle de l'eau, à ce moment la vapeur obtenue est appelée vapeur saturée.

c) Vapeur surchauffée

Pour obtenir ce type de vapeur, on part de la vapeur saturée que l'on chauffe dans un corps de chauffe, jusqu'à obtenir de la vapeur sèche ayant une température très largement supérieure à la température de saturation. La chaleur nécessaire pour chauffer cette vapeur est appelée chaleur de surchauffe, elle ne peut pas contenir de gouttelette d'eau puisque son titre est égal à 1. Il faut appliquer une quantité de chaleur de 2,9 KJ sur 1 Kg de vapeur à pression constante pour élever sa température de 1°C.

d) La courbe de la vapeur d'eau

La courbe de la vapeur d'eau est composée de deux parties :

- ♦ La courbe d'ébullition ;
- ♦ La courbe de rosée

La courbe d'ébullition

La courbe d'ébullition est l'ensemble des points d'ébullition. Le point d'ébullition caractérise la température à partir de laquelle l'eau se transforme en liquide saturé. Cette courbe représente la frontière entre la phase liquide de l'eau et sa phase liquide-vapeur.

La courbe de rosée

La courbe de rosée est l'ensemble des points de rosée. Le point de rosée représente la température à partir de laquelle la vapeur saturée se transforme en vapeur pure. Cette température est spécifique pour une pression bien déterminée. Elle représente la frontière entre la phase de mélange liquide-vapeur et la phase vapeur pure.

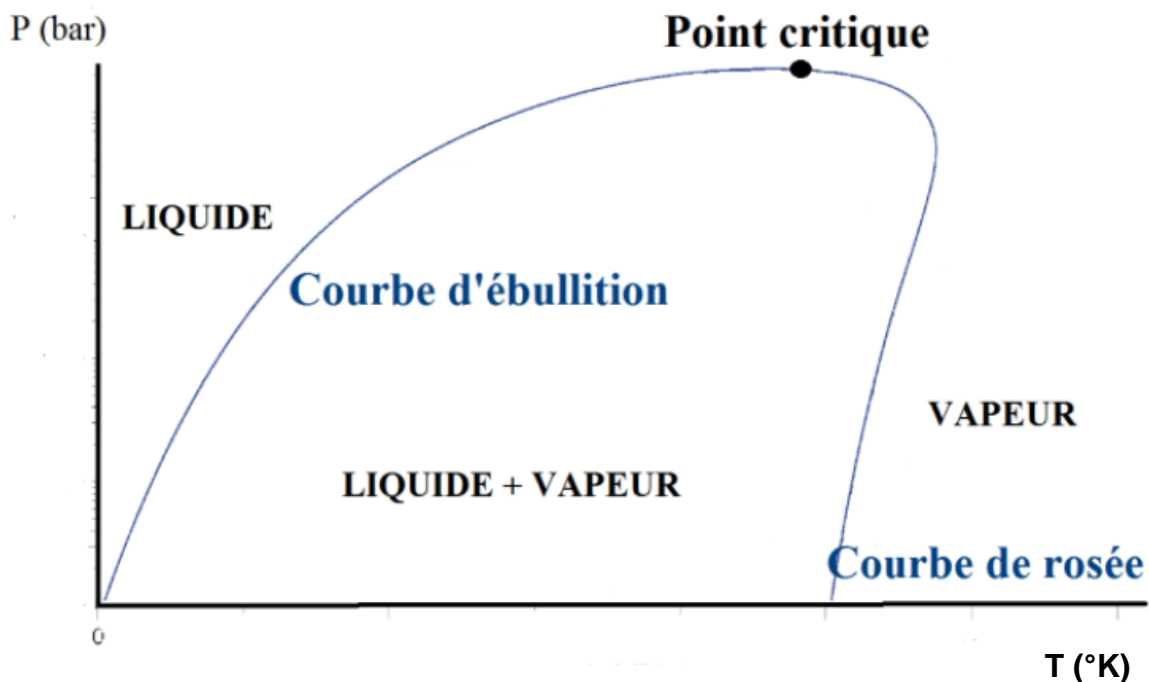


Figure 2: courbe de vapeur d'eau

Voici un exemple de diagramme d'équilibre liquide-vapeur :

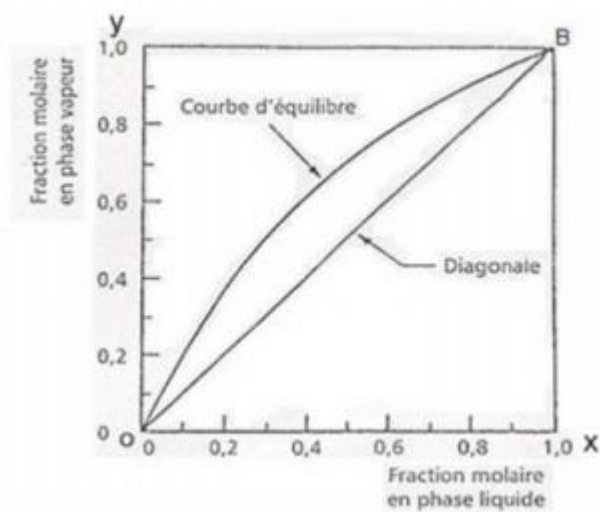


Figure 3: Diagramme d'équilibre liquide-vapeur

Pour notre liquide (éthanol) le diagramme d'équilibre liquide vapeur est obtenu à partir de ce tableau : [17]

fraction d'éthanol dans le liquide x	fraction d'éthanol dans la vapeur y
0,019	0,17
1,172	0,389
0,097	0,438
0,124	0,47
0,166	0,509
0,234	0,545
0,261	0,558
0,327	0,583
0,397	0,612
0,508	0,656
0,52	0,66
0,573	0,684
0,676	0,739
0,747	0,782
0,894	0,894

Tableau 1: Valeur des fractions d'éthanol dans le liquide et le vapeur dans un mélange eau-éthanol à l'équilibre

I.3 Principe de la distillation :

[19]

Pour obtenir la séparation, le mélange de liquide est porté à ébullition. La phase vapeur obtenue présente plusieurs composants. Cette phase s'enrichit en composés les plus volatils. La phase vapeur est séparée de la phase liquide et est condensée (distillat).

Les composés les moins facilement volatils restent quant à eux en majorité dans la phase liquide.

Le principe de séparation repose sur le fait que la teneur des composants facilement volatils est plus élevée dans la phase vapeur que la phase liquide.

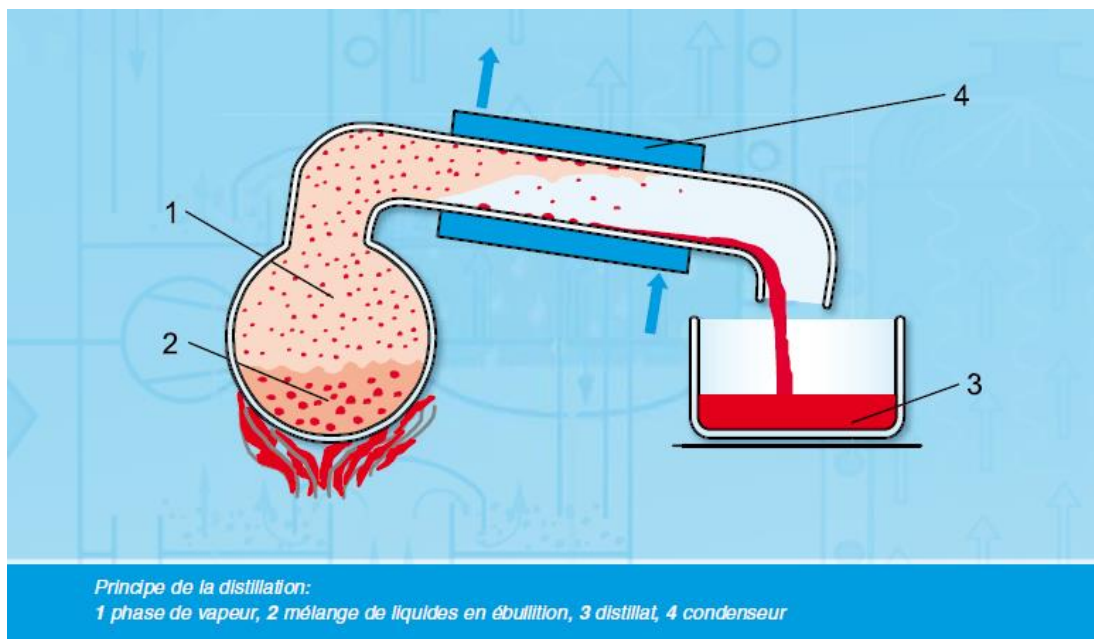


Figure 4: Principe de la distillation

Il existe plusieurs types de distillation

- La distillation simple
- La rectification continue ou discontinue
- La distillation azéotropique

Mais notre travail s'est surtout focalisé sur la rectification discontinue

CHAP. II : LA RECTIFICATION

[1], [5], [6]

II.1 Principe

La rectification est une forme d'application de la distillation. Elle est utilisée par exemple pour le fractionnement du pétrole.

Si le distillat obtenu par distillation est à nouveau distillé, on obtient un nouveau distillat dont la teneur en composants volatils est encore plus élevée. En recommençant cette opération plusieurs fois, il est possible d'augmenter à chaque fois cette teneur.

En pratique, cette distillation à plusieurs étapes est effectuée dans une colonne sous forme de distillation à contre-courant (rectification). Le mélange de liquides à séparer (alimentation) est amené en bas de la colonne où il est porté à ébullition. La vapeur générée se déplace vers le haut de la colonne et l'autre partie retourne dans la colonne et se déplace vers le bas.

Pendant son déplacement vers la tête de la colonne, le mélange gazeux généré au bas de la colonne subit un échange intensif de chaleur et de matières avec la phase liquide par l'intermédiaire des plateaux, ou des garnissages. Les composants moins facilement volatils de la phase vapeur se condensent et enrichissent ainsi la phase liquide.

La rectification étant une opération qui peut s'effectuer sous des pressions extrêmement différentes, le choix de la pression, qui est le facteur le plus important dans une distillation, est déterminé par :

- ✓ la température maximale T_{max} supportée par le produit
- ✓ la température de chauffage
- ✓ la température du liquide de refroidissement utilisé dans le condenseur

Il en résulte ainsi les valeurs limites à lesquelles la colonne peut fonctionner.

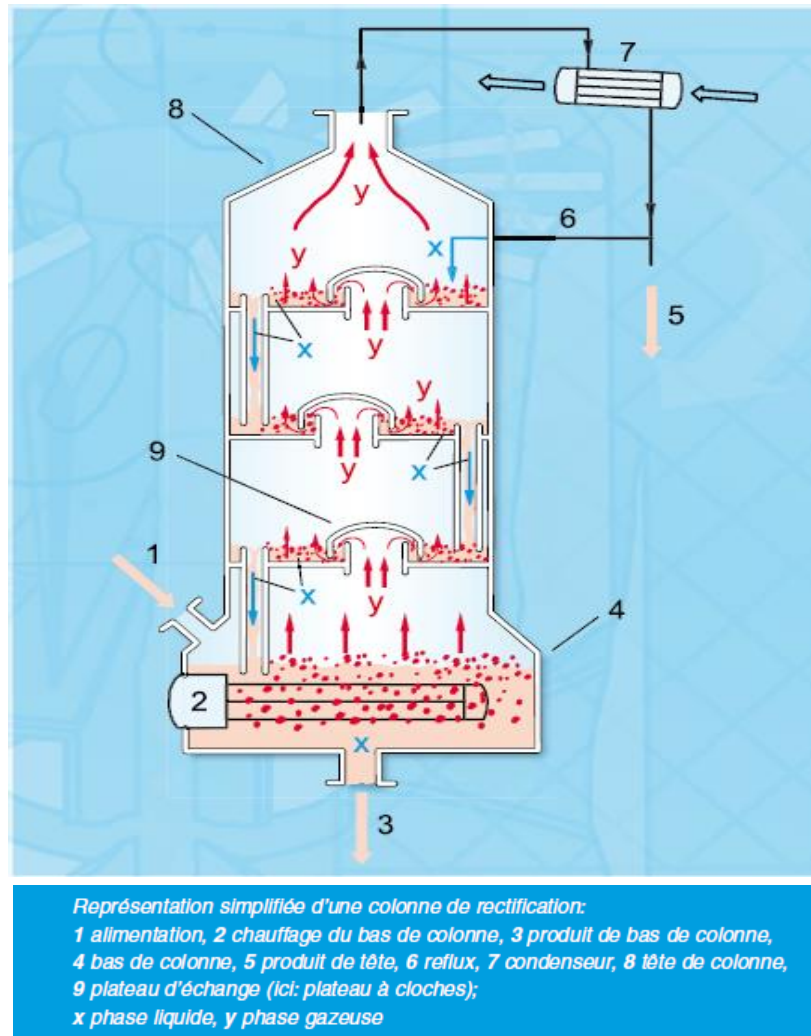


Figure 5: Représentation simplifiée d'une colonne de rectification

Il existe deux types de rectification :

- ❖ Rectification continue
- ❖ Rectification discontinue

a) Rectification continue

La rectification continue est un procédé de séparation en continu d'un mélange de liquide par distillation. La charge est introduite en continu en un certain point de la colonne appelé plateau d'alimentation, de sorte qu'une partie est volatilisée, et le reste descend avec le reflux. Le composant le plus volatil est concentré en tête de colonne et éliminé dans le condensat. La partie riche en moins volatile peut être soutirée au pied de la colonne ou du rebouilleur.

La colonne se divise donc en deux tronçons :

- Le tronçon de colonne au-dessus du niveau d'alimentation est le tronçon de concentration (la vapeur s'enrichit en constituant le plus volatil)
- Le tronçon en dessous du niveau d'alimentation est le tronçon d'épuisement (le liquide s'appauvrit en constituant le plus volatil).

b) Rectification discontinue

a.1 Principe

L'appareillage de rectification discontinue se compose des éléments suivants:

1. Un bouilleur: c'est un réservoir chargé au départ du mélange à distiller
2. Un dispositif de chauffage du bouilleur
3. Une colonne de rectification
4. Un condenseur

La colonne à rectifier permet la mise en contact des phases liquide et vapeur circulant à contre-courant tout au long de la colonne. La vapeur qui parvient en tête de colonne est entièrement condensée: une partie des condensats est éliminée de la colonne et constitue le distillat, l'autre partie retourne dans la colonne par gravité et constitue le reflux.

Sur chaque plateau un équilibre s'établit entre le liquide qui reflue et la vapeur qui monte. Le liquide s'appauvrit en composant le plus volatil qui se vaporise et la vapeur s'appauvrit en composant le moins volatil qui se condense.

La qualité de la séparation sera donc directement fonction du nombre de plateaux de la colonne.

Dans la pratique industrielle la rectification est arrêtée quand la qualité de distillat en B devient inférieure à une pureté souhaitée. Si on poursuit l'opération, il arriverait un moment où il ne restera plus que le composé A dans le bouilleur.

a.2 Détermination du nombre d'étages théoriques (NET) d'une colonne

i. Les lois régissant la distillation

- Lois de Raoult et Dalton :

Loi de Raoult

$$P_A = x_A P_A^o$$

P_A : Pression de vapeur à l'équilibre du composant A dans un mélange liquide

x_A : fraction molaire du composant A dans le mélange liquide

P_A^o : Pression de vapeur à l'équilibre du composant A à l'état pur

et à la température de la solution

Loi de Dalton

$$y_A = \frac{P_A}{P}$$

P_A : Pression de vapeur du composant A dans un mélange gazeux

P : Pression totale de vapeur du mélange gazeux

y_A : fraction molaire du composant A dans un mélange gazeux

ii. Principe de la méthode

Le rôle d'un plateau est d'enrichir simultanément la vapeur en produit léger et le liquide en produit lourd ; il y a ainsi échange de matière et de chaleur entre la vapeur et le liquide.

Pour déterminer le nombre de plateau ou d'étage théorique nous avons recours à la méthode graphique de McCabe et Thiele

Bilan matière :

Soient

F : débit molaire de l'alimentation du mélange à distiller de fraction molaire x_F en volatil

V : débit molaire du vapeur qui sont condensés en donnant du liquide de teneur y

R : débit molaire du liquide retournant dans la colonne sous forme de reflux

D : débit molaire du distillat de fraction molaire x_D

W : débit molaire du résidu non distillé de fraction molaire x_W

Dans la zone d'enrichissement

Le bilan global s'écrit :

$$V = R + D \quad (2-1)$$

$$F = D + W \quad (2-2)$$

$$F x_f = D x_d + W x_w \quad (2-3)$$

Pour le plateau n :

$$V_n = R_{n+1} + D \quad (2-4)$$

Pour la démonstration on doit indiquer les étages de 1 (le premier étage est le bouilleur) à n (dernier plateau au sommet de la colonne)

On peut en déduire donc que $x_1 = x_B$ et $y_n = x_{n+1} = x_D$

Avec x_B : fraction molaire initial du mélange dans le bouilleur

Donc on peut écrire de (b-4) $V_n y_n = R_{n+1} x_{n+1} + D x_D$

Et comme V et R sont considérés constants tout le long de la colonne alors :

$$y_n = \frac{R_{n+1}}{V_n} x_{n+1} + \frac{D}{V_n} x_D \quad (2-5)$$

En rapportant (b-4) dans (b-5) on obtient :

$$y_n = \frac{R_{n+1}}{R_{n+1} + D} x_{n+1} + \frac{D}{R_{n+1} + D} x_D$$

Or $R_{n+1} = R$

D'où :

$$y_n = \frac{R}{R+D} x_{n+1} + \frac{D}{R+D} x_D \quad (2-6)$$

Maintenant portons (1-1) dans (b-6) nous obtenons :

$$y_n = \frac{\tau}{\tau + 1} x_{n+1} + \frac{1}{\tau + 1} x_D \quad (2-7)$$

C'est l'équation de la droite opératoire d'enrichissement.

Si nous remplaçons y_n par X_D nous obtiendrons $x_{n+1} = X_D$

Donc cette droite passe par le point D (X_D ; X_D) sur la 1ère bissectrice. (voir figure 8)

Dans la zone d'épuisement :

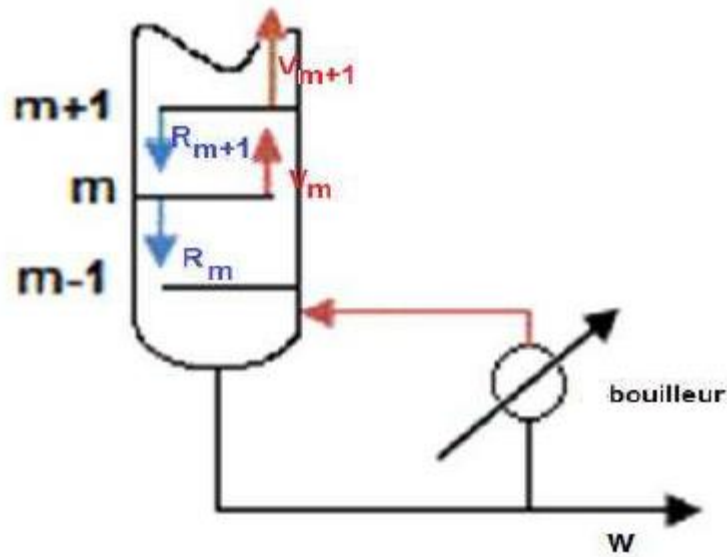


Figure 6: mouvement des fluides dans la zone d'épuisement

Supposons que c'est l'épuisement commence dans le plateau m, le bilan s'écrit alors :

$$R_{m+1} = V_m + W$$



$$V_m = R_{m+1} - W$$



$$V_m y_m = R_{m+1} x_{m+1} - W x_W$$

$$y_m = \frac{R_{m+1}}{V_m} x_{m+1} - \frac{W}{V_m} x_W$$

Comme $R_{m+1} = R_m$ alors on a :

$$y_m = \frac{R_m}{R_m - W} x_{m+1} - \frac{W}{R_m - W} x_W \quad (2-8)$$

C'est l'équation de la droite opératoire d'épuisement.

Si nous remplaçons y_m par x_W nous obtiendrons $x_{m+1} = x_W$

Cette droite passe par le point W ($x_W ; x_W$) sur la 1ère bissectrice. (voir figure 8)

Et peut aussi l'écrire sous une autre forme

Comme $R_m = F + R$ et $D = F - W$

$$\text{D'où (2-8) devient : } y_m = \frac{R+F}{R+D} x_{m+1} - \frac{W}{R+D} x_W \quad (2-9)$$

La droite opératoire d'épuisement et la droite opératoire de concentration se coupent en un point correspondant à l'état thermique de l'alimentation de la colonne.

En effet si l'on écrit $y_n = y_m$ les équations (2-6) et (2-9) donnent :

$$F x_F = W x_W + D x_D \quad (3-1)$$

Cette équation n'est autre que le bilan matière global de la colonne.

Bilan sur le plateau d'alimentation :

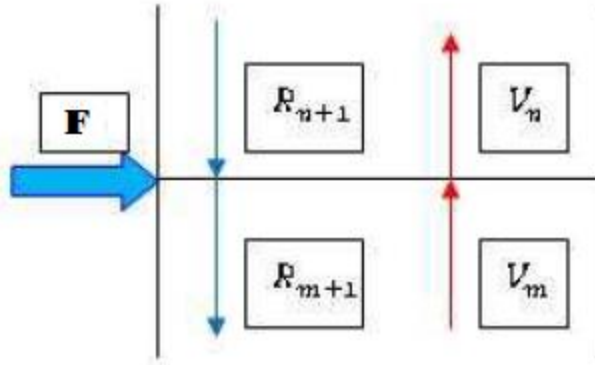


Figure 7: bilan sur le plateau d'alimentation

$$\text{On peut en déduire de ce bilan que : } F + R_{n+1} + V_n = R_{m+1} + V_m \quad (3-2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_n y_n = R_{n+1} x_{n+1} + D x_D \\ V_m y_m = R_{m+1} x_{m+1} - W x_W \end{array} \right. \quad (3-3)$$

$$\quad (3-4)$$

(3-3)-(3-4) donne :

$$(V_n - V_m) y_1 = (R_{n+1} - R_{m+1}) x_1 + D x_D + W x_W \quad (3-5)$$

De (3-1) nous avons :

$$x_F = \frac{W x_W + D x_D}{F}$$

Portons dans (3-5) alors l'équation devient :

$$\left(\frac{V_n - V_m}{F} \right) y_1 = \left(\frac{R_{n+1} - R_{m+1}}{F} \right) x_1 + x_F \quad (3-6)$$

$$\text{Posons } \left(\frac{R_{n+1} - R_{m+1}}{F} \right) = q$$

De (3-2) on peut écrire : $1 + \left(\frac{R_{n+1} - R_{m+1}}{F} \right) = - \left(\frac{V_n - V_m}{F} \right)$

$$\Rightarrow (1 + q) = - \left(\frac{V_n - V_m}{F} \right)$$

L'équation (3-6) devient alors : $-(1 + q)y_1 = qx_1 + x_F$

D'où :

$$y_1 = - \frac{q}{(1 + q)} x_1 - \frac{1}{(1 + q)} x_F \quad (3-7)$$

C'est la droite opératoire d'état thermique de l'alimentation qui passe par le point I (x_I ; y_I) et le point F (x_F ; y_F)

iii. Construction graphique de McCabe et Thiele

La détermination graphique s'effectue en réalisant les opérations suivantes:

- tracer la courbe d'équilibre isobare
- tracer la droite opératoire du tronçon de concentration: elle passe par les points de coordonnées (x_D ; y_D) et $(0; \frac{x_D}{\tau+1})$.
- Tracer la droite opératoire d'alimentation qui passe par le point I (x_I ; y_I) et le point F (x_F ; y_F).
- tracer la droite opératoire du tronçon d'épuisement. Il suffit de joindre le point I et le point W.
- Tracer le vertical à partir de l'abscisse $x_W = x_I$ pour s'arrêter sur la courbe d'équilibre au point de coordonnées (x_1 , y_1). Il s'agit des coordonnées représentatives de l'équilibre au bouilleur.
- de ce dernier point tracer l'horizontal qui s'arrête sur la droite opératoire au point (x_2 , y_1).
- tracer le vertical à partir de l'abscisse x_2 pour s'arrêter sur la courbe d'équilibre au point de coordonnées (x_2 , y_2). Il s'agit des coordonnées représentatives de l'équilibre sur le premier vrai plateau.
- Continuer ainsi de suite ... et pour arriver finalement sur la droite opératoire à un point dont les coordonnées sont égales ou légèrement supérieures à (x_D , x_D).
- Enfin compter les nombres des triangles dont deux points appartiennent à la droite opératoire pour fournir le nombre d'étage théorique ou NET.

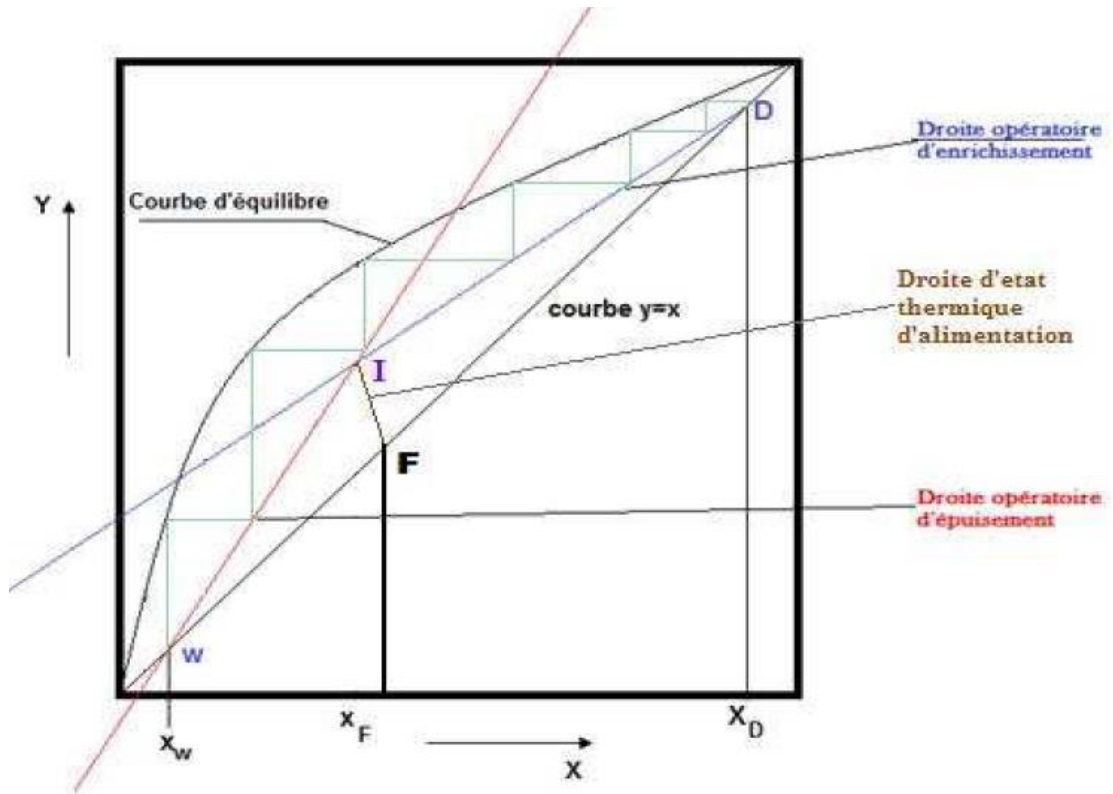


Figure 8: Représentation de la méthode de McCabe et Thiele

Remarque :

La courbe d'équilibre ne dépend que de la nature des composés et de la pression utilisée pour la rectification.

La droite opératoire dépend par contre totalement de l'opérateur par l'intermédiaire de la qualité de distillat souhaitée x_D et du taux de reflux appliquée τ .

Le taux de reflux fixe la proportion de condensat liquide qui va retourner dans la colonne.

Il est impossible de réaliser une construction de McCabe et Thiele en utilisant un point de la droite opératoire placé au-dessus de la courbe d'équilibre.

Cas particulier

Si le reflux est total c'est à dire quand le débit de distillat est nul :

- Tout le condensat retourne dans la colonne
- La droite opératoire est la 1^{ère} bissectrice

Dans ce cas, le nombre de plateaux théoriques est minimum:

- Il n'y a aucune production de distillat
- L'enseignement qu'on peut en tirer est de connaître le nombre minimum de plateaux qui sera nécessaire.

CHAP. III. COLONNE DE RECTIFICATION

III.1 Les différents types de colonne :

Ce qui différencie les colonnes de rectification sont leurs dispositifs internes. Nous distinguons:

- les colonnes à plateaux : perforés, à calottes ou à soupapes ;
- les colonnes à garnissage : en vrac ou structuré.

a) Colonnes à plateaux :

Les colonnes à plateaux sont utilisées pour réaliser un contact entre phase gazeuse et phase liquide de manière à les amener le plus près possible de l'état d'équilibre.

Le mouvement des phases peut se faire de deux façons :

- ✓ à contre-courant, sur un plateau constitué exclusivement par des trous ou des fentes à travers lesquels le liquide et la vapeur s'écoulent et il n'y a pas de trop plein.
- ✓ à courants croisés, sur un plateau à travers lesquels la phase vapeur traverse une couche de liquide se déplaçant horizontalement avant de déboucher par un trop plein sur le plateau inférieur.

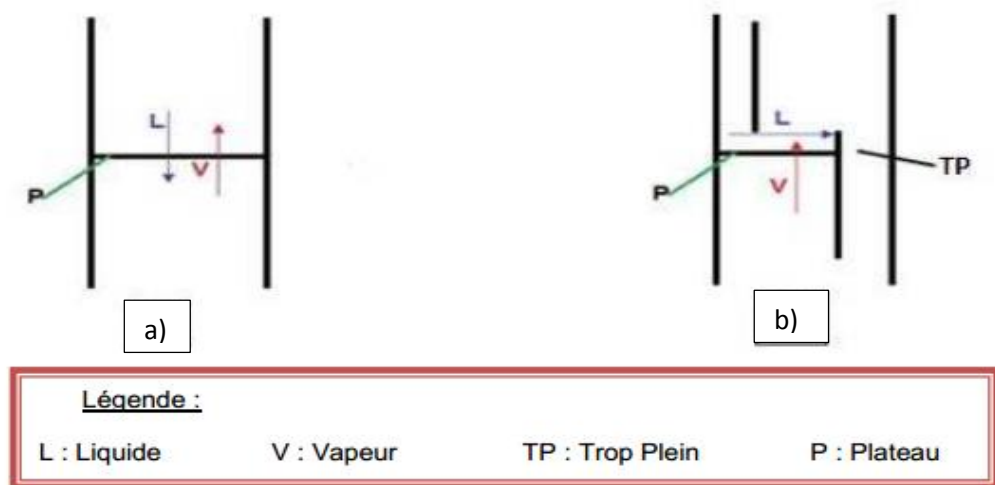


Figure 9: Mouvement des phases dans une colonne

- a) à contre-courant ;
- b) à courants croisés

a.1 Les éléments constitutifs d'un plateau :

[3]

Un plateau est constitué par une plaque métallique sur laquelle sont implantés les éléments de barbotage et dans le cas des plateaux à courants croisés, de barrages et des trop-pleins.

Selon les éléments de barbotage, il existe 3 principaux types de plateaux aux multiples variantes suivant les constructeurs :

i. **Les plateaux à calottes classiques** (Bulbe cap trays)

Un plateau à calotte est constitué d'une canalisation verticale ou d'une cheminée adaptée sous forme de trou au-dessus de laquelle est placé un chapeau pour la couvrir. Ce chapeau de la bulle est monté de sorte qu'il y ait un espace entre la canalisation verticale et le chapeau pour permettre le passage de la vapeur. La vapeur qui monte par la cheminée est dirigée en bas par le chapeau puis décharge par des fentes sur le chapeau, et finalement bouillonne dans le liquide sur le plateau.

Ici le mouvement des phases sont à courants croisés.

ii. **Les plateaux à trous perforés** (sieve trays)

Les plateaux perforés sont simplement des plats métalliques avec des trous au-dessus. La vapeur passe directement vers le haut à travers le liquide du plateau.

L'arrangement, le nombre et la taille de trous sont des paramètres de conception.

Ici le mouvement des phases peut être à contre-courant ou à courant croisé selon qu'il y a des trop-pleins ou non.

iii. **Les plateaux à soupapes ou à clapets** (valve trays)

Dans les plateaux à valves, les perforations sont couvertes des chapeaux liftables. La vapeur ascendante fait monter le chapeau de la soupape, pour créer un secteur d'écoulement pour le passage de la vapeur. Le chapeau de la soupape dirige la vapeur pour s'écouler horizontalement dans le liquide, ceci produit un meilleur mélange que celle des plateaux perforés.

b) **Colonnes à garnissage :**

[3]

Les colonnes garnies diffèrent nettement des colonnes à plateaux, tant par leur construction que par leur fonctionnement. Les fluides y circulent à contre-courant et non plus à courants croisés. L'équilibre entre liquide-vapeur n'est réalisé en aucun niveau d'une section garnie, même si on la considère comme fonctionnant de façon idéale.

Le transfert des matières entre le liquide et la vapeur a lieu de façon continue sur toute la hauteur de la colonne.

Le rendement de la colonne garnie est obtenu en déterminant le nombre de plateaux d'une colonne idéale qui aurait la même efficacité que la colonne considérée et on déduit ensuite la HEPT (Hauteur équivalent des plateaux théoriques). Cette colonne sera d'autant meilleure que sa HEPT sera plus petite.

. On détermine par la construction graphique le NET et connaissant la hauteur du garnissage, on déduit la HEPT:

$$HEPT = \frac{\text{Hauteur de garnissage}}{NET}$$

Nous distinguons deux types de colonnes à garnissage :

b.1 Les colonnes à garnissage en vrac (random packing) [20]

Les garnissages sont des pièces formées régulièrement en métal, céramique, verre, graphite ou matière plastique. Ils se trouvent sous forme de remplissage en vrac dans la colonne. Il existe de nombreux types de garnissage en vrac mais nous n'allons énumérer que les principaux produits dont leurs caractéristiques sont diffusées par les constructeurs.

i. Anneaux Raschig

Ce sont des manchons cylindriques de hauteur égale au diamètre extérieur (dimension nominale). Le choix du matériau est extrêmement vaste : céramique (grès ou porcelaine), graphite, métaux et alliages, plastiques et verres. Les dimensions nominales courantes vont de 6,4 à 102 mm .

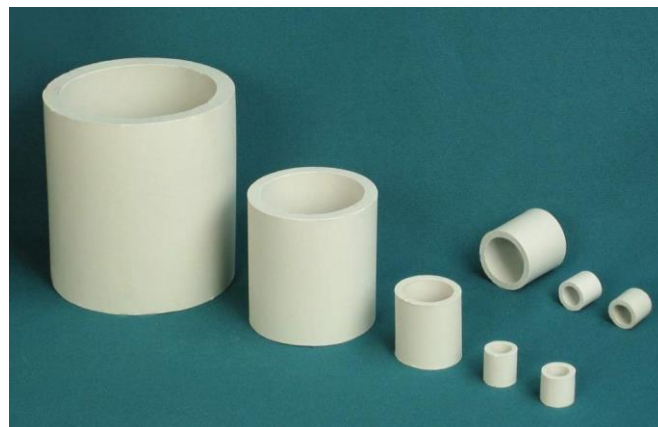


Figure 10: anneau de Raschig

ii. Anneaux Pall [20]

Les anneaux Pall sont identiques aux anneaux Raschig mais des fentes transversales sont aménagées sur les parois pour repousser la matière à l'intérieure.

Les anneaux Pall ainsi constitués permettent de réduire le volume de garnissage à mettre en œuvre, pour une opération donnée, d'environ 30 à 40 %. Ces anneaux, de plus en plus répandus, existent en céramique, métaux et plastiques et leurs dimensions nominales courantes vont de 15,9 à 76 mm.



Figure 11: anneau de Pall

iii. Selles Intalox

La forme générale de ces corps ressemble à un demi-tore engendré par un demi-cercle dont la concavité est tournée vers l'extérieur. Leur production, essentiellement en céramique ou en plastique, peut être obtenue par extrusion.



Figure 12: Selles Intalox

b.2 les colonnes à garnissage systématique (structured or stacked packing) ou Packungen

i. Anneaux ordonnés

Les empilages d'anneaux ordonnés sont souvent utilisés comme premières couches interposées entre une grille en forme de poutres et le garnissage en vrac.

Les empilages entièrement constitués d'anneaux ordonnés sont rares en distillation, ils sont par contre très utilisés dans les installations de lavage de gaz sales.

Dans une telle conception, l'augmentation de la surface de contact par un cloisonnement droit se révèle intéressante alors que nous avons vu qu'elle était illusoire pour des anneaux en vrac.

ii. Matelas ou Packungen

Il s'agit dans la plupart du temps d'un tissu métallique à mailles fines et structure ordonnée. Par capillarité, ces tissus sont complètement et uniformément mouillés par le liquide.

III.2 Comparaisons des colonnes à plateaux et à garnissages : [14], [15]

Les avantages et les inconvénients de ces deux types de colonne sont regroupés sous forme de tableau suivant.

Types de Colonne	Garnissages	Plateaux
avantages	<ul style="list-style-type: none"> - coût moindre pour diamètre inférieur à 1m - perte de charge plus faible - rétention plus faible - plus petit nombre d'étages qu'une colonne à plateaux pour une même hauteur. -intéressantes en discontinu et en cas de besoin d'un nombre d'étages assez faibles 	<ul style="list-style-type: none"> - coût élevé mais au-delà de 1 m de diamètre c'est moins coûteux - grand nombre d'étages disponibles -plus intéressantes en continu, sous la pression atmosphérique, en cas de besoin d'un nombre d'étages importants. -performances : court-circuit et rétro-mélanges sont mieux contrôlés -colonne à plateaux à déversoir présente une grande flexibilité
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -utilisation d'une pression réduite -possibilité d'existence de court-circuit de la phase gazeuse 	<ul style="list-style-type: none"> - perte de charge importante à cause de la couche de liquide sur le plateau - rétention forte (le liquide reste souvent en fin d'opération sur les plateaux)

Tableau 2:comparaison des colonnes à plateaux et à garnissages

CHAP. IV : TRANSFERT DE CHALEUR

Notion de flux de chaleur

Pour tous les modes de transfert de chaleur, on définit le flux de chaleur ou la puissance thermique $\phi(W)$ comme la quantité de chaleur $Q(J)$ traversant une surface isotherme $S(m^2)$ pendant un temps $\Delta t(s)$.

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

En calcul, le flux est toujours pris positif

- Modes de transfert de chaleur

IV.1 LA CONDUCTION

a) Définition

La conduction est un mode de transmission de chaleur d'un endroit à un autre dans lequel il n'y a pas de mouvement du corps ou du fluide.

b) Flux de chaleur transmis par conduction

- à travers un corps cylindrique creux :

$$\phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{1}{2\pi\lambda L} \log \frac{R_e}{R_i}}$$

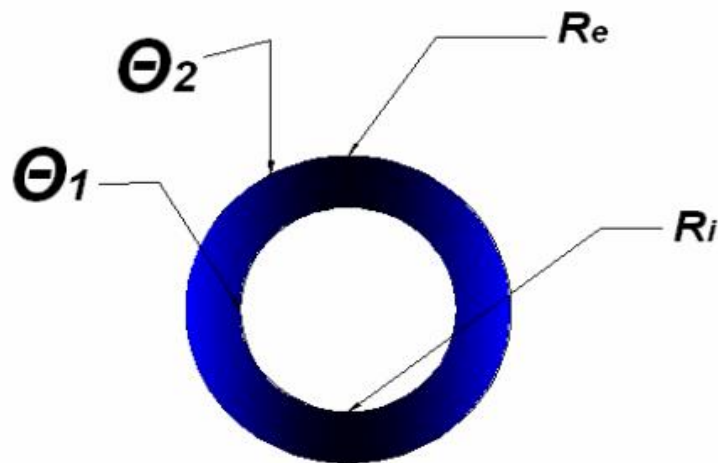


Figure 13: cylindre creux

Φ : flux de chaleur

λ : conductivité thermique du corps cylindrique

R_e : rayon externe du cylindre

R_i : rayon interne du cylindre

L : longueur du cylindre

Θ_1 : température sur la paroi interne du cylindre

Θ_2 : température sur la paroi externe du cylindre

Φ peut être exprimé en fonction de la surface d'échange S (rapportée à la surface intérieur

$$\phi = \frac{(\theta_1 - \theta_2)S}{\frac{R_i}{\lambda} \text{Log}\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}$$

IV.2 CONVECTION

Considérons un solide en contact avec un fluide selon le schéma suivant :

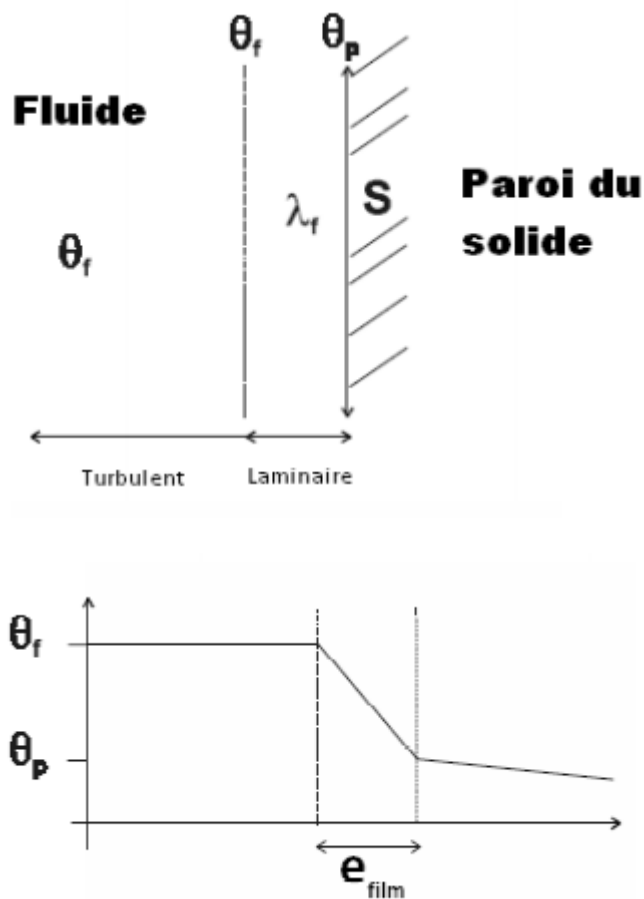


Figure 14: Transmission de chaleur par convection

Ici, le phénomène de convection se réduit à la conduction dans la couche mince. Le flux de chaleur peut donc s'écrire :

$$\phi = \frac{\lambda_f \cdot S}{e_{film}} (\theta_f - \theta_p)$$

λ_f : conductivité thermique du fluide

S : surface de la paroi d'échange

e_{film} : épaisseur du film

$\theta_f; \theta_p$: température respective du fluide et de la paroi

Or e_{film} est rarement connue et λ_f dépend de la température qui est variable dans la couche.

D'où l'écriture du flux de chaleur suivant :

$$\phi = h \cdot S \cdot (\theta_f - \theta_p)$$

h : coefficient thermique de convection

On remarque que h a la même dimension que le coefficient de transfert thermique global K . On a donc l'expression de la résistance thermique de transfert par convection :

$$R = \frac{1}{h \cdot S}$$

Détermination du coefficient d'échange thermique par convection :

Ce coefficient est fonction

- De l'écoulement du fluide : vitesse, régime (laminaire ou turbulent)
- Des caractéristiques géométriques des parois et de sa rugosité
- Des caractéristiques du fluide : masse volumique, viscosité, chaleur spécifique,....
- Des éventuels changements d'état du fluide

L'expérience est souvent la méthode apportant le plus d'information sur la valeur de ces coefficients.

Les nombres sans dimensions

[4]

Les variables intervenant dans l'échange de chaleur par convection sont très nombreuses. On utilise dans les calculs le fait que, après analyse dimensionnelle et confirmation expérimentale, ces différentes variables interviennent par groupements appelés nombres sans dimension, dont la valeur numérique est la même, quel que soit le système d'unités adopté, pourvu qu'il soit cohérent.

Voici quelques nombres sans dimension utiles pour les calculs d'échangeurs :

- nombre de REYNOLDS : c'est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

Il caractérise le régime de l'écoulement du fluide.

$$Re = \frac{\frac{V^2}{L} \rho}{\frac{V}{L^2} \mu} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- nombre de NUSSELT : il interprète le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à une quantité de chaleur échangée par conduction.

$$Nu = \frac{h S \Delta t}{\frac{\lambda}{L} S \Delta t} = \frac{h L}{\lambda}$$

- nombre de PRANDTL : il indique le rapport de la matière à la diffusivité thermique.

Il caractérise aussi la distribution de vitesse par rapport à la distribution de la température.

$$Pr = \frac{\frac{\mu}{a}}{\frac{\rho}{a}} = \frac{\mu}{\rho a}$$

ou

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

- nombre de STANTON : exprimé par le rapport du nombre de NUSSELT par les nombres de PRANDTL et REYNOLDS.

$$St = \frac{Nu}{Pr Re}$$

Cas d'un tube lisse avec écoulement turbulent :

On utilise la relation de Colburn

$$Nu = 0,023 . Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

Cette relation est valable si

$$10000 < Re < 120000$$

$$0,7 < Pr < 120$$

$$\frac{L}{D} > 60$$

L : longueur du tube

Le calcul de Nu rend évident le calcul de h_i par la relation

$$h_i = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_i}$$

Circulation forcée d'un liquide à l'extérieur d'un tube cylindrique et perpendiculaire à celui-ci

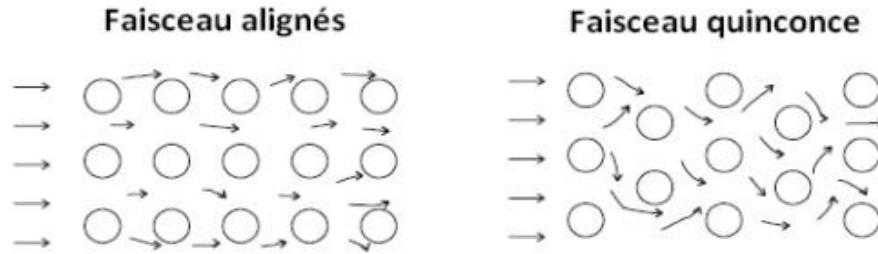


Figure 15: Circulation de fluide à travers des tubes

Faisceau alignés : $Nu = 0,026 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,33}$

Faisceau quinconce : $Nu = 0,033 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,33}$

Ces valeurs montrent que l'augmentation des turbulences améliore le transfert thermique.

Résumé des étapes à suivre pour déterminer la quantité de chaleur transmise Q

- Détermination du régime d'écoulement par le calcul de Re
- Choix du nombre de Nusselt selon le régime
- Calcul du coefficient d'échange thermique par convection
- Calcul de Q par la relation

$$\phi = h \cdot S \cdot (\theta_f - \theta_p)$$

IV.3 LE RAYONNEMENT

Tout corps placé aux environs d'une source de chaleur s'échauffe, ceci traduit que l'énergie calorifique est transportée par un rayonnement identique à celui de la lumière et se propage comme lui en ligne droite.

La longueur d'onde des radiations qui se manifeste sous forme de chaleur se situe entre 0,5 à 50 μ .

Le rendement de transmission par rayonnement est meilleur si le vide règne entre l'émetteur et le récepteur du rayonnement.

La propagation par rayonnement suit les mêmes lois que celles de la lumière. Soit un rayonnement incident atteignant un corps :

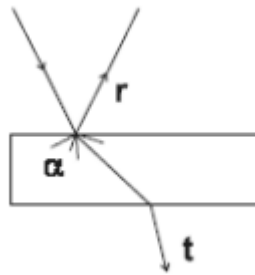


Figure 16: corps subissant un rayonnement

On a la somme : $\alpha + t + r = 1$

α : facteur d'absorption du corps

t : partie transmise du rayonnement

r : partie réfléchie du rayonnement

Loi de Stefan

[16]

Stefan a établi empiriquement l'équation fondamentale relative au rayonnement thermique total émis par un corps rayonnant idéal (corps noir)

$$d\phi_r = \sigma ds T^4$$

$d\phi_r$: quantité de chaleur transmise par rayonnement à partir d'une face du corps noir de surface ds

T : température absolue de la surface

σ : constante dimensionnelle de Stefan

Autre forme de la loi de Stefan

$$\phi = \sigma \varepsilon S \theta^4$$

ε : facteur d'émission du corps

θ : température absolue du corps

Echange de chaleur entre deux corps gris

$$E_{ef} = \varepsilon E_0 + (1 - \rho) E_{in}$$

E_{ef} : rayonnement effectif, c'est le flux de rayonnement qui quitte le corps

E_0 : pouvoir émissif total du corps noir

E_{in} : rayonnement incident tombant sur la surface

ρ : facteur de réflexion

D'où le flux de chaleur transporté du corps (1) au corps (2) :

$$q_{1-2} = E_{ef} - E_{in}$$
$$q_{1-2} = 4,92 \cdot S_1 \cdot F_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right]$$

F_{1-2} : facteur relatif au corps gris tel que

$$F_{1-2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

Cette formule s'applique à des surfaces grises en position quelconque.

PARTIE II

EXPERIMENTATION DE LA COLONNE

Introduction

Atelier mécanique.

Tous les appareillages composant l'unité de la colonne de rectification sont réalisés dans l'atelier de fabrication mécanique de l'entreprise ARTICOM. Cette entreprise dispose de beaucoup d'expériences dans le domaine de l'appareillage industriel et de la construction mécanique. Elle possède une équipe de techniciens compétents et dynamiques ayant les compétences nécessaires dans le domaine de la construction mécanique. Par ailleurs, cet atelier possède toutes les machines requises pour la fabrication mécanique et la construction d'appareillage. Ce sont les postes à souder entre autres électrique et oxyacétylénique, guillotine, meuleuse d'angle, rouleuse, tour, perceuse et autres outillages électroportatifs.

Par ailleurs, les matières d'œuvres nécessaires pour la construction de chaque élément de la construction sont entièrement fournies par la société même. Ce sont les métaux en feuille, les barres profilés, les tuyauteries et accessoires (coude, raccord union, té, mamelon, manchon, vanne...), les boulons nécessaires pour les joints de portes et les assemblages. La société met également à la disposition les matières consommables nécessaires durant la réalisation (électrodes de soudure, disques à tronçonner). Ainsi la société fournit tout l'appui technique durant la phase de conception, de réalisation et de mise en œuvre des appareillages nécessaires au projet.

Laboratoire d'expérimentation

L'entreprise ARTICOM possède également un laboratoire d'expérimentation, qui est utile pour la mise en marche et l'essai technique de l'installation. Ce laboratoire dispose de multiples appareils de mesure de grande précision, qui sont les thermomètres, la balance, l'anémomètre, le voltmètre, l'ampèremètre, le wattmètre, le compteur d'énergie, saccharimètre, vinomètre, En effet certains de ces appareils permettront de donner tous les résultats de mesures requis. Ainsi, ce travail est entièrement financé par l'entreprise ARTICOM. La conception d'une unité de distillation constitue la partie la plus importante de notre travail. Pour économiser plus de temps et de l'argent nous avons utilisé tous les éléments que notre atelier nous procure.

Dans cette quête notre unité sera constitué de :

- Une unité de chauffage
- Un bouilleur
- Un condenseur
- Une colonne de cinq (5) mètres de hauteur

CHAP V : LES ELEMENTS DE CONCEPTIONS D'UNE UNITE DE DISTILLATION

V.1 Unité de chauffage ou chaudière

Comme on l'a déjà dit juste au-dessus que nous avons utilisé des éléments que l'atelier nous fournissait, c'est le cas de notre unité de chauffage. Notre atelier possède déjà une chaudière que nous avons utilisée pour notre projet.

Nous l'avons un peu retouchée selon nos exigences comme par exemple nous avons monté sur le côté un niveau d'eau. Nous avons aussi adapté des tuyauteries pour la conduite d'eau et l'évacuation de la vapeur.

La disposition générale d'une chaudière est soit horizontale, soit verticale et la nôtre c'est une chaudière verticale mais nous l'avons modifiée en chaudière horizontale. La raison de cette modification étant simple c'est pour faciliter son assemblage avec le bouilleur.

Pour le foyer et le cheminé de notre chaudière nous avons maçonné pour les réaliser.

Combustion

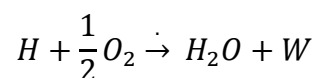
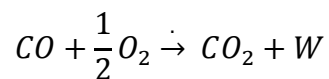
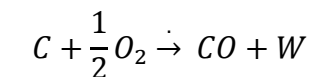
Notre source d'énergie sera des combustibles en bois ou plus précisément des copeaux de bois mais en général notre chaudière a la capacité de brûler tout qui peut l'être, c'est pourquoi nous allons faire un bref rappel sur la combustion.

a) Définition :

La combustion est définie comme l'oxydation des éléments d'un combustible par l'oxygène de l'air.



b) Réaction :



L'oxygène joue le rôle de comburant, il doit être mis en excès pour obtenir une combustion complète.

c) Les combustibles

a) Composition du bois combustible

[8]

CARBONE	50%
OXYGENE	43%
HYDROGENE	6%
CENDRES	1%

Tableau 3: composition du bois combustible

d) Caractéristique physiques des combustibles :

Pouvoir calorifique : I

[8]

C'est la quantité de chaleur produite par 1kg ou 1m³ de matières. Le pouvoir calorifique des bois est fonction de son humidité.

	Pouvoir calorifique [Kcal/Kg]
Bois frais	1950
Bois séché à l'air libre	3700
Bois séché au four	4500

Tableau 4: pouvoir calorifique

Pouvoir comburivore : V_A

C'est la quantité d'air nécessaire pour s'assurer d'une combustion complète.

$$V_A = \frac{1,01 \cdot I}{1000} + 1,65 [m^3]$$

Pouvoir fumigène : V_f

C'est la quantité de fumées produite lors d'une combustion complète dans les conditions normales.

$$V_f = \frac{0,89 \cdot I}{1000} + 1,65 [m^3]$$

Remarque :

Dans les conditions normales on a :

Température=0°C ;

Pression=760mmHg ;

Volume molaire=22034m³/Kmol

e) **Matériaux utilisés**

MATERIAUX	CARACTERISTIQUES	QUANTITES
Tube noir	Ø : 32mm	2000mm
Tube en verre	Ø : 15mm	24mm
Té galvanisé	20/27	1 pièce
Réduction galvanisé	20/27	1 pièce
vanne	20/27	1 pièce
Bouchon galvanisé	20/27	1 pièce
coude galvanisé	20/27	2 pièces
coude galvanisé	15/21	1 pièce

Tableau 5: Matériaux utilisés pour la chaudière

V.2 Bouilleur

Comme l'on a précisé depuis le début que c'est l'appareil destiné à effectuer une vaporisation partielle des fonds de colonnes de distillation. C'est donc l'appareil destiné à vaporiser notre jus fermenté. Il est relié avec la chaudière à l'aide d'une tuyauterie qu'on a adapté à ce dernier pour la sortie de la vapeur.

a) **Dimensionnement :**

Le bouilleur que nous allons concevoir est envisagé à une capacité d'environ 175 litres.

• **Calcul préliminaire de dimensionnement**

Principe de RHUSTON :

[7]

Ce principe consiste en un dimensionnement assurant à la fois l'efficacité et le minimum de dépense de tôles tel que le diamètre D de la cuve est égale à sa hauteur H.

Soient :

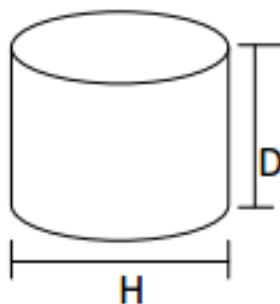


Figure 17: Principe de Rhuston

S_t : la surface totale de la cuve

S_l : la surface latérale

S_1 et S_2 : la surface respective du fond et de la couvercle

On a :

$$S_t = S_l + S_1 + S_2 \quad (5.1)$$

Avec

$$S_l = 2\pi.R.H \text{ et } S_1 = S_2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

En rapportant ces expressions dans l'équation (5.1), on a : (5.2),

$$S_t = \pi.D.H + \frac{\pi D^2}{2} \quad (5.2)$$

Or, le volume du cylindre est :

$$V = \frac{\pi D^2}{4}.H \quad (5.3)$$



$$H = \frac{4V}{\pi D^2}$$

En introduisant cette expression de H dans (5.2), on obtient :

$$S_t = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D}$$

Si on veut que la cuve ne subisse aucune déformation, on doit avoir $\frac{dS_t}{D} = 0$

$$\pi D - \frac{4V}{D^2} = 0$$

$$V = \frac{\pi D^3}{4} \quad (5.4)$$

En égalisant (5.4) et (5.3) :

$$V = \frac{\pi D^3}{4} = \frac{\pi D^2}{4}.H$$

On obtient

$$D = H$$

Cette condition n'est pas suffisante pour le cas d'un alambic. Il faut prendre en considération les mouvements des vapeurs :

- Mouvement ascendant
- Mouvement descendant

Par conséquent, on a la condition approximative suivant :

$$0,8 \leq \frac{H}{D} \leq 1,5$$

b) Matériaux utilisés :

MATERIAUX	CARACTERISTIQUES	QUANTITES
Tôle inox	Epaisseur : 2mm	1400 x 1200
Tube inox	Ø : 17mm	24 pièces
Tube inox	Ø : 30mm	1000mm
Tube en verre	Ø : 15mm	24mm
T galvanisé	20/27	3 pièces
Réduction galvanisé	20/27	2 pièces
vanne	20/27	2 pièces
Bouchon galvanisé	20/27	1 pièce

Tableau 6: Matériaux utilisés pour le bouilleur

manipulations	caractéristiques	Machine et outils	Matériaux et divers
découpage	Couvercle Diamètre : 300mm	Meule, compas, marteau, mètre	Tôle inox Epaisseur : 2mm
roulage	Corps cylindrique Diamètre : 300mm Hauteur : 1450mm	rouleuse	Tôle inox Epaisseur : 2mm
assemblage	Soudure	Soudure électrique	Electrode safinox 2,5 et 3,15

Tableau 7: Manipulation pratiqué pour le bouilleur

Comme les tubes inox de diamètre 17mm et de longueur 1100mm ont été déjà adaptés pour un ancien bouilleur donc nous l'avons plus fait aucune modification. Dans ce cas nous avons adapté son couvercle selon la longueur et la hauteur de ces tubes. Ainsi nous avons convenu au dimensionnement suivant :

Diamètre : 400mm

Hauteur : 1400mm

Ce qui équivaut à un volume de 175 litres. Si l'on veut que le cylindre ne subisse pas de déformation selon le calcul obtenu le rapport entre la hauteur et le diamètre doivent être comprise entre :

$$0,8 \leq \frac{H}{D} \leq 1,5$$

Ce qui n'est pas le cas de notre cylindre, c'est pour cela que nous avons choisi une tôle inox d'épaisseur de 2mm.

Comme la rouleuse de notre atelier ne peut rouler qu'une tôle de 1200mm de hauteur qui est inférieur à la hauteur de notre cylindre. Ce qui nous oblige à rouler notre tôle en deux temps, en premier temps 1200 et en deuxième temps 250mm et les assemblées par soudure après. En combinant tout cela nous obtenons ainsi la photo suivante :



Photo 1: bouilleur



- 1 : vanne de vidange de jus
- 2 : voyant niveau de jus
- 3 : vanne d'entrer du jus
- 4 : début de la colonne

V.3 Condenseur :

Pour notre projet, nous avons besoin de deux condenseurs :

Condenseur 1: condenseur pour le reflux

Condenseur 2: condenseur final

Comme le cas de notre chaudière, notre atelier disposait déjà d'un condenseur dont les caractéristiques sont les suivantes :

Hauteur : 440mm

Diamètre : 190mm

Nous avons employé ce condenseur pour le condenseur final et pour le condenseur de reflux nous avons utilisé un serpentín que notre atelier à utiliser pour condenser de l'huile.

Pour le condenseur les travaux que nous avons à faire c'est de concevoir les conduits d'eau et la tuyauterie qui le relie avec la colonne.

Pour la tuyauterie nous avons utilisé un tube inox de 60mm de diamètre

Pour les conduits d'eau nous avons besoin des matériaux suivants :

MATERIAUX	CARACTERISTIQUES	QUANTITES
Tube ppr	20/27 (4m)	4pièces
Coude galvanisé	20/27	8 pièces
Manchon galvanisé	20/27	5 pièces
vanne	20/27	1 pièce
Vanne	15/21	2 pièces
Réduction galvanisé	20/27	2 pièces
Raccord union galvanisé	20/27	1 pièce

Tableau 8:Matériaux utilisés pour le condenseur

manipulations	Machine et outils	Matériaux et divers
filetage	Filière ¾ pouce et ½ pouce	Tube ppr 20/27 Tube ppr 15/21
coupage	Meule, mètre	Tube inox de 60mm de diamètre
assemblage	Soudure électrique	
	Clé à griffe	Coude galva 20/27, manchon galva 20/27, réduction galva 20/27, raccord union 20/27

Tableau 2: Manipulation pratiqué pour le condenseur

Bien sûr des coudes, des manchons, des réductions en ppr seraient le plus approprié pour assembler ces tubes en ppr mais pour ça il faut avoir un polyfuseur ; ce qui n'est notre cas. Dans ce cas, il faut fileter les tubes en ppr à l'aide d'une filière et c'est pour cela que nous avons choisi des coudes, des manchons, des réductions galvanisés.

Nous avons adopté la circulation à contre – courant comme la figure suivante :

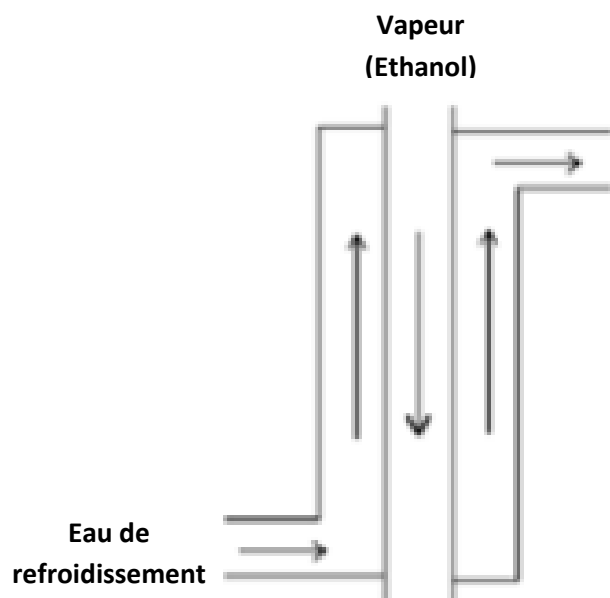
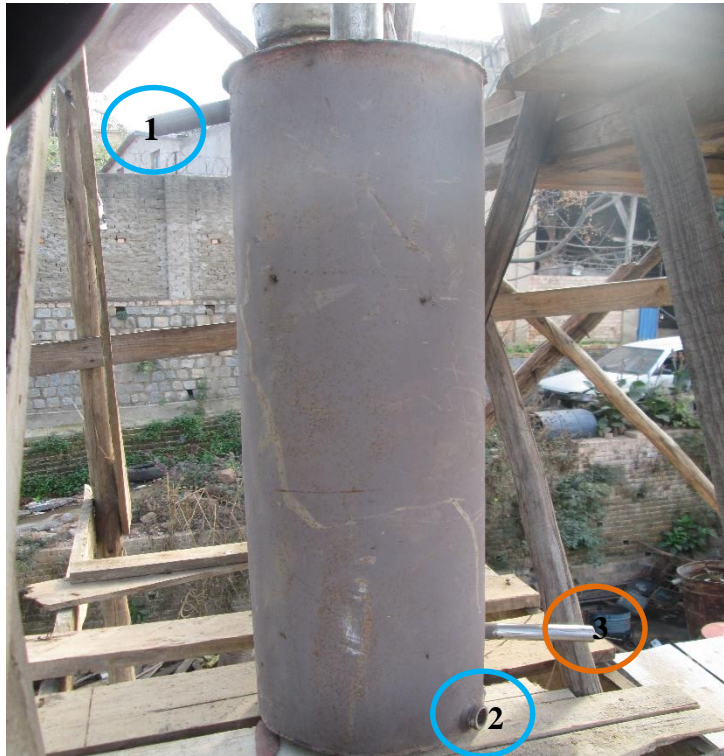


Figure 18:Condenseur à contre-courant

Pratiquement nous avons obtenu ceci :



- 1 : sortie d'eau
- 2 : entrée d'eau
- 3 : sortie d'alcool

Photo 2:condenseur final

V.4 Colonne :

Tout au début de notre étude nous avons envisagé de faire une colonne de deux mètres de hauteur et de comparer le résultat obtenu avec une autre colonne de quatre mètres. Et faire ainsi une interpolation des valeurs obtenues pour savoir quelle est la hauteur de la colonne nécessaire pour avoir de l'éthanol distillé à 90°GL. Nous avons alors découpé un tube inox de 170mm de diamètre et de cinq (5) mètres de hauteur en deux tubes de deux mètres et un tube d'un mètre.

Nous avons adapté à chaque extrémité une bride pour les reliés les uns les autres. En bas une bride trouée qui forme ainsi un genre de plateau.

Caractéristique de la bride :

Forme : disque

Diamètre intérieur : 170mm

Diamètre extérieur : 240mm

Pour fixer les brides entre eux, nous l'avons percé sur une fraiseuse avec un foret de 10. Nous avons percé 4 trous disposés de 90° de part et d'autre.

manipulations	caractéristiques	Machine et outils	Matériaux et divers
découpage	Couvercle Diamètre : 200mm	Meule, compas, marteau, mètre, burin	Tôle inox Epaisseur : 0,5mm Epaisseur : 2mm
roulage	Corps cylindrique Diamètre : 200mm	rouleuse	Tôle inox Epaisseur : 2mm
perçage	dint=170mm Diamètre trou=10	Tour, Perceuse à colonne, foret de 10	Tôle inox Epaisseur : 3mm
tournage	-Disques dext=240mm dint=170mm épaisseur=3mm	Tour	
surfaçage	Plat, lisse épaisseur=3		
assemblage	Soudure Vice écrou	Soudure électrique Clé 17	Electrode safinox 2,5 et 3,15
	joint		Carton spécial joint Colle noir

Tableau 30: Manipulation pratiqué pour la colonne

Elément constitutif de la colonne : Notre colonne est une colonne de type à garnissage.
Nous avons utilisé des anneaux dérivés de l'anneau de Raschig.



Photo 3: la colonne de rectification avec l'échafaudage nécessaire pour son assemblage

CHAP VI : LES MATIERES PREMIERES DE LA DISTILLERIE ET LA FERMENTATION ALCOOLIQUE

VI.1 Les matières premières de la Distillerie

[1]

L'alcool peut être produit par synthèse à partir de plusieurs réactifs. De nos jours, il est surtout produit par fermentation des sucres :

On classe les matières premières comme suit :

a) **Matières sucrées :**

Ce sont les matières contenant des sucres fermentescibles ou conduisant par hydrolyse à des sucres fermentescibles qui sont généralement :

- Les fruits
- Les racines sucrées : les betteraves
- Les tiges : canne à sucre ; sorgho ; maïs ;....
- Les tubercules : topinambour
- Les feuilles : agaves

Il arrive parfois qu'on ajoute du sucre à la matière première pour améliorer le rendement.

b) **Matières amylacées :**

Ce sont les matières contenant de l'amidon, qui sous l'action d'une solution acide ou de diastase peut être hydrolysé et se transforme en glucose ou maltose qui sont fermentescibles.

Ce sont :

- Les grains
- Certains tubercules et rhizomes : pomme de terre ; manioc ;....

c) **Matières cellulosiques :**

Contenant des celluloses qui, par hydrolyse, conduisent aussi à des glucoses fermentescibles : bois ; tiges annuelles ; résidus végétaux...

On constate que les matières sucrées sont les plus faciles à travailler, il suffit d'une extraction de sucre soluble dans l'eau pour préparer le mout alors que les matières amylacées exigent, pour leur hydrolyse, l'emploi de procédés spéciaux, conduisant en général à un accroissement des frais de fabrication, de la dépense en combustible, et de l'appareillage.

De plus, les matières amylacées sont au premier chef alimentaires.

En outre, les matières cellulosiques exigent une technique encore plus délicate pour leur saccharification.

VI.2 La fermentation alcoolique

a) Objectif :

Il consiste à transformer les sucres fournis par l'unité de fermentation en éthanol.

b) Définitions :

b.1 Moût

On appelle moût le liquide contenant une quantité suffisante de nutriments indispensables à la vie de la levure.

b.2 Nutriments

On appelle nutriment les aliments simples qui peuvent être assimilés directement par l'organisme sans modification comme les glucides, les protéides, les lipides,...

➤ Les glucides

Ils apportent à la cellule un aliment indispensable, fournisseur d'énergie, qui est le carbone. Il s'agit de la grande famille de sucre : glucose ; amidon ;...

➤ Les protéides

Ils fournissent de l'azote qui est le matériau constitutif de la cellule. Ils sont constitués d'acides aminés qui se lient pour donner des peptides, polypeptides, protéines. Seuls les acides aminés seront assimilables par la levure.

➤ Les lipides

Les lipides présents dans la levure sont sécrétés par la cellule elle-même et il est recommandé d'éliminer les matières grasses, puissantes anti-mousse, présentes dans le mout.

➤ Autre aliment : le bios (sels et divers)

Ce dernier réunit l'ensemble d'éléments minéraux et organiques indispensables à la nutrition de la cellule. Ce sont des oligo-éléments (ion de phosphore, soufre, sodium, potassium, fer, cuivre, etc...), des vitamines et des facteurs de croissances non synthétisables par la levure.

b.3 Ferments

D'une façon générale, les ferments sont des substances produites par les cellules vivantes (levures) et agissent en catalyseur lors de la réaction de fermentation.

Les ferments sont aussi dénommés « enzymes » ou « diastases ».

Ce sont de véritables catalyseurs biochimiques provenant :

- des cellules végétales
- des grains en germination « malt » utilisés pour saccharifier l'amidon
- des micro-organismes

c) Levures :

Plusieurs types de levures sont connus de par le monde mais c'est le *Saccharomyces cerevisiae* qui nous intéresse le plus à cause de ses nombreux avantages :

- C'est le plus utilisé
- Facile à se procurer
- Pas cher
- Taux de production en alcool de 65 % environ
- Assez résistant
- Production d'alcool à une température presque ambiante (20 à 25 °C)
- Possibilité de produire jusqu'à 13°GL d'alcool

d) Conditionnement de la fermentation :

Pour que la reproduction des cellules et la fermentation se déroule normalement, il faut que le mout présente :

- Une acidité convenable : pH 4 à 6
- Température adéquate avec le type de levure :
 - Levures à fermentation basse : 6 à 12 °C
 - Levures à fermentation haute : 15 à 25 °C
- Une teneur en oxygène dissout d'au moins 6 mg/L

VI.3 Appareil de mesure d'alcool

Le densimètre (également appelé selon l'utilisation aréomètre d'Antoine Baumé (1728-1804) ou alcoomètre de Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) a pour fonction, comme son nom l'indique de mesurer la densité d'un liquide ou d'un mélange et par là d'en déduire une indication sur sa composition.

Son principe repose sur l'application du théorème d'Archimède, la poussée qu'il subit étant numériquement égale au poids de liquide correspondant au volume immergé. Si V est ce volume et m la masse du densimètre, nous avons à l'équilibre $m = \rho_{liq} \cdot V$ où ρ_{liq} est la masse volumique du liquide.

Plus le liquide est dense, moins le volume immergé est grand, ce qui permet d'atteindre la masse volumique ou une densité à partir des graduations portées sur la tige. L'alcoomètre représenté ci-contre est gradué en degrés Gay-Lussac. Ce dernier, suite à une demande de l'Etat visant à rendre la taxation des alcools possibles, a défini le degré alcoolique de la façon suivante : « La force d'un liquide spiritueux est le nombre de centièmes, en volume, d'alcool pur que ce liquide renferme à la température de 15° centigrades ». Ainsi, à 15°C, 0 degré GL correspond à de l'eau pure et 100 degré GL à de l'alcool pur. Une bouteille de 0,75 L de vin à 12 degrés GL contient donc 90 ml d'alcool.

Il est aujourd'hui recommandé d'indiquer la quantité d'alcool en pourcentage du volume, 1 degré GL équivalant à 1% vol.

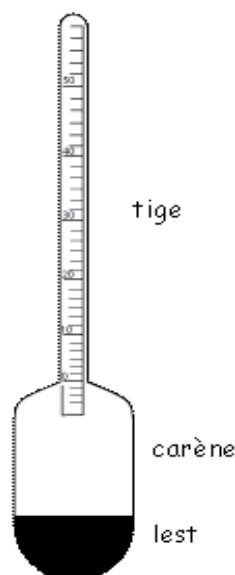


Figure 19:alcoomètre

Dans notre expérimentation nous avons utilisé une levure à fermentation haute c'est-à-dire température comprise entre 15 à 25°C. Ce qui nous a obligés à fabriquer un caisson en bois pour conserver le jus à une température environnant de 20°C. Nous disposons d'un fût bleu que nous avons muni d'un tuyau d'évacuation de gaz barboté dans de l'eau.



Photo 4: fût avec son caisson

Et pour la rendre plus acide on a ajouté un peu d'acide sulfurique. Nous avons utilisé le « paper dosatest » pour savoir son pH. Son utilisation étant simple, il faut tout simplement tremper le petit papier dans la solution à tester, attendre qu'il vire de couleur et le comparer au code de couleur collé sur l'étiquette.

L'image suivant illustre mieux ces dires :

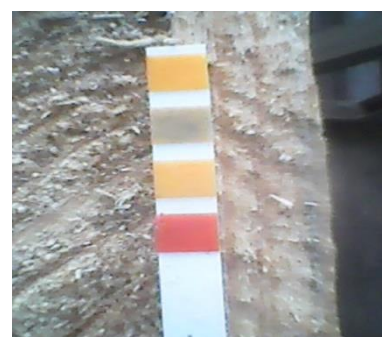


Photo 5: Paper dosatest

En comparant la couleur du papier obtenu avec celui de l'étiquette on voit que la solution a un pH entre 4 et 5 ce qui convient à notre conditionnement de fermentation.

Nous avons rempli le fût bleu de 175 litres d'eau puisqu'on n'a ni le temps ni les moyens de faire du jus de canne à sucre ou du jus de la sorte. On a alors utilisé de l'eau sucré et selon le tableau suivant on a pris la teneur de 100g/L.

Taux de sucre [g/L]	0	20	40	60	80	100	120	150
°GL	3	6,5	8	9	10,5	11	9	8,5

Tableau 4: Taux d'alcool en fonction du sucre ajouté [11]

Nous avons donc besoin de 17,5Kg de sucre blanc pour notre eau de 175litres. Pour savoir si la fermentation est terminée il faut tester le taux de sucre de la solution.

CHAP. VII : LA DISTILLATION

Tout au début de notre étude nous avons envisagé de faire une colonne de deux mètres de hauteur et de comparer le résultat obtenu avec une autre colonne de quatre mètres. Et faire ainsi une interpolation des valeurs obtenues pour savoir quelle est la hauteur de la colonne nécessaire pour avoir de l'éthanol distillé à 90°GL. Mais au fil de notre expérience nous avons constaté que nous manquons de moyen pour faire cette étude comparative. Alors nous avons tout simplement fait qu'un seul teste avec la colonne entière (5 mètres de hauteur).

Pour l'assemblage de tous les éléments de conception la mise en place d'un échafaudage est indispensable. Pour cela, nous avons utilisé des bois rond de six mètres de hauteur et des planches.

Après avoir monté les différentes parties de notre appareil, nous avons effectué d'abord un test pour détecter les éventuelles fuites.

Pour cela nous avons relié la sortie de vapeur de la chaudière à l'entrée de jus du bouilleur, dans le but de faire circuler de la vapeur dans la colonne tout entière jusqu'au condenseur final. Ce qui a été fructueux car nous avons pu voir tous les fuites possible que nous avons bien sur corrigé sur place.

VII.1 Les étapes à suivre

Quand le taux de sucre dans la fermentation est nul c'est qu'il n'y a plus d'échange possible alors la fermentation est achevée, nous pouvons maintenant passer à la distillation.

- Pour commencer mettre en marche la chaudière que nous avons déjà remplie d'eau.
- On introduit le jus fermenté dans le bouilleur.
- Il faut maintenant fermer les vannes d'alimentation en eau du condenseur jusqu'à ce que la première goutte d'alcool sorte du condenseur final.
- C'est quand il y a présence de vapeur au condenseur final qu'il faut ouvrir la vanne d'alimentation en eau du condenseur.
- Assurer que la température de la tête de la colonne soit au environ de 75°C

VII.2 **Résultat :**

Nous avons commencé l'essayage à 11h30mn c'est-à-dire nous commençons à allumer le feu de la chaudière. La chaudière doit toujours être alimentée en combustible.

11h30mn : début

12h55mn : l'eau de la chaudière entre en ébullition c'est-à-dire que nous avons de la vapeur saturée.

13h10mn : nous constatons de l'eau chaude sortir du bouilleur nous pouvons en déduire alors que l'eau de la chaudière entre dans la phase de vapeur surchauffée.

13h30mn : la colonne commence à s'échauffer, ce qui veut dire que les éléments les plus volatils de notre mélange s'évaporent.

13h50mn : la première goutte d'alcool sort du condenseur final.

14h00mn : nous avons obtenu un litre d'alcool 90°GL

VII.3 **Problème rencontrés et solutions requises:**

Problèmes rencontrés	Solution requise
La chaudière doit toujours être alimentée en combustible	Ce qui nécessite la présence d'une personne près du foyer. Il faut qu'il y ait abondance de combustible
Présence de vapeur d'eau à la sortie d'eau du bouilleur Surface d'échange insuffisant	Augmenter la surface d'échange
Nous n'avons pas pris en compte certain facteur comme le vent qui a interposé dans le rôle du condenseur. Tête de la colonne très froide	Il faut recouvrir la colonne avec un emballage spécial. Il faut aussi qu'il y ait un thermomètre à la tête de la colonne. Utiliser un régulateur de température pour que la température de la tête de la colonne reste stable c'est-à-dire au environ de 75°C

Tableau 5: Problèmes et solutions requises

Calcul de la surface d'échange

Evolution des températures le long du condenseur. Le long du condenseur, la température de la vapeur reste constante tout comme la pression pendant le changement de phase, ainsi, on

considère le condenseur comme idéal ou la condensation commence dès l'entrée et se poursuit jusqu'à la sortie de l'appareil. Pratiquement ; cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée.

On a la formule suivant qui est déjà énoncé dans la première partie :

$$\phi = \frac{(\theta_1 - \theta_2)S}{\frac{R_i}{\lambda} \text{Log} \left(\frac{R_e}{R_i} \right)}$$

Φ : flux de chaleur

λ : conductivité thermique du corps cylindrique

R_e : rayon externe du cylindre

R_i : rayon interne du cylindre

L : longueur du cylindre

Θ_1 : température moyenne sur la paroi interne du cylindre

Θ_2 : température moyenne sur paroi externe du cylindre

Analytiquement :

Comme à la sortie d'eau du bouilleur on a eau plus vapeur, nous avons donc estimé que la température est environnant de 60°C qui est la température intérieure du tube

Et $S = 2\pi R_i L \times 24 = (2\pi \times 8,5 \times 1150) \times 24 = 1474628,57 \text{ [mm}^2\text{]} \text{ ou } 0,015 \text{ [m}^2\text{]}$

$$\phi = \frac{(60 - 20)0,015}{\frac{8,5 \times 10^{-4}}{40} \text{Log} \left(\frac{9}{8,5} \right)}$$

Or on veut qu'à la sortie on a que de l'eau ce qui correspond à une température de 40°C.

On a donc :

$$\phi = \frac{(40 - 20)S}{\frac{8,5 \times 10^{-4}}{40} \text{Log} \left(\frac{9}{8,5} \right)}$$

$$\phi = \frac{(40 - 20)S}{\frac{8,5 \times 10^{-4}}{40} \text{Log} \left(\frac{9}{8,5} \right)} = \frac{(60 - 20)0,015}{\frac{8,5 \times 10^{-4}}{40} \text{Log} \left(\frac{9}{8,5} \right)}$$

$$(40 - 20)S = (60 - 20)0,015$$

$$S = \frac{(60 - 20)0,015}{(40 - 20)}$$

$$S = 0,03[m^2] \text{ ou } 3000000[mm^2]$$

Ce qui est équivalent à 48 tubes de même caractéristique.

D'où on doit, pour accroître la surface d'échange, augmenter le nombre de tube inox de 24 pièces pour que ça soit suffisant.

VII.4 Rôle de l'alcool 90°GL sur le vin:

L'alcool joue un rôle fondamental sur différents plans : sur le plan organoleptique, sur le plan biologique, sur le plan commercial et sur le plan écologique.

a. Sur le plan organoleptique :

Sur le plan organoleptique, il contribue à donner du corps au vin, de telle sorte qu'un vin caractérisé par un déficit en alcool paraît dilué, aqueux ; par ailleurs, il contribue à donner du moelleux en bouche, de l'ampleur et du volume ; enfin, par sa propriété pseudo-thermique il apporte une certaine chaleur en bouche allant jusqu'au caractère brûlant s'il est en excès par rapport aux autres composants jouant sur l'expression organoleptique.

b. Sur le plan biologique :

Sur le plan biologique, il joue un rôle capital quant à la stabilité microbienne des vins : plus le vin est riche en alcool, plus sa résistance à la contamination microbienne est élevée et plus son potentiel de garde est accru. Cela, en raison de son pouvoir antiseptique à la fois sur les levures et sur les bactéries. Ainsi, les vins de faible titre alcoométrique sont-ils au contraire plus vulnérables et doivent-ils être davantage protégés.

c. Sur le plan commercial

Sur le plan commercial, le taux d'alcool fait l'objet de deux courants opposés d'origine historique et culturelle. Traditionnellement, la rémunération des apports de raisin en cave coopérative ainsi que la fixation des prix sur le marché du négoce sont basées sur le « degré hecto » ; en conséquence le prix du vin est proportionnel à son taux d'alcool : ainsi, dans une catégorie de vin donnée, plus le vin est alcoolisé, plus son prix est élevé. On retrouve cela,

bien que moins explicité, dans les gammes de vin : de façon générale, plus on monte dans la gamme, plus le degré d'alcool s'élève et plus le prix de vente s'élève aussi.

d. Sur le plan écologique

Comme le cas de Madagascar, actuellement l'Etat Malgache lance une nouvelle politique sur le plan écologique en vue de la protection de l'environnement. Pour radier l'utilisation abusive du charbon qui est la première source de la déforestation à Madagascar ; l'Etat Malgache incite la population à utiliser l'éthanol comme combustible au lieu d'utiliser le charbon de bois.

VII.5 Table de dilution d'alcool ou table de Gay-Lussac

Pour lire le tableau : la table indique qu'il faut ajouter 105,34 ml d'eau à 100 ml d'alcool à 90° GL pour obtenir de l'alcool à 45°GL.

		CONCENTRATION INITIALE													
CONCENTRATION FINALE		100	99	98	97	96	95	90	85	80	75	70	65	60	50
	95	6,5	5,15	3,83	2,53	1,25									
	90	13,25	11,83	10,43	9,07	7,73	6,41								
	85	20,54	19,05	17,58	16,15	14,73	13,33	6,56							
	80	28,59	27,01	25,47	23,95	22,45	20,95	13,79	6,83						
	75	37,58	35,9	34,28	32,67	31,08	29,52	21,89	14,48	7,2					
	70	45,75	45,98	44,25	42,54	40,85	39,18	31,05	23,14	15,35	7,64				
	65	59,37	57,49	55,63	53,81	52	50,22	41,53	33,03	24,66	16,37	8,15			
	60	72,82	70,8	68,8	65,85	64,92	63	53,65	44,48	35,44	26,47	17,58	8,86		
	55	88,6	86,42	84,28	82,16	80,06	77,99	67,87	57,9	48,07	38,32	28,63	19,02	9,47	
	50	107,4	105,08	102,75	100,44	98,15	95,89	84,71	73,9	63,04	52,43	41,73	31,25	20,47	
	45	130,3	127,67	125,11	122,57	120,06	117,57	105,34	93,3	81,38	69,54	57,78	46,09	34,46	11,41
	40	158,6	155,68	152,84	150,02	147,22	144,46	130,8	117,34	104,01	90,76	77,58	64,48	51,43	25,55
	35	194,6	191,39	188,19	185,01	181,85	178,71	163,28	148,01	132,88	117,82	102,84	87,93	73,08	43,59
	30	242,4	238,67	234,99	231,33	227,7	224,08	206,22	188,57	171,05	153,61	136,04	118,94	101,71	67,45
	25	308,9	304,52	300,18	295,86	291,56	287,28	266,12	245,15	224,3	203,61	182,83	162,21	141,65	100,73
	20	408,5	403,13	397,79	392,47	387,17	381,9	355,8	329,84	304,01	278,26	252,58	226,98	201,43	150,55
	15	574,8	567,43	560,63	553,55	546,59	539,66	505,27	471	436,85	402,81	368,83	334,91	301,07	233,64
	10	907,1	896,73	886,4	876,1	865,15	855,15	804,5	753,65	702,89	652,21	601,6	551,06	500,5	399,85

Tableau 6:table de dilution d'alcool ou table de Gay Lussac

PARTIE III

EVALUATIONS ECONOMIQUES
ET REGARD SUR L'IMPACT
ENVIRONNEMENTALE

CHAP. VIII EVALUATIONS ECONOMIQUES

Dans ce chapitre, nous allons évaluer la rentabilité de l'exploitation d'une unité de colonne de rectification d'alcool par la méthode T.R.I.

VIII.1 Devis de confection des appareils

a) Chaudière

- Capacité : 100 litres
- Type : cylindrique
- Pression de vapeur : 2 bars

Prix des matériels	1 500 000 [Ar]
Mains d'œuvres	200 000 [Ar]
TOTAL	1 700 000 [Ar]

Tableau 7:devis chaudière

b) Bouilleur

- Capacité : 175 litres
- Type : cylindrique

Prix des matériels	1 400 000 [Ar]
Mains d'œuvres	200 000 [Ar]
TOTAL	1 600 000 [Ar]

Tableau 8: devis bouilleur

c) Condenseur

- Capacité : 12 litres
- Type : cylindrique
- Type : tubulaire à serpentin

Prix des matériels	800 000 [Ar]
Mains d'œuvres	100 000 [Ar]
TOTAL	900 000 [Ar]

Tableau 9:devis condenseur

d) Colonne

- Capacité : 100 litres
- Type : cylindrique

Prix des matériels	2 200 000 [Ar]
Mains d'œuvres	500 000 [Ar]
TOTAL	2 700 000 [Ar]

Tableau 10:devis colonne

e) Coût total des appareillages

	Prix [Ar]
Chaudière	1 700 000
Bouilleur	1 600 000
Colonne	2 700 000
Condenseur	900 000
TOTAL	6 900 000

Tableau 11:coût total des appareillages

VIII.2 Coût d'extraction

On engage 2 employés dont la rémunération est 2 200 Ar / pers / jour.

Considérons qu'un mètre cube de copeau de bois est de 2 000 Ar.

Main d'œuvre	4 400 [Ar]
Combustibles	10 000 [Ar]
Conditionnement	2 000 [Ar]
TOTAL	16 400 [Ar]

Tableau 19:devis du coût d'extraction

VIII.3 ETUDE DE FAISABILITE

a) Le cash-flow brut annuel

Considérons que le taux d'inflation annuelle est de 4%.

L'unité est opérationnelle 10 [h/j] à raison de 5 procédés/semaine, ce qui peut donner 50 litres par jour. En une année, pour 250 jours ouvrables, estimons qu'on a extrait 12 500 litres d'éthanol. Le prix local d'un litre étant d'environ Ar 3 000. Nous allons baser l'étude de rentabilité à partir de ces données.

Soit Ar 2 200 le kilo du sucre, le besoin journalier est de 40 kg.

$$\text{C.F} = \text{Ar } 12\,500 * 3\,000$$

C.F brut = Ar 37 500 000 pour une année

Grandeurs caractéristiques de gestion dans 5ans

On a par évaluation :

- les frais d'entretien à 5 % des investissements
- les taxes et assurances à 2 % des investissements par an
- les imprévus à 30 % des investissements
- les ouvriers temporaires à 25 % du salaire des ouvriers permanents

- **Les taxes sur les valeurs ajoutées (TVA)** cf. Tableau 20

$$TVA = 20 \% C.A - TVA \text{ déductible}$$

$$TVA = 20 \% C.A - 20 \% (\text{Mat. Premières} + \text{Diff. Consommations} + \text{Imprévus})$$

- **Impôt générale sur les revenus (IGR)** : estimé à Ar 15 000 / an
- **Taxe professionnel** : Ar 160 000 (**Forfaitaire**)
- **Charge du personnel** : salaire, gratification, prime, avantages, OSTIE, CNaPS...cf. Tableau 21
- **Excédent brut d'exploitation (EBE)** cf. Tableau 22
$$EBE = \text{Valeur ajoutée} - (\text{Impôt et taxe} + \text{Charge du personnel})$$
- **Durée de vie probable de l'appareil (DVP)** : 5 ans

Dans 5 ans, l'équipement devrait être amorti.

$$T = 100 / DVP$$

$$T = 20 \% (\text{Taux d'amortissement})$$

Ce qui donne l'annuité d'amortissement de l'exercice par an : Ar 1 380 000

- **Résultat d'exploitation** :

$$EBE - (\text{Annuité d'amortissement de l'exercice} + \text{Provision})$$

- **Résultat financier** :

$$R F = \text{Produits financiers} - \text{Charges financières}$$

Produits financiers = 0

Charges financières = Partie remboursée à la Banque par l'emprunteur

Soit à emprunter initialement Ar 7 000 000 avec un intérêt $i = 18\%$ à rembourser dans 3 ans

- **Impôt sur les bénéfices (IBS)** : évalué à 35 % du résultat de l'exercice.

b) Rentabilité du projet

- i. Le temps de remboursement ou POT (Pay Out Time)

$$\text{On a : } POT = \frac{I}{B(1-a)+A} \text{ ou } POT = \frac{I}{CF}$$

Avec

I : investissement (capital amortissable)

B : bénéfice bruts annuels

a : taux d'imposition sur les bénéfices

A : amortissement annuel constant

Ce qui donne $POT = 0,53 \text{ ans} = 6 \text{ mois } 11 \text{ jours}$

Le temps de remboursement est environ six mois et demi.

C'est-à-dire qu'au bout de ce temps, les revenus dégagés permettent de récupérer le montant de l'investissement.

- ii. Rentabilité globale

Taux de rentabilité = Bénéfice net / Investissement

Bénéfice net = Ar 18 769 733

Investissement = Ar 20 000 000

Ce qui donne : Taux de rentabilité = 0,93

- iii. Le taux de rentabilité interne (TRI)

$$VAN = \sum_{n=1}^5 \frac{CF}{(i+1)^n} - (\text{Valeur résiduelle} + I_0)$$

$I_0 = \text{Emprunt } (i_0 + 1)$

$I_0 = \text{Ar } 8\,260\,000$

Le TRI est la valeur de i qui annule la VAN où i_r est la solution de l'équation :

$$-I_0 + \sum_{p=1}^n \frac{(CF)_p}{(1 + i_r)^p} = 0$$

Dans notre cas, on trouve :

$$i_r = 23,6 \text{ ou } 0,24 \geq 0,18$$

TRI de l'entreprise \geq Taux de la banque

L'investissement est rentable

Les tableaux suivant ont comme unité l'ariary .

année	1	2	3	4	5
appareillage	6 900 000	0	0	0	0
matières premières	22 000 000	22 880 000	23 566 400	24 273 392	25 001 594
extraction	4 100 000	4 264 000	4 434 560	4 611 942	4 796 420
entretien	345000	358 800	373 152	388 078	403 601
assurance	440000	457 600	475 904	494 940	514 738
différentes consommations	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000
provisions	3 000 000	2 000 000	2 000 000	3 000 000	3 000 000
imprévus	207 000	207 000	207 000	207 000	207 000
ouvriers permanents	1 100 000	1 100 000	1 100 000	1 100 000	1 100 000
ouvriers temporaires	275 000	275 000	275 000	275 000	275 000

Tableau 12: Les différentes charges financières de l'exploitation

Soit Ar 2 200 le kilo du sucre, le besoin journalier est de 40 kg. Et en une année, pour 250 jours ouvrables

matière première = $40 \times 2200 \times 250$ Et cela augmente suivant les années qui se succèdent dû à la fluctuation.

- les taxes et assurances à 2 % des investissements par an
- les frais d'entretien à 5 % des investissements
- les ouvriers temporaires à 25 % du salaire des ouvriers permanents

année	1	2	3	4	5
T.V.A	2 658 600	2 482 600	2 345 320	2 203 922	2 058 281

Tableau 13: T.V.A

année	1	2	3	4	5
charge totale	2 600 000	2 704 000	2 812 160	2 924 646	3 041 632

Tableau 14: Charge totale du personnel

année	1	2	3	4	5
T.V.A	2 658 600	2 482 600	2 345 320	2 203 922	2 058 281
EBE	34 725 000	34 621 000	34 512 840	34 400 354	34 283 368

Tableau 15:E.B.E

année	1	2	3	4	5
produit de l'exercice	37 500 000	39 000 000	40 560 000	42 182 400	43 869 696
valeur ajouté	7 658 600	2 482 600	2 345 320	2 203 922	2 058 281
EBE	34 725 000	34 621 000	34 512 840	34 400 354	34 283 368
résultat financière	-2 753 333	-2 753 333	-2 753 333	0	0
résultat d'exploitation	30 345 000	31 241 000	31 132 840	30 020 354	29 903 368
consommation intermédiaire	2 775 000	4 379 000	6 047 160	7 782 046	9 586 328
résultat de l'exercice avant l'IBS(bénéfice brute)	27 591 667	28 487 667	28 379 507	30 020 354	29 903 368
résultat net	17 934 584	18 516 984	18 446 680	19 513 230	19 437 189

Tableau 16:compte de résultat en liste

benefice net	18 769 733
---------------------	-------------------

bénéfice net = moyenne(résultat net)

CHAP. IX REGARD SUR L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

IX.1 Introduction

a. Définition :

Selon la charte de l'Environnement Malagasy, l'environnement est l'ensemble des milieux naturels et artificiels y compris les milieux humains et les facteurs sociaux, économiques et culturels qui intéressent le développement national.

b. Les éléments de l'environnement

L'environnement est constitué de deux composantes principales :

- Les composantes biophysiques comme les eaux, l'air, la température, le vent, la faune, la flore, ...
- Les composantes humaines comme la population humaine, la santé, l'éducation, les revenus des ménages, la production, les us et coutumes. En quelque sorte, les composantes humaines sont composées des composantes sociales, des composantes économiques et des composantes culturelles.

c. Dimensions spatiales de l'environnement :

L'environnement peut être représenté en trois niveau spatial selon l'échelle de référence c'est-à-dire selon les êtres vivants et le milieu de référence. Ces dimensions sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Niveau spatial	Echelle de référence	Système de référence	Exemple pratique
Micro environnement	Individu	Biotope, milieu de vie, habitat, quartier	Environnement à échelle familiale d'un être vivant à l'intérieur d'une aire géographique limitée
Méso environnement	Groupe d'intérêt culturel, social ou économique, communauté d'être vivants	Villes, régions, corridor, état	Déforestation de l'est de Madagascar : environnement d'une communauté élargie d'animaux vivants à l'intérieur d'un territoire national.

Macro environnement	Humanité, société tout entière, espèce d'intérêt mondial	Continent, planète terre, vie humaine	Réchauffement de la terre
------------------------	---	--	---------------------------

Tableau 17: dimensions spatiales de l'environnement

IX.2 Les menaces à l'environnement

Toute activité de fabrication ou de production à l'échelle industrielle, toute création ou travaux de transformation, d'aménagement ou d'extension de ces activités portent atteinte à l'environnement soit par le seul fait de l'occupation du sol, soit par l'utilisation des ressources naturelles, soit par l'usage d'intrants ou de produits susceptibles de générer des effets polluants, soit encore par la production, dans l'atmosphère ou dans les eaux, des rejets ou des nuisances.

Il y en a plusieurs menaces pour l'environnement :

a) La pollution et menace de dégradation des eaux

a.1 Eau douce

Plusieurs industries et usines évacuent leurs produits inutiles et ses eaux usées dans la rivière que la plus part de la population utilise pour cuire, se laver, quotidiennement. Prenons par exemple le cas de la station de Mandrozeza qui alimente en eau la ville d'Antananarivo. Même s'il est indéniable que l'eau de la JIRAMA ne sera distribuée aux consommateurs qu'après avoir passé des traitements, la qualité reste encore incertaine. Nous tenons à remarquer qu'une partie de l'eau envoyée aux consommateurs vient du lac et une autre partie est pompée de la rivière de l'Ikopa. Or, on constate que bon nombre d'usines qui s'implante sur les rives de ce fleuve y déverse ses déchets. Ainsi, la qualité est un élément très important et à respecter pour atténuer la pollution de l'eau.

a.2 Eau de mer

Actuellement, les êtres vivants marins sont aussi menacés car les pollutions des ordures nucléaires ou toxiques que nous déversons dans la mer, les naufrages involontaires des bateaux pétroliers risquent de les tuer.

b) La pollution de l'air

De nos jours, même l'air que nous respirons est pollué par les polluants. Plusieurs émanations sont à leur origine comme les gaz d'échappement des voitures, les industries qui dégagent des fumées riches en gaz toxiques, les fumées des feux de brousse ainsi que le dégagement des mauvaises odeurs dues à la décomposition et à la respiration des déchets ménagers et industriels. Ces polluants sont en forme de fumée ou de poussière ou d'odeurs. Il existe différentes formes de polluant :

- Le dioxyde de soufre (SO_2), l'oxyde d'azote (NO), l'oxyde de carbone (CO) et les métaux lourds comme le plomb provenant du raffinage de pétrole.
- Le dioxyde de carbone (CO_2) du feu de brousse.
- L'oxyde d'azote (NO) et le soufre (S) dégagés par les déchets et ordures en décomposition.

Une autre forme de pollution de l'air la plus dangereuse est la pollution nucléaire. Après la deuxième guerre mondiale, des essais nucléaires ont été faits à l'air libre. Les nuages de poussières radioactives empoisonnent les plantes dont se nourrissent les animaux et arrivent jusqu'à l'homme. C'est pourquoi à partir de 1960, on a fait des essais nucléaires sous terre qui sont moins polluants.

c) La pollution du sol et des eaux souterraines

D'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets et des fuites de produits chimiques provoquent la pollution du sol. Les principaux polluants du sol donnés par BASOL qui recense les sites pollués par les activités industrielles sont les hydrocarbures, les huiles moteurs, le plomb, le zinc, les solvants, les halogénés, le chrome, le cuivre, l'arsenic, le nickel, le cadmium.

De même, autres pollutions comme les pollutions organiques persistantes (P.O.Ps) sont largement utilisées dans l'agriculture et l'élevage par l'utilisation des divers pesticides et des produits chimiques industriels. C'est pourquoi la convention de Stockholm insistent sur la fin de rejet des 12 produits chimiques tels que les aldines, les chlordanes, le DDT, les dieldrines, l'endrine, les heptachlores, les hexachlorobenzènes, les mirex, les toxaphènes, les PCB (biphényles polychlorés), les furanes et les dioxines.

d) La pollution sonores et nuisances

Le bruit, de tout temps, a été considéré comme lié à l'activité industrielle. Le problème de bruit lié aux activités industrielles ne concerne seulement les bruits des usines ou des ateliers mais aussi le bruit créé au voisinage ou dans les habitations par toutes machines en fonctionnement. Il existe des normes sur l'intensité des bruits. Actuellement, il ne semble que les industriels soient convaincus de la nécessité de limiter les niveaux sonores de leurs matériels, en particulier pour ce qui est des matériels de grande diffusion.

IX.3 Les normes relatives en vigueur sur l'environnement

L'environnement et la qualité sont deux termes indissociables. Le terme qualité-environnement a une double exigence mais aussi une stratégie commune, c'est pourquoi les composantes qualité-environnement doivent être pris en compte dans ce projet. On peut bien mettre en place des systèmes de management qualité et environnement séparés, ou avec un seul système de management qualité-environnement. Ainsi, des normes ont été définies intégrant le management de l'environnement. Plus généralement, les normalisations sont des vecteurs de communication mais permettent surtout aux entreprises de s'assurer de la fiabilité des produits qu'elles achètent (matériaux, services,...), de favoriser la conquête du marché, et de renseigner les consommateurs sur la qualité des produits qu'elles vendent. C'est pourquoi la série des normes ISO 14000 ont été définies car cette série résulte d'un consensus visant à ce que les entreprises puissent évaluer et maîtriser de manière continue les impacts de ses activités, de ses services et de ses produits sur l'environnement. Elles insistent particulièrement sur la prévention des pollutions, l'engagement public ou l'amélioration des performances. On distingue plusieurs types de normes comme les normes d'organisation, outils et les normes liées aux produits et services.

a) Les normes dites d'organisation dont :

- La norme ISO 14001 qui est une norme de spécialisation. Elle fournit une liste d'exigences ou des niveaux à atteindre
- La norme ISO 14004 qui est une norme de recommandation (conseils,...) qui précise les principes de construction d'un système de management environnemental.

a.1 Les normes dites normes d'outils dont :

- La norme 14010 qui est un principe de l'audit environnemental
- La norme 14011 qui est la pratique de l'audit du système de management environnemental
- La norme 14012 est un critère de qualification des auditeurs

a.2 Les normes liées aux produits et services

- La norme 14020 insiste sur les étiquettes et déclarations environnementales, évaluation de la performance environnementale
- La norme 14040 insiste sur l'analyse du cycle de vie

a.3 Les procédures de certification :

La norme ISO 14001, décrit les exigences relatives au système de Management Environnemental (SME). Selon l'ISO 14001, un système de management environnemental comprend six éléments clés :

- La politique environnementale : c'est la déclaration d'intention et d'engagement d'un organisme quant à sa performance environnementale
- La planification : c'est l'activité par laquelle l'organisme analyse l'impact environnemental de ses opérations
- La mise en œuvre et fonctionnement : c'est l'élaboration et l'application de processus concourant à atteindre des buts et des objectifs liés à l'environnement.
- La contrôle et action corrective : c'est l'activité de surveillance et de mesure des indicateurs
- La revue de la direction : c'est l'examen du système de management environnemental réalisé par la haute direction de l'organisme pour vérifier si ce système est toujours stable, approprié et efficace
- L'amélioration continue

b) Les normes mis en vigueur sur la qualité

La série des normes ISO 9000 est la norme relative aux systèmes de management de qualité. Le terme management de la qualité recouvre ce que l'organisme fait pour satisfaire aux exigences qualité des clients et aux exigences réglementaires applicables tout en visant l'amélioration de la satisfaction des clients et l'amélioration continue de sa performance dans la réalisation de ces objectifs.

Voici quelques séries des normes ISO 9000 :

- ISO 9000 : Systèmes de management de la qualité - principes essentiels et vocabulaire
- ISO 9001 : Systèmes de management de la qualité - Exigences
- ISO 9004 : Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour l'amélioration des performances

c) Les normes de sécurité

Quelques séries de norme de sécurité :

- ISO 13850 : Sécurité des machines -- Arrêt d'urgence -- Principes de conception
- ISO 13854 : Sécurité des machines -- Écartements minimaux pour prévenir les risques d'écrasement de parties du corps humain
- ISO 13856 : Sécurité des machines -- Dispositifs de protection sensibles à la pression

IX.4 Les risques de dégradation de l'environnement causés par la ligne de production :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'environnement est constitué des composantes biophysiques et des composantes humaines. Nous allons donc essayer de prévoir quelques risques qui peuvent être causés pendant la production.

Rejets d'une distillerie : L'eau et ses résidus : l'eau a le plus d'utilités dans les procédés d'extraction.

L'eau doit être traitée et respecter certaines conditions avant et après son utilisation.

Les eaux résiduaires peuvent affecter tout autour de lui à grande quantité, c'est pourquoi, quelques contrôles s'imposent si c'est le cas. Au cas où le procédé d'extraction utilisera par

exemple des solvants ou autres produits, il sera toujours de règle à conserver la neutralité du produit extrait sinon le produit ne répondra pas aux besoins des utilisateurs.

Pour les eaux résiduaires, selon les conditions en vigueur pour le respect de l'environnement, il est assez difficile de fixer des conditions normalisées parce que chaque industrie présente bien souvent des compositions variables et sujettes à fluctuations selon leur genre. Comme exemple, les eaux de refroidissement et de condenseur ont pour condition de température de ne pas dépasser plus de 30[°C] et ne doivent pas présenter de voiles visibles d'huiles quand elles seront déversées dans les eaux de rivières sinon elles pourront affecter les entités biologiques des environnants.

Pollution de l'air : l'odeur émise par les distilleries a des effets sur l'air. On ne considère pas l'air pollué tant qu'il ne soit pas malodorant. Or, les déchets de distillerie affectent à la fois l'air et la terre. Il faut veiller à ce qu'ils ne soient pas source de pollution et de dégradation. Et aussi la quantité de CO₂ émise par la chaudière doit être traitée.

IX.5 Les impacts économiques et sociaux [9]

Les possibilités d'utilisations du procédé sont nombreuses. Les agro-industries paraissent être les plus adaptées pour le développement d'un pays surtout comme Madagascar. L'aboutissement à une installation complète de traitement et de raffinement présente l'impact environnemental le plus favorable de la construction d'une industrie agro-alimentaire. Cela permettrait de développer des régions et apporter du travail tout en contribuant davantage les recherches sur les plantes à vertus thérapeutiques et aromatiques

La production locale de certains produits pharmaceutiques, cosmétiques et alimentaires, de la plantation à la transformation permet de réduire les importations et même de pouvoir devenir producteur et fournisseur au niveau du marché international tout en valorisant la qualité des produits locaux. Ce cas est aussi bénéfique pour l'économie du pays.

Néanmoins, l'exploitation des plantes médicinales et aromatiques a besoin de législation et de supervision pour mieux tout organiser et tout contrôler. Les exploitants auront, à long terme, à penser à cultiver pour leurs besoins futurs en matières premières afin de protéger et exploiter à la fois les espèces endémiques et améliorer la qualité de leurs produits pour avoir une bonne compétitivité sur le marché mondial.

CONCLUSION

Durant tous nos travaux, nous avons pu résumer les éléments essentiels sur la conception d'appareils de distillation, sur les processus et appareillages de production d'alcool, tant sur le plan technique, socio-économique qu'environnemental.

La conception et la réalisation d'une unité de colonne de rectification font intervenir à priori la construction mécanique, la plomberie, le transfert thermique, la chimie générale et enfin l'agronomie selon la matière première utilisée.

Après la conception et la réalisation de l'unité, nous avons pu effectuer quelques expérimentations et après l'essayage nous pouvons dire que nous avons atteint notre objectif car nous avons obtenu de l'éthanol à 90°GL. Mais malheureusement, à cause de l'insuffisance de notre matériel, nous n'avons pas pu mener plus loin notre expérimentation.

Il est constaté que la distillation d'alcool est un projet vraiment rentable avec un temps de remboursement très bref.

Toutefois des expérimentations plus poussées sur les systèmes d'automatisation comme l'utilisation d'un régulateur de température seraient souhaitables, et l'application du procédé sur d'autres matières premières comme le canne à sucre est à envisagé.

A - PRINCIPE DU PROCÉDÉ

Le binaire eau – éthanol est particulièrement délicat à séparer du fait de la présence d'un azéotrope. Or, certaines utilisations demandent un degré de pureté de l'alcool plus important, comme par exemple l'usage comme additif dans l'essence.

Le principe de la distillation azéotropique hétérogène est couramment utilisé pour séparer des mélanges non idéaux. Dans cette technique, un "entraîneur" (appelé également "tiers corps") qui est ici le cyclohexane permet de former un azéotrope ternaire à température d'ébullition minimale. Ainsi, dans une colonne alimentée avec un mélange donné de ces trois constituants, en pied de colonne est obtenu l'un des trois corps pur, ici l'éthanol, et en tête de colonne est obtenu un mélange proche de l'azéotrope ternaire.

Ensuite, une seconde colonne à distiller va permettre de purifier l'eau et de recycler l'entraîneur (cyclohexane).

B - DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Première étape : séparation par distillation de l'éthanol pur

Le mélange d'alimentation eau-éthanol entre à débit constant aux deux tiers de la colonne D1, qui est une colonne de rectification à garnissage à deux tronçons fonctionnant à la pression atmosphérique. Une alimentation d'appoint en cyclohexane est introduite en tête de la colonne D1.

En pied de colonne D1, le liquide est maintenu à ébullition par un bouilleur à faisceau tubulaire monté en thermosiphon E1. Le débit de vapeur de chauffe utilisée par le thermosiphon régule la pression différentielle entre le pied et la tête de la colonne D1. L'éthanol pur obtenu comme résidu dans la colonne D1 est dirigé par une pompe centrifuge vers un réservoir (à ne pas représenter). Le niveau de liquide en pied de D1 est régulé.

En tête de colonne D1, l'hétéroazéotrope formé (eau-éthanol-cyclohexane) est condensé grâce à un échangeur à faisceau tubulaire horizontal E2. Le débit d'eau de refroidissement régule la température de sortie de l'eau de refroidissement.

Deuxième étape : décantation

Ces condensats sont ensuite dirigés vers un décanteur florentin S. La phase légère (mélange cyclohexane-éthanol) est évacuée par débordement et constitue le reflux de la colonne D1 tandis que la phase lourde (mélange cyclohexane-eau-éthanol) s'écoule dans un réservoir R.

Le niveau de l'interface est maintenu constant grâce au système du florentin.

Troisième étape : Séparation par distillation de l'eau et recyclage du cyclohexane

À partir d'une pompe centrifuge en charge sous le réservoir R, dont le niveau est régulé, ce mélange est envoyé dans un échangeur à faisceau tubulaire E3 afin d'y être préchauffé. Cet échangeur est alimenté en vapeur d'eau, dont le débit permet de réguler la température du mélange avant son alimentation au milieu de la colonne D2.

La colonne D2 est une deuxième colonne de rectification à garnissage à deux tronçons fonctionnant sous pression atmosphérique. Le bouilleur de la colonne D2 est constitué d'un échangeur à faisceau tubulaire E4 monté en thermosiphon. Le chauffage s'effectue grâce à de la vapeur d'eau dont le débit régule la pression différentielle entre le pied et la tête de la colonne D2. Le résidu de D2 est constitué par de l'eau pratiquement pure envoyée par pompe centrifuge à un traitement (à ne pas représenter). Le niveau de liquide en pied de D2 est régulé.

En tête de la colonne D2, les vapeurs de l'hétéroazéotrope ternaire sont condensées dans un condenseur à faisceau tubulaire E5 horizontal. Les condensats sont ensuite dirigés en partie en tête de colonne D2, ce qui constitue le reflux, dont le débit régule la température de tête de colonne. Le reste des condensats est renvoyé vers la colonne D1, se mélangeant ainsi à l'alimentation du décanteur florentin S.

ANNEXE 2 :

LES DIFFERENTES SORTES DES BOISSONS ALCOOLISEES

[10] [13]

On peut classer les boissons alcoolisées en deux parties, suivant les matières premières utilisées :

- Boissons à partir de jus sucré,
- Boissons à partir des matières amylacées.

➤ **Boisson obtenue à partir de jus sucrés**

- Non distillée

Vin provenant exclusivement de la fermentation du raisin frais ou du jus de raisin frais.

- Distillée

Eau-de-vie : liqueurs alcooliques extraites par distillation de vin à suc végétal.

Rhums ou Tafia : eau de vie de canne à sucre.

➤ **Boisson obtenue à partir des matières amylacées**

Ces produits amylacés sont des produits tels que le manioc, la pomme de terre, le riz, l'orge etc., dont le constituant principal est l'amidon.

➤ Non distillée

Bière, boisson obtenu par fermentation alcoolique d'un moût fabriqué avec du houblon et du malt pur d'orge ou associé à 30% au plus de son poids de malt provenant d'autres céréales de matières amylacées.

➤ Whisky, eau de vie de grains (céréales en majorité) issue de la distillation simple ou double de ces grains fermentés.

Malt d'orge et orge fermenté. En général, les techniques de fabrication des différentes catégories de boissons ont une certaine ressemblance.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] ANDRIANJAFIARISAONA I.R., « *Contribution à la production d'alcool. Conception et réalisation d'une unité de distillation* », Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Génie Chimique ESPA, 2008.
- [2] Charas M. « *Pharmacopée royale Galénique et chimique* ». Tome 1. Paris, chez Laurent d'Houry. 1691.
- [3] COPIGNEAUX P., « *Distillation, Absorption. Colonnes garnie* », Techniques de l'Ingénieur, J 2 626
- [4] DUMARGUE, Paul. « *Mécanique des fluides. Les échangeurs de la chaleur* » Technique et documentation LAVOISIER. Paris 1990
- [5] EMILIAN K. « *Aide-mémoire de Génie Chimique* », Collection: Aide-mémoire de l'ingénieur, Dunod /L'Usine Nouvelle, 2010 - 3ème édition
- [6] HENLEY E.J. et SEADER J.D. (WILEY), « *Equilibrium-Stage Separation Operations in Chemical Engineering* »
- [7] J. Leconte « *Chaudronnerie et tuyauteries industrielles* » Tome 1&2 – Paris 1984.
- [8] L'office forestier central, Chauffage moderne au bois, suisse, CH4500 Soleure
- [9] MIDDLEBROOKS, E. JOE. « *Industrial Pollution Control. Volume 1: Agro-Industries* » A WILEY-Interscience Publication. John WILEY & Sons N.Y – Chichester – Brisbane – Toronto. 1979 (A WILEY - Interscience series of texts and monographs) Edited by METCALF, Robert L. (University of ILLINOIS) and STUMM, Werner (Eidgenossische Technische Hochschule ZURICH)
- [10] RAKOTOSAONA R. et ANDRIAMONJA T. « *Etudes des amylacées, application : fabrication de boisson alcoolisée* ». Mémoire de Fin d'Etudes, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département Génie Chimique, 1998.

[11] RANDRIAMAHANDRY Solofohery « *Valorisation des bananes : Fabrication de vin de banane* ». Mémoire de fin d'étude. 2006

[12] Sticklmair J.G., Fair J.R. « *Distillation. Principles and practice* » Wiley (A WILEY - Interscience series of texts and monographs), 1998

[13] TISSEAU M.A et P.Y.C « *L'ananas sa culture, ses produits* » G-P Maisonneuve et La rose et A.C.C.T 1984.

[14] TRAMBOUZE Pierre, « *Le raffinage du pétrole : matériels et équipements* », tome 4

[15] TRAMBOUZE P. et EUZEN J. P., « *Les réacteurs chimiques : de la conception à la mise en œuvre* »

[16] W. H. Mc ADAMS « *Transmission de chaleur* » Deuxième édition, DUNOD Paris 1961

WEBOGRAPHIE

[17] <http://homedistiller.org/calcs/calc> (20 Mai 2015)

[18] https://www.google.com/search?q=distillation+azeotroique+pdf&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a&gws_rd=ssl (20 Mai 2015)

[19] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation> (15 Mai 2015)

[20] <https://www.google.com/search?q=anneau+de+pall&client=firefox-a&rls=org.mozilla:fr:official&channel=np&biw=1366&bih=665&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0CCIQsARqFQoTCL2bvNu-9scCFQN2HgodRH0Mrg> (15 Mai 2015)

Intitulé du mémoire : EXPERIMENTATION D'UNE COLONNE

DE RECTIFICATION D'ALCOOL

Présenté et soutenu par : NJATOARIVELO Tojonirina Alain

Sous la direction de : RANDRIAMORASATA Josoa Albert, Professeur



Nombre de pages : 68

Nombre de figures : 19

Nombre de photos : 5

Nombre de tableau : 25

Mots-clés : Distillation, rectification, reflux, colonne, condenseur, chaudière.

RESUME

Madagascar est l'un des pays consommateur d'alcool, c'est pour cette raison que nous avons conçu et réalisé une unité de distillation d'alcool. Pour réduire son coût nous avons utilisé des matériaux de récupération disponibles dans l'atelier ARTICOM. Après sa réalisation, nous avons tout d'abord fait un essai à la vapeur pour évaluer les éventuelles fuites. Ensuite nous avons distillé la fermentation d'eau sucrée qui a été effectuée et nous avons obtenu de l'alcool 90°GL de pureté. Donc nous pouvons confectionner dans notre pays une unité de distillation performante à faible coût.

ABSTRACT

Madagascar is one of country alcohol's consumer, that's why we've imagined and realized a alcohol distillation unity. To reduce the cost we used recovery material available in the ARTICOM workshop. After his achievement, we did a first test with steam to look after escapes. Then we distilled the fermentation who was made and we've got alcohol 90°GL. So we can make a alcohol distillation unity in our country at a low price with high-performance.

Keywords : distillation, rectification, reflux, column, condenser, boiler.

NJATOARIVELO Tojonirina Alain

Lot : VT 85 HBM Andohanimandroseza

+261 34 10 491 03