

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
FILIERE: GENIE INDUSTRIEL  
DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE ET  
PRODUCTIQUE

*Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtenir du diplôme  
d'Ingénieur en GENIE INDUSTRIEL*

# **SECHAGE PAR DETENTE INSTANTANNEE CONTROLE**

*Rédigé et présenté par : TOTO Jasmin Florian*

Date de soutenance 19 mars 2004

Promotion : 2004-2005



Is	: frais de démarrage
K	: coefficient d'échange global
L	: longueur du tube en cuivre
L	: longueur du boulon
m	:masse d'air humide
ma	:masse d'air sec
mo	:masse de vapeur d'eau
m	:masse de vapeur d'eau à l'état de saturation
mh	:masse du produit
mn	:teneur en eau absolue
mem	:masse d'eau contenu dans le produit
muxt	:masse d'eau extraite
mg	:masse du gaz
Mo	:masse du produit sec
mr	:teneur en eau relative ou teneur en eau base humide
m	:masse de matière sèche
m	:masse molaire de la vapeur d'eau
nu	:Nombre de NUSSELT
P	:pression de vapeur
P	:pression de vapeur à la surface du corps humide
P	:pression de vapeur saturante
Q	:quantité de chaleur
r	:rayon
ro	:Nombre de REYNOLDS
S	:Section
sc	:Siccité
t	:Temps de séchage
v	:Vitesse de séchage
vupp	:Volume apparent du produit



a	Surface d'échang
uw	Activité de l'ea
ap	Amortissement annue
b	Bénéfice annuel
(cf)n	Cash-flow à l'année n
Cf	Capital fixe
ch	Fraction massique de la vapeur d'eau
c	Chaleur spécifique
cu	Coût de séchage
cv	Charge variable
cw	Coût de kWh de la JI. RA. MA
D	diamètre extérieur
d	Diamètre intérieur
e	Porosité
e	Epaisseur
f	Fond de roulement
f	Force de pression
fm	Frais de maintenance
fo	Frais opératoire
fp	Intérêt ne cas d'empreint
i	Taux d'imposition sur les bénéfices
l	Capital amortissable ou investissement
lo	Investissement initial à la mesure
L1	Investissement en limites des unités de fabrication
L2	Service généraux et stockage
L3	Frais d'étude
L4	Stock de pièce de rechange



## **INTRODUCTION**

Madagascar est une île connue par la diversité de ses produits agricoles. Certains d'entre eux peuvent être trouvés en quantité abondante toute l'année alors que d'autres types ne sont que saisonniers. Sans vouloir mentionner la place qu'ils tiennent dans le domaine d'exportation, le choix porté sur l'étude tend vers la recherche d'une meilleure conservation et de consommation de ces produits tout en tenant compte du prix et de la rentabilité du système utilisé.

Parmi les actions se rapportant sur la conservation des produits, le séchage à l'air comprimé est la méthode nouvellement employée.

Pour cela, cette étude repose sur la connaissance des procédures et des phénomènes qu'il convient d'élucider.

D'où l'importance de ce mémoire de fin d'étude intitulé : « **SECHAGE PAR DETENTE INSTANTANEE CONTROLEE** »

Pour ce fait, il est important de rappeler en premier lieu le séchage des produits qui sera traité succinctement dans le premier chapitre ;

Ensuite, on rapporte dans le second chapitre la théorie de la physique de base ;

Le troisième chapitre traite l'appareillage de séchage ;

Le quatrième chapitre stipulera de ce fait les expérimentations à propos de séchage des produits ;

Et dans le dernier chapitre nous porterons l'analyse des études économiques et environnementales.



Chapitre I :

RAPPEL SUR LE SECHAGE

**I.1- Généralités sur le séchage :**

La qualité de séchage conditionne la survie des produits de séchage s'ils font l'objet d'une transformation et d'une mise en œuvre adaptée au caractère originel.

Quoique plusieurs procédés puissent y être déployés (déshumidification, réchauffage d'air par batteries chauffantes : dispositif électrique, brûleur, pompe à chaleur, plaque scolaire ou autres), la finalité serait d'atteindre un taux d'humidité bas de façon relativement rapide.

En d'autre terme, sécher un produit revient à le ramener, dans une condition de température convenable, à un stade où la teneur en eau est suffisamment basse.

Cet état de produit à basse humidité doit être respecté pour éviter toute détérioration, pour conserver les principes actifs (huile essentielle, alcaloïdes, hétéroïdes...), et finalement pour conférer les caractéristiques indispensables à l'utilisation rationnelle et performante (stabilité en dimension ou stabilité de forme, amélioration des caractéristiques mécanique, pérennité ...)

Le produit, initialement à l'état humide est ramené à un état final séché devant correspondre à la qualité requise pour son utilisation.

*Noté bien* : A titre de rappel, cette qualité de séchage fixe le taux de l'activité de l'eau dans le produit séché, donc le risque de dégradation.

- *L'activité de l'eau* :  $a_w$

Il est défini par le rapport entre la pression de vapeur à la surface du corps humide et la pression de vapeur saturante au dessus de l'eau liquide à la température du système, donc :

$$a_w = \frac{p_s}{p_{vs}} \quad (1.1)$$

$p_s$  : Pression de vapeur à la surface du corps humide  
 $p_{vs}$  : Pression de vapeur saturante.



On peut classer un produit selon sa teneur en eau :

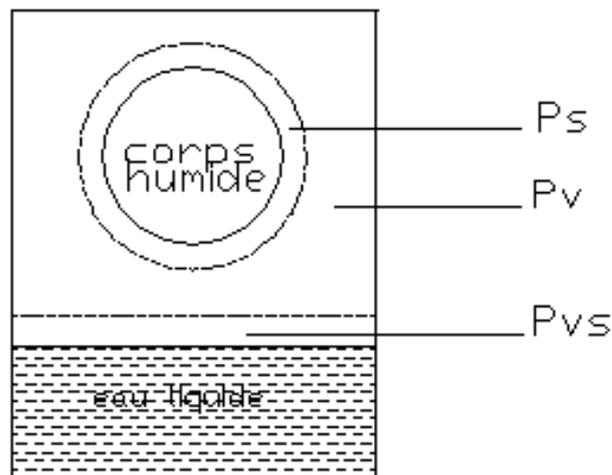
- Très élevée pour les produits présentant une humidité plus de : 0,90.
- Forte de 0,75 à 0,90.
- Limitée entre 0,75 à 0,60.
- Pratiquement inexistante en dessous 0,60.

Pour bon nombre d'entreprise, afin de veiller sur la qualité de séchage, l'utilisation du système artificiel est la plus adoptée.

Mais réaliser un séchage de bonne qualité requiert quelques conditions qui sont essentiellement interdépendantes et qui peuvent être généralisées par :

- La maîtrise du processus de séchage
- Par le choix des matériels appropriés.
- Par la performance et par les coûts d'installation

La figure suivante montre l'activité de l'eau.



**Figure I.1 : Représentation de l'activité de l'eau**



En industrie de production, on donne plus d'importance à la conduite de séchage par rapport à la théorie physique de transport ; alors qu'en réalité, elles doivent aller de pair sans aucune préférence. La physique de transport ou processus de transfert explique le déroulement à l'échelle microscopique du transfert de matière et les paramètres intervenant au cours du séchage. Tandis que la conduite de séchage est liée directement au procédé convenable à un type de produit

## **I.2.- Caractérisation d'une production de séchage :**

### **I.2.1 .Structure d'un produit de séchage :**

Le produit de séchage est caractérisé par la taille des canaux poreux. Elle lui confère des caractéristiques mécaniques et thermodynamiques particulières.

L'évolution de cette taille au cours du séchage se répercute vraisemblablement sur *l'état hygroscopique* du matériel.

Les déformations des pores entraînant une modification structurelle du produit peuvent générer des contraintes et peuvent influencer le processus de séchage.

Lors d'une opération de séchage, les modifications dimensionnelles des pores occasionnent un ralentissement de masse par phénomène d'écroûtage ou par blocage d'entraînement de solutés. Pour permettre au produit d'arriver sans encombre au terme du séchage, et pour pouvoir se passer de ces contraintes, il est alors important de bien connaître l'état du produit avant et au cours de l'opération.

Pour cela, la notion de porosité mérite d'être considérée.

### **I.2.2. Caractérisation de la porosité :**

La porosité est un paramètre pertinent à l'échelle de processus. Elle conditionne les transferts d'eau et la quantité d'*eau liée* dans le produit.

La porosité volumique  $E$  est le rapport entre le volume des pores et le volume du produit (cf. : figure2).



Elle s'exprime par :

$$E = \frac{V_{ps}}{V_{app}} \quad (1.2)$$

De cette expression, on peut déduire le volume de l'édifice solide constituant le matériau désigné par  $1-E$  (on prend une unité de volume égale à 1)

$$\frac{V_{int}}{V_{app}} = 1 - E \quad (1.3)$$

La porosité est définie de la même façon pour tous les matériaux à quelques différences près :

-Pour un amas de produit : le volume de pores est la différence entre le volume de l'amas et le volume du produit. Dans ce cas, le volume apparent est le volume de l'amas

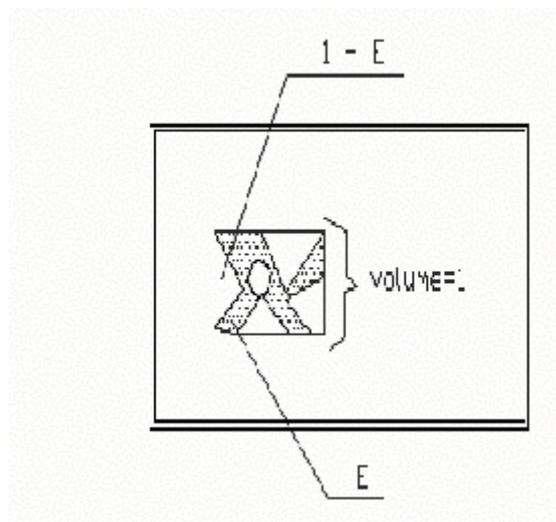


Figure I.2 : Structure des pores dans un matériau.

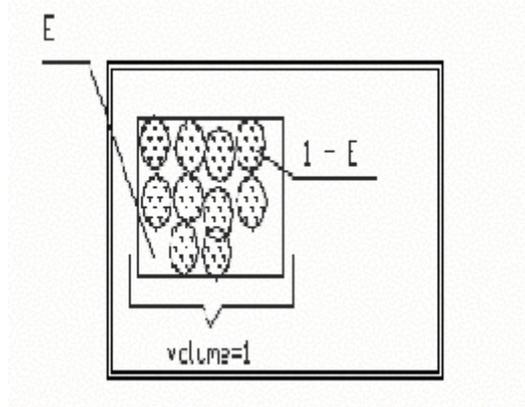


Figure I.3 : Définition des pores pour un amas de produit.

### I.3. La compacité :

Outre la porosité, la compacité est aussi un paramètre à connaître. Elle intervient dans l'évolution de la surface d'échange « A » dont la quantification est requise. Lorsqu'on parle des échanges convectifs.

La formule généralisée pour définir la compacité s'écrit :

$$\alpha = \frac{A}{V_{\text{app}}} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.4)$$

*NB* : Au cours du séchage et dans le cas des matériaux déformables, la compacité évolue et implique une modification des transferts.

*En base sèche, le bilan de compacité s'écrit :*

$$\alpha_s = \frac{A}{V_s} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (1.5)$$

La surface d'échange « A » qui est la surface extérieure appelée aussi *surface exposée* est différente d'un produit à l'autre et la compacité change en conséquence.



#### **I.4. L'humidité des solides :**

##### **I.4.1. Définition :**

L'humidité contenue dans le corps solide ou liquide se présente soit sous forme de liquide pur (de l'eau dans la plupart des cas), soit sous forme d'une solution colloïdale. Les corps humides sont généralement des corps capillo poreux, et leurs propriétés sont principalement fonction de la nature des liaisons avec l'eau qu'ils contiennent

Un corps hydraté est formé de la combinaison d'un corps avec l'eau par association moléculaire ou insertion dans le réseau cristallin. Mathématiquement, l'humidité se définit par la masse d'eau que renferme le produit rapporté à la masse anhydre. Exprimée en pour cent [%], elle peut être supérieure à 100 si le produit contient plus d'eau que de matière.

$$H(\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \quad (1.6)$$

##### **I.4.2. Types de liaison de l'eau :**

L'eau se présente sous trois formes dans un produit de séchage :

- L'eau libre est remplie la majeure partie de vides cellulaires. Elle y est piégée sous forme de liquide. Sa quantité est directement liée à la porosité  $E$  ;

L'eau liée est absorbée par les parois grâce aux propriétés hydrophiles de celle-ci. L'eau liée imprègne alors ces parois, sa quantité est liée à la taille des pores.

- La vapeur d'eau occupe les parties vides des pores non saturés d'eau liquide. Elle est mélangée avec l'air sec pour former un mélange parfait.



Lors du séchage, l'eau libre part en premier. A un moment donné où elle est complètement évacuée et qu'il ne reste plus que l'eau liée, le matériau atteint **le point de saturation** auquel on est en présence d'une teneur en eau particulière des parois saturées qui correspond, dans la quasi-totalité des cas, à l'humidité voisine de 30%. Après, ce sera l'eau liée qui partirait et ainsi de suite.

### **I.5. Quantification d'eau :**

#### **I.5.1. La quantité d'eau dans un matériau de séchage :**

L'hydratation du produit par unité de volume caractérise la quantité d'eau. Pour connaître la quantité d'eau exactement dans le produit, il faudrait ramener ce terme au volume total du produit lui-même.

Mathématiquement, l'hydratation du produit requiert la définition de la saturation «s» qui est liée à la présence des trois types d'eau dans le produit.

La saturation est la représentation du volumique d'eau liquide rapportée au volume de pores.

$$s < 1 ;$$

$$s = 1 : \text{pores saturés.}$$

$$s = 0 : \text{il n'y a pas d'eau libre.}$$

#### ○ Fraction massique de vapeur d'eau :

La quantité de vapeur d'eau dans la phase gazeuse de l'air humide est importante pour le calcul des transferts de masse.

$$\boxed{C_g = \frac{M_{\text{eau}}}{M_g}} \quad (1.7)$$

$$M_{\text{eau}} = \text{masse d'eau en kg.}$$

$$M_g = \text{masse de gaz en kg}$$



○ L'état d'hydratation d'un matériau :

A l'échelle de description, l'eau titrable est formée d'eau libre, d'eau liée et de vapeur d'eau. Donc on peut écrire :

$$\text{Eau titrable [kg /m}^3] = (\text{eau libre} + \text{eau liée} + \text{vapeur d'eau}) \quad [\text{kg/m}^3]$$

A l'échelle de processus, on aura l'expression

$$\boxed{M_a \cdot \rho_{s.app} = E \rho_1 + W_1 \rho_{s.app} + E \cdot (1-S) C_g \cdot \rho_g} \quad (1.8)$$

$\rho_1$  : la masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_g$  : La masse volumique de l'air humide [kg /m<sup>3</sup>];

$\rho_{s.app}$  : La masse volumique apparente de la matière sèche [kg/m<sup>3</sup>];

$W_1$  : la teneur en eau libre ;

$E$  : La porosité ;

$S$  : la saturation.

○ La siccité :

La siccité est le rapport entre la masse du produit à l'état sec et celle à l'état humide :

$$\boxed{S_c = \frac{M_o}{M_h}}$$

Où  $M_o$  : masse du produit à l'état séc.

$M_h$  : masse du produit

**I.5.2. L'hygroscopicité :**

Dans un produit, l'hygroscopicité se définit s'il y a processus de séchage ou humidification. Physiquement, pour le phénomène de séchage, l'hygroscopicité se traduit par une différence entre la pression de vapeur d'eau au sein du produit et la pression de vapeur saturante de l'air asséchant à une certaine température.

Ainsi, si la teneur humide d'un produit exposé dans l'air à une température et une humidité relative déterminées, ne varie plus, on dit qu'il est en équilibre hygroscopique avec cet air.



### **I.5.3** Vitesse de séchage : $V$

La vitesse de séchage se définit par la quantité d'eau évaporée par unité de temps.

Cela se traduit mathématiquement par :

$$V = \frac{M_{\text{ext}}}{T} \quad (1.10)$$

$M_{\text{ext}}$  : Masse d'eau extrait [kg]

$T$  : Durée de séchage [s]



**Chapitre II :** **RAPPEL SUR LA THEORIE  
DES PHYSIQUE DE BASE**

Avant de réaliser l'étude, il est bien de rappeler les théories de bases physiques

**II.A- Mécanique des fluides :**

**II.A.1- Propriété physiques :**

**II.A.1.1 Définition :**

O appel fluide toutes corps liquides ou gazeux. C'est milieu matériel contenu, déformable, isotrope et sans rigidité qui peut subir de grandes variations de forme sous l'action des forces.

**II.A.1.1.2 compréhensibilité**

Tous les fluides sont compréhensibles. Ils se déforment sous l'action d'une force.

Toutefois la compréhensibilité des liquides est négligée.

Exemple : coefficient de compréhensibilité de l'eau  $K = 1/20000$

**II.A.1.1.2 Viscosité**

Tous les fluides sont naturellement visqueux. La viscosité se manifeste par la résistance et à la déformation du fluide.

**II.A.1.1.2.1 viscosité absolue ou viscosité dynamique :  $\mu$**

Le coefficient de viscosité dynamique représente la force qu'il faut mettre en jeu pour faire déplacer l'unité de surface plane d'un fluide, surface qui lui est parallèle et suitée à une distance unité.

$\mu$  est exprimé en pascal-seconde [pa.s] ou en poiscuille [PI]

$$1\text{Pa.s}=1\text{PI}$$



II.A.1.1.2.2- Viscosité cinématique :

Elle est définie par, le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique :

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.1) : \text{ Avec } \mu \text{ [Pa.]}$$

$$\gamma [m^2 / S]$$

$$\rho [Kg / m^3]$$

II.A.2- Ecoulement visqueux :

L'écoulement visqueux concerne uniquement les fluides réels.

II.A.2.1. Nombre de Reynolds :

C'est un nombre sans dimensionnel qui caractérise la nature du régime d'écoulement d'un fluide :

$$R = \frac{u \cdot D}{\gamma} \quad (2.2)$$

$u$  : Vitesse d'écoulement m/s

$\gamma$  : Viscosité cinématique  $m^2/s$

$D_u$  : Diamètre hydraulique (dans le cas d'une conduite circulaire  $D_u$  est égale au diamètre de la conduite :

$$D_u = \frac{4 \cdot S_m}{P} \quad (2.3)$$

$P$  : Périmètre mouillé

$S$  : Section mouillée

Le régime d'écoulement peut être laminaire ou turbulent suivant que  $Re$  est inférieur ou supérieur à une valeur critique  $Re_{cr} = 2200$



### II.A.2.2- Perte de charge :

Les pertes de charge sont dues au frottement contre la paroi de la conduite et aux différents accidents rencontrés au cours de l'écoulement (coudes, changement brusque de direction ou de section...). La première cause s'appelle perte de charge linéaire et la seconde, perte de charge singulière.

$$\text{Elle s'exprime par : } \Delta P = \lambda \frac{l}{D} \cdot \frac{\rho \cdot \mu}{2g} \quad (2.4)$$

$l$  : Longueur de la conduite

$D$  : Diamètre du tube cylindrique [m]

$\Delta P$  : Perte de charge

$\mu$  : Vitesse d'écoulement moyenne dans la conduite [m<sup>2</sup>/S]

$\lambda$  : Coefficient de perte de charge

En régime laminaire :  $\lambda = 64/Re$

En régime turbulent :  $\lambda = 0,4/Re^{0,23}$

#### II.A.2.2.2. Perte de charge singulière :

$$\Delta P = k \frac{\rho \cdot \mu^2}{2g} \quad (2.5)$$

$k$  : coefficient dépendant du type d'accident



en utilisant des courbes :

$$\Delta PI = \Delta P_m \cdot l$$

$$\Delta P_e = \Delta P_m \cdot le$$

le : Longueur équivalente de la singularité (lue sur une abaque)

$\Delta P_m$  : Perte de charge par mètre (lue sur une abaque)

II.A.2.3- Equation de Bernoulli applique à une fluide réels :

$$P_{s1} + \frac{1}{2} \rho u_1^2 + \rho g z_1 = P_{s2} + \frac{1}{2} \rho u_2^2 + \rho g z_2 + \Delta P \quad (2.6)$$

$P_{s1}$  : Pression statique au point (1)

$P_{s2}$  : Pression statique au point (2)

Z : Altitude du point par rapport à un plan de référence

u : Vitesse moyenne

$\Delta P$  : Somme de toutes les pertes de charges le long du parcours

II.B- Transmission de Chaleur :

II.B.1- Introduction :

Deux corps de températures différentes échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à ce que leur température soit identique, la propagation de la chaleur se fait dans la région chaude vers la région froide, cet échange peut se faire suivant trois mécanismes



- La conduction :

L'échange se produit de proche en proche à travers la matière sans déplacement de celle-ci, l'énergie due à l'agitation thermique des molécules communique d'une couche à l'autre.

- La convection :

C'est le cas des fluides en mouvement ou la transmission de la chaleur accompagne le déplacement de matière.

- Le rayonnement :

Tout corps à une température supérieure à zéro absolu rayonne dans toutes les directions, une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert de chaleur ne nécessite entre les corps considérés aucun support matériel, il s'identifie parfaitement à la propagation.

### II.B.1.1- La conduction :

#### Loi de Fourier :

La quantité de chaleur  $dQ$  qui s'écoule pendant un intervalle de temps  $dt$  de la surface  $S_1$  à la surface  $S_2$  à travers l'élément de surface  $dS$  est proportionnelle à la fois à  $d\theta$  et à  $dt$  et à  $ds$  ;

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{dn} dS \cdot dt$$
$$\Rightarrow \frac{dQ}{dS \cdot dt} = -\lambda \frac{d\theta}{dn} = 0$$

D'après la loi de FOURRIER, le flux thermique à travers une paroi plane s'exprime ;

$$\varphi = -\lambda \frac{\Delta\theta}{\delta} = \frac{\Delta\theta}{\frac{\delta}{\lambda}}$$



$\Delta\theta$  : Différence de température entre les faces du mur.

$\delta$  : Epaisseur du mur.

Le flux thermique par unité de longueur à travers une paroi cylindrique est donné par :

$$\varphi = -2\pi\lambda \frac{d\theta}{dr} = 2\pi\lambda \frac{\Delta\theta}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.9)$$

D'où  $r_1$  : Rayon intérieur  
 $r_2$  : Rayon extérieur  
 $\lambda$  : Conductivité de la paroi

### II.B.1.2- La convection :

C'est l'échange de chaleur qui s'effectue entre un corps solide et un fluide.

Le transfert de chaleur par convection a un rôle largement prédominant dans la transmission de chaleur par contact entre une paroi et un fluide mobile et c'est pourquoi le phénomène est appelé transmission de chaleur par convection.

D'après Newton, on peut calculer la quantité de chaleur transmise par convection à l'aide de la formule.

$$Q = hS(\theta_i - \theta_f) \quad (2.9)$$

$h$  : Coefficient de transmission thermique.

$S$  : Surface d'échange

$\theta_i$  : Température

$\theta_f$  : Température du fluide.

Comme l'intensité de la transmission de chaleur par convection dépend du mouvement du fluide ; alors il est nécessaire de connaître les lois de l'écoulement du fluide. En fonction de la façon de production de l'écoulement, on distingue deux catégories de convection.



- la convection libre ou naturelle
- la convection forcé

La convection est dite naturelle quand elle prend naissance à cause de la différence de densité existant entre les parties froides et les parties chaudes du tube. Pour calculer la longueur de ce tube. On utilise les formules dans le calcul des échangeurs qui fait intervenir des notions relatives soit à l'écoulement des fluides, soit à la transmission de la chaleur du fluide. Elle est dite forcée quand elle est produite par un moyen mécanique.

➤ Les nombres sans dimensions

Les calculs en convection fait intervenir de très nombreux paramètres variables en fonction des conditions régnant dans le milieu.

On regroupe ces variables dans des formules appelées : nombre sans dimension qui conservent leur valeur numérique quelque soit le système d'unités adopté, pourvu qu'il soit cohérent.

❖ Nombre de Reynolds :

C'est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité :

$$\text{Re} = \frac{\rho \mu d}{\mu g}$$

Il caractérise le régime d'écoulement.

❖ Nombre de NUSSELT :

Il interprète le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection à une quantité de chaleur échangée par conduction.

$$\text{Nu} = \frac{kd}{\mu} \quad (2.11)$$



#### II.B.1.2.2. La convection forcée :

L'objet de ce paragraphe c'est de donner quelques résultats empiriques sur le nombre. Les nombres sans dimension interviennent dans les formules empiriques qui déterminent les coefficients de transmission par convection. Ces formules varient avec la nature de phénomène physique en présence (nature de l'écoulement, phénomène de condensat). Les diverses expressions des coefficients de convection utilisées suivant les cas sont appelées c.

Notons que, d'après la définition de Nu :

$$K = \lambda \cdot Nu / d \quad (2.12)$$

Dans la circulation par convection forcée dans les tubes en régime turbulent, il y a régime turbulent si Re est nettement supérieur à 2100, ( $Re > 2100$ ).

Si l'on admet qu'il y a une relation entre la convection et le frottement, il y a autant d'expression de Nu qu'il y a de lois du frottement en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité.

Une formule exprimant Nu n'est donc variable que pour une certaine rugosité et entre certaines rugosités et entre certaine valeur Reynolds.

Ces formules sont également applicables lorsque le fluide circule autour des tubes, le long de ceux-ci :

Gaz, Mc ADAMS donne :

$$Nu = 0,02 Re \quad (2.13)$$

#### II.B.1.3. Rayonnement thermique

Tous corps placé devant une source de chaleur s'échauffent, 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 manifestent sous forme de chaleur se situe entre 0,5 à 50  $\mu$ .

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



Echange de chaleur entre deux surfaces :

Em : Rayonnement incident tombant sur la surface

Eq : Rayonnement effectif, flux de rayonnement qui quitte le corps

Eb : pouvoir émissif total du corps noir

a : facteur d'absorption

P : Facteur de réflexion

Flux de chaleur transporté du corps (1) au corps (2)

Q1 = Ed - Em

$$q_1 = 4,92S1F1 = \left[ \left( \frac{n_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{n_2}{100} \right)^4 \right]$$

F1 = Facteur relatif au corps gris

$$F = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{s_1} - 1 \right) + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{c_2} - 1 \right)}$$

Pouvoir émissif du corps

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

II.B.2. Transmission de la chaleur entre deux fluides séparés par une paroi :

- Régime permanent, température uniforme :
- Considérons deux fluides séparés par une paroi cylindrique (cas d'un fluide circulant dans un tube entouré du second fluide).
- La formule de NEWTON exprime que le flux de chaleur passant au flux de chaud au flux de froid est :

$$Q = KS (T-T) = KSA \quad (2.15)$$

K est défini par :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k} + \frac{R}{\lambda \text{Log}(R/R)} + \frac{1}{k} \frac{R}{R'}$$

On peut écrire :



$$\frac{1}{K} = \sum 1/k$$

En posant :  $k_1 = k$

$$K_2 = \frac{\lambda}{R' - R} \cdot \frac{Rm}{R} = \frac{\lambda}{e} \cdot \frac{Rm}{R} = \frac{\lambda}{e} \cdot \frac{Dm}{D}$$

$$K_3 = k' \frac{R'}{R} = k' \frac{D'}{D}$$

$k_1, K_2, K_3$  : Coefficients de transmission par conductibilité ou par convection, rapportés à la surface intérieure

- Régime permanent, température non uniforme :
- C'est le cas où l'un au moins des fluides se chauffe ou se refroidit le long de la surface d'échange.
- Extension de la formule de NEWTON :

On appelle coefficient de perte de grandeur  $\alpha$  et  $\beta$ , tel que :

$$\alpha = \frac{\text{Flux de chaleur à travers la surface de chauffe}}{\text{Flux de chaleur perdu par le fluide chaud}} \leq 1$$

$$\beta = \frac{\text{Flux de chaleur à travers la surface de chauffe}}{\text{Flux de chaleur gagnée par le fluide froid}} \geq 1$$

En général  $0,95 \leq \alpha \leq \beta \leq 1,05$

Très souvent, l'un des fluides n'est pas en contact avec l'extérieur, le coefficient correspondant est égal à 1 :

On appelle  $r$  le rapport des débits calorifiques

$$r = \alpha PC / \beta pc$$

Le bilan thermique d'échangeur s'écrit :

$$Q = \alpha PC - (T_a - T) = \pm \beta pc (t_a - t_1)$$

- Pour la circulation méthodique, c'est-à-dire parallèle et de sens contraire de deux fluides.
- Pour la circulation antiméthodique c'est-à-dire parallèle et de même sens de deux fluides.



La formule de (2,15) peut être étendue au cas où les températures sont variables, à condition que le coefficient global de transmission  $K$  soit de même pour tous les points de la surface en prenant la valeur de  $\Delta$  la moyenne logarithmique des écarts de température côté chaud.

$$\Delta_n = T_o - t_o$$

Et côté froid :

$$\Delta_1 = T_1 - t_1$$

$$\Delta_m = (\Delta_o - \Delta_1) / \text{Log}(\Delta_o / \Delta_1)$$

Température moyenne des deux fluides :

$$T_m = (t_a \pm r T_a + \Delta) / (1 \pm r)$$

$$T_m = [t_a \pm r (T_e - \Delta)] / (1 \pm r)$$

- formule de Colburn :

o Lorsque  $K$  varie d'un point à l'autre, mais est une fonction de  $\Delta$  ce qu'on peut admettre approximativement si l'amplitude ses variations ne dépasse pas le rapport de 1 et 2 on peut écrire la formule (2.15) sous forme de COLBURN :

$$Q = S (K\Delta)_n \quad (2.16)$$

$$(K\Delta)_n = (K\Delta_1 - K_1\Delta / \text{Log} (K_0\Delta_1 / K_1\Delta_0))$$

II.C. Résistance des matériaux :

II.C.1. Généralités :

Il serait mieux de rappeler quelques théories sur les coques soumises à une pression intérieure pour que nous puissions suivre sans ambiguïté les calculs concernant le corps.

Des auteurs comme J. Leconte, [1984] utilisent la méthode suivante pour trouver l'équation de Laplace.



On considère une coque mince :

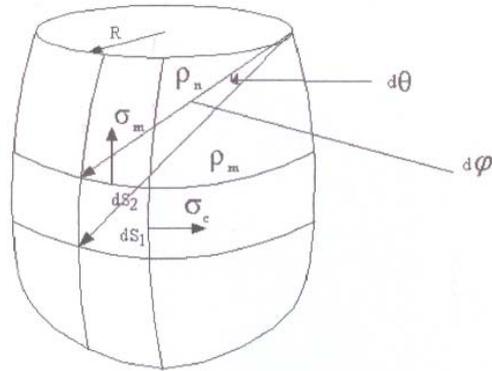


Figure II.1- : une coque mince soumise à une pression intérieure

$\sigma_c =$  *contra int circonférenciell,*

$\sigma_m =$  *Contra int médiane,*

Avec :  $\rho_m =$  *Rayon de la courbure de la parallèle*

$e =$  *épaisseur,*

$d\theta$  et  $d\phi$  : *variation d'angles*

Les forces agissant sur les tranches sont :

$$\sigma_c \cdot e \cdot dS_1 \text{ et } \sigma_m \cdot e \cdot dS_2$$

$$\text{Avec : } dS_1 = \rho_m \cdot d\theta \text{ et } dS_2 = \rho_n \cdot d\phi$$

La force de pression suivant la normale, on a l'égalité suivante :

$$\rho \cdot dS_1 \cdot dS_2 = \sigma_m \cdot e \cdot dS_2 \cdot d\theta - \sigma_c \cdot e \cdot dS_1 \cdot d\phi$$



D'où l'équation de Laplace :

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_c}{R} + \frac{P}{e} = 0$$

**II.C.2 Cas de l'enveloppe cylindre soumise à une pression intérieure :**

$$\rho_m = \infty$$

$$\rho_n = R$$

L'équation de Laplace devient :

$$\frac{\sigma_m}{\infty} + \frac{\sigma_c}{R} + \frac{P}{e} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_c = \frac{P}{e}$$

L'équilibre entre l'effet de fond dû à la pression intérieure et le système de contraire apparaît dans l'épaisseur de la contrainte méridienne :

$$\Pi.R^2.P = 2\Pi.R.\sigma_n.e$$

D'où l'expression de la contrainte méridienne :

$$\sigma_n = \frac{R.P}{2.e}$$

Les formules (3) et (5) nous permettent de conclure que la contrainte méridienne est deux fois moins faible que celle circonférentielle.

De ce fait, l'utilisation des soudures suivant la longueur du cylindre nous paraître néfaste à moins que celles-ci soient faites avec un coefficient de soudure assez élevé.

D'ailleurs, il ne faut pas négliger l'effet de la corrosion provoquée par l'oxydation du métal lors du moment des soudures. Cela influe sur la durée de vie de l'appareil.



Chapitre III

## REALISATION DE L'APPAREIL

### III.1 LA D.I.C. : (Détente instantanée contrôlée)

#### ▪ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La D.I.C. est une technologie de traitement thermomécanique. Elle consiste à soumettre, pendant quelques secondes, les produits à traiter à une température inférieure à 200°C pour éviter le cuisson et préserver la texture, sous une pression allant de 2 à 20 bars maximum. Ils sont refroidis très rapidement par passage à une basse pression brusque d'ordre d'une dizaine de mbars.

Ce refroidissement par détente rapide entraîne une auto vaporisation instantanée d'une partie de l'eau contenue dans les produits.

#### ▪ DOMAINES D'APPLICATION

Les champs d'application de la technologie D.I.C., même si elle est assez récente, sont très élargis.

##### ➤ Application au séchage

Pour les fruits et légumes même les plus thermosensibles. Elle permet d'obtenir de faible humidité résiduelle, une forte capacité de réhydratation et aussi la diminution de la charge bactérienne.

##### ➤ . Application à la débacterisation.

La D.I.C. effectue un traitement de type U.H.T., applicable aux produits solides ou en morceaux. La saveur et la texture étant encore bien conservées.

##### ➤ Application à l'extraction des huiles aromatiques

A partir d'herbes aromatiques, la D.I.C. peut être appliquée pour l'extraction d'huiles essentielles. On n'a pas besoin de broyage préalable des produits à distiller ni d'utiliser de solvants.

#### ▪ LES AVANTAGES :

- Elle permet d'obtenir des produits de qualité comparable aux aliments lyophilisés avec un coût inférieur au séchage à air chaud.

- Elle réduit le coût de production par la rapidité du traitement, inférieure à la minute.



- Amélioration de la qualité des produits en séchage grâce à une opération de séchage réduite de moitié lorsque celle-ci est couplée avec la D.I.C.
- Le procédé respecte bien l'environnement en émettant moins de rejet

### III. 2 Description des éléments du séchoir :

Le séchoir est constitué de quatre parties principales distinctes, à savoir :

- La cellule de séchage (étuve).
- Le Compresseur d'air comprimé.
- La chaudière.
- La tuyauterie

La cellule de séchage : c'est un récipient sous une forme cylindrique fait en tôle inoxydable dans laquelle on met le produit à sécher. L'ouverture et la fermeture sont assurées par le système de bridage entre la cellule et son couvercle.

Le Compresseur : c'est un générateur d'air comprimé, composée de :

- Un moteur électrique triphasé assurant la rotation du compresseur
- Un cylindre dans laquelle on comprime l'air à la pression atmosphérique pour le monter à une pression supérieure
- Deux filtres assurant la propriété de l'air comprimé à la sortie de cet appareil.

La chaudière, c'est le générateur de la vapeur d'eau assurant le chauffage d'air comprimé circulant dans l'échangeur en tube cuivré, elle contient aussi :

- L'organe de sécurité : la soupape de sécurité
- L'organe de chauffage assuré par la résistance électrique triphasée.
- Les deux bouchons : l'un assure le remplissage et l'autre celui du vidange.
- Un tube en verre (voyant) par laquelle on trouve le niveau d'eau dans la chaudière.

Le tube en cuivre (échangeur) qui reçoit la chaleur venant de la vapeur d'eau et le transmet à l'air comprimé.

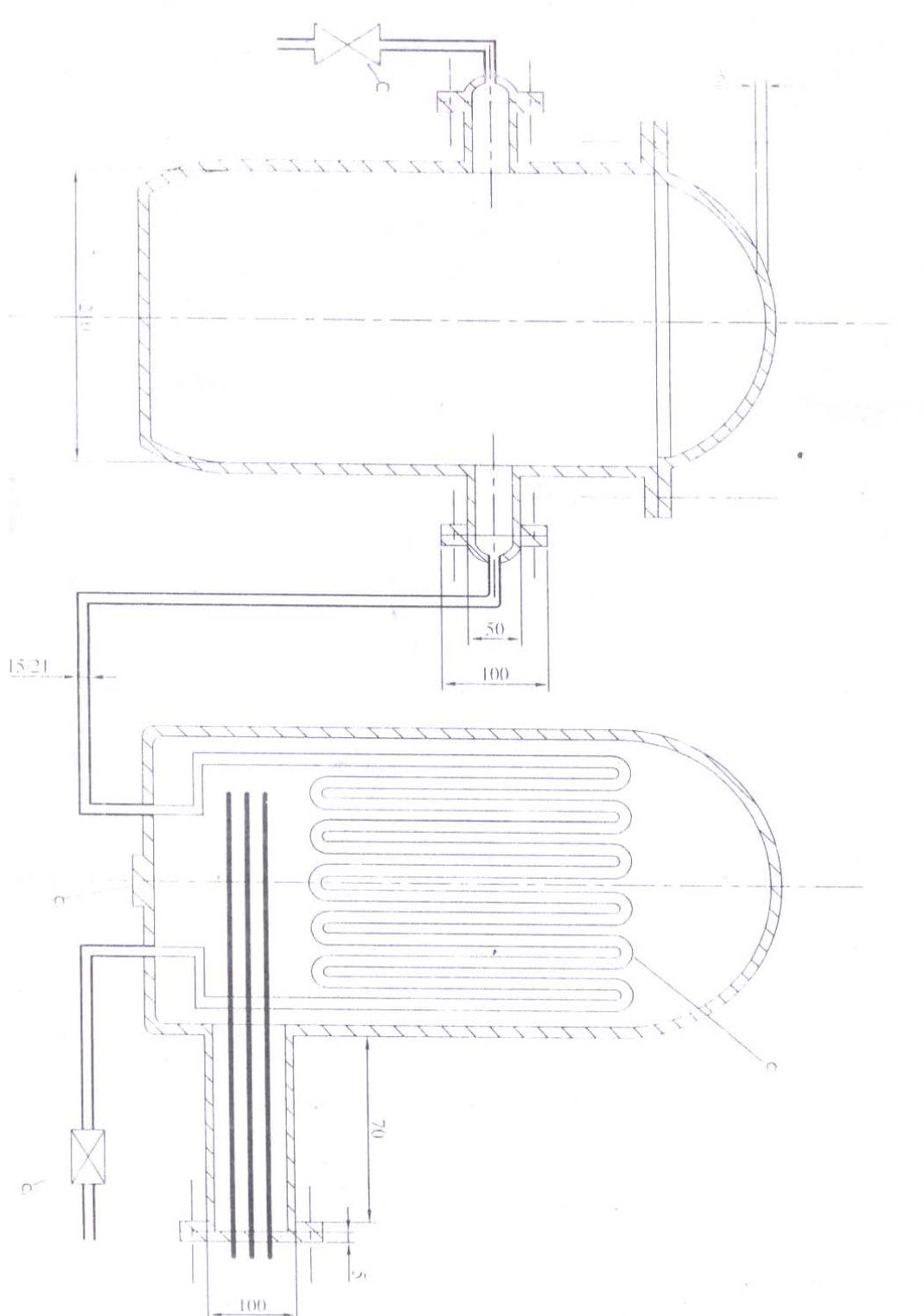


La tuyauterie est composée de :

Tube inoxydable de 15/21 assurant la conduction de l'air.

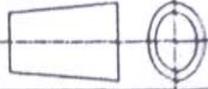
Les deux vannes : l'une en amont du chaudière assurant le passage de l'air comprimé dans la chaudière et le remplissage de l'étuve. L'autre en aval assurant sa détente.

La figure ci dessous montre le séchoir et ses composantes :



# SECHOIR

E.S.P.A	
Ech1:10	PL-01

24	1	Vanne de remplissage		15 / 21
33	1	Bouchon		
02	1	Serpentin en cuivre		12 / 14
C1	1	Vanne de détente		20 / 27
10	1	Résistance électrique		
9	1	Chaudière	TPI	5
8	1	Bouchon de remplissage d'eau		
7	1	Tuyauterie		15 / 21
6	1	Voyant		
5	1	Soupape de sécurité		
4	2	Support		
3	1	Cellule de séchage	TPI	
2	1	Couvercle du réacteur		
1	2	Manomètre		
Rep	Nb	Désignation	Matière	Obs
<b>SECHOIR</b>			E.S.P.A	
			Ech1:10	PL-02



### III.3 Dimension des éléments du séchoir :

#### III .3.1 Cellule de séchage :

C'est un récipient sous une forme cylindrique, fait en acier inoxydable.

L'étuve est un ensemble compact caractérisé par sa dimension définissant le volume utile du séchoir. Le dimensionnement se rapporte :

- ✓ A la détermination de l'épaisseur des enveloppes.
- ✓ A l'étude de la contrainte due au serrage des boulons.

#### III.3.1.1 Epaisseur de tôle utilisée :

D'après la théorie des coques, on a les formules

$$e = \frac{Pr}{\sigma_{ad}} \quad (3.1)$$

$$e = \frac{Pr}{S - 0,5P} \quad (3.2)$$

$\sigma_{ad}$  Étant la contrainte admissible

$S$  : L'intensité de contrainte de membrane maximale.

La valeur de cette contrainte est égale à la résistance élastique du matériau  $R_{po,2}$

Certains ouvrages préfèrent utiliser la formule suivante pour déterminer l'épaisseur.

$$e = \frac{Pd}{2\sigma_{ad} + P} \quad (3.3)$$



Ou encore :

Application numérique :

$$p = 1 \text{ MPa}$$

$$D = 210 \text{ mm}$$

$$S = 50 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ad} = 40 \text{ MPa}$$

Nous trouvons  $e=3\text{mm}$  d'après les trois formules.

- Contrainte due au serrage des boulons :

Pou éviter les fuites il faut assurer l'étanchéité des jonctions.

Il faudrait alors utiliser des rondelles entre les écrous et les boulons.

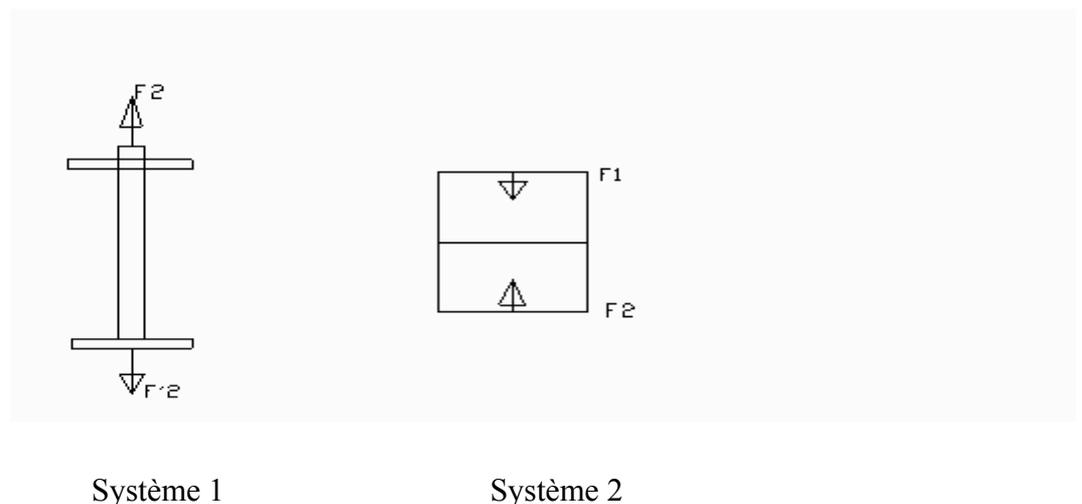


Figure3.1 : Effort appliqué sur le boulon et sur la rondelle

En considérant le système 1 et en projetant les forces suivant l'axe du boulon, on a

$$F_1 - F_2 = 0 \text{ Soit } F_1 = F_2$$

Faisant le même démarche pour le système 2

$$F_1 - F'_1 = 0 \text{ et } F_1 = F'_1$$



Or :

$$F_1 = F_2 \text{ et } F_1' = F_2' \text{ en vertu du principe d'action mutuelle.}$$

Nous voyons maintenant que le boulon est sollicité à la traction par les forces

$$F_2 = F_2' = F$$

Et que les rondelles en tubes sont comprimées par des forces égales et opposées.

$$F_1 = F_1' = F$$

En d'autre terme, le boulon s'allonge tandis que les rondelles se raccourcissent.

$$\text{L'allongement du boulon se traduit par l'équation : } \Delta l_2 = \frac{F_1}{ES_2}$$

$l$  : Longueur initiale

$F$  : Force

$E$  : Module d'Young.

$S_2$  : Section du boulon.

Et le raccourcissement des rondelles par :

$$\Delta l_1 = \frac{F_1}{ES_1}$$

$$F_2 = F_2' = F$$

$$F_1 = F_1' = F$$

Soit  $P$  le pas de filetage.

$$\text{On a donc } \Delta l_1 = P - \Delta l_2$$

Et par conséquent :

$$F = P \frac{ES_1 S_2}{l * e(S_1 + S_2)} \quad (3.4)$$



On utilise des boulons de 20,

$$\text{Rondelle : } D_i = 21 [\text{mm}]$$

$$D_e = 36 [\text{mm}]$$

$$l = 80 [\text{mm}]$$

$$E = 2,105 \text{ MPa}$$

$$e = 3 [\text{mm}]$$

$$P = 2,5 [\text{mm}]$$

Nous trouvons :  $F = 10\,2528 \text{ N}$

$$\sigma_1 = 532 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 250 \text{ MPa}$$

Pour une résistance à la traction égale à  $R_{po} = 190 \text{ MPa}$ , nous avons besoin de :

$$n = 532/190 = 2.8 \text{ boulons. Mettons en } 3$$

▪ Contraintes dues au pression interne + serrage

Si nous appelons Q la force due à la pression interne, A la force de traction du boulon et B celle de la compression, on a par un raisonnement analogue au précédent :

$$A = F + Q \frac{ES_2}{E(S_1 + S_2)}$$

$$B = F - Q \frac{ES_2}{E(S_1 + S_2)}$$

Application numérique :

La force Q due à la pression interne est :  $Q = p \pi D^2 / 4$

Pour  $D = 210 \text{ mm}$  et  $p = 1 \text{ MPa}$ , on trouve

$$Q = 339292 \text{ N}$$

$$A = 172000 \text{ N}$$

$$B = -143533 \text{ N}$$

En fin de compte, nous avons besoins :  $N = 172000/190 * 114 = 7,84$

⇒ Utilisons 8 boulons de 20



### III.3.2 Compresseur:

Le gaz est pris à la pression atmosphérique pour être porté à une pression supérieure ; la machine qui réalise cette opération est le compresseur.

La puissance du compresseur: on utilise un compresseur à piston et isotherme. On utilise une pression de 10 bars.

#### III.3.2.1 La compression isotherme :

La totalité de la chaleur fournie par le travail de compression est évacuée à l'extérieur grâce à un refroidissement énergétique ; la température reste constante et le gaz évolue suivant la loi de MARIOTE :

$$PV = C^{te}$$

Dans ces conditions le travail de compression proprement dit et le travail total par cycle ont la même valeur :  $\tau$

$$\begin{aligned} \tau &= \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv \\ &= P_1 \cdot v_1 \cdot \text{Log} \frac{P_2}{P_1} = 2,302 \cdot P_1 v_1 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \end{aligned}$$

Expression homogène dans laquelle les unités doivent appartenir au même système

Ainsi dans le système pratique :

$v_1$  représente soit le volume du cylindre en  $m^3$  ; soit le volume

spécifique du gaz aspiré en  $m^3/kg$  ;

$P_1$  et  $P_2$  expriment les pressions absolues en  $kg/m^2$ .

$\tau$  représente soit le travail par tour en  $kgm$  si  $v_1$  désigne le volume du cylindre, et le travail unitaire par kilogramme de gaz si  $v_1$  désigne un volume spécifique.

L'évolution étant iso thermique, on pourra dans l'équation précédente remplacer :

$P_1 v_1$  Par  $P_2 v_2$ , si l'on connaît les conditions finales au lieu des conditions initiales ;

$\frac{P_2}{P_1}$  par  $\frac{v_1}{v_2}$ , si l'on connaît le rapport des volumes au lieu de celui des pressions ;



$P_1 v_1$  par  $RT$ , si l'on connaît la température  $t$  d'évolution du gaz  $v_1$  désignant alors le volume spécifique à la pression  $P_1$ ,  $R$  la constante spécifique du gaz considéré ( $R=29,27$  pour l'air) et  $T=t+273$  sa température absolue.

Avec le même compresseur, le travail théorique par kilogramme d'air, si l'aspiration s'effectue à la température de  $20^\circ\text{C}$ , a pour valeur :

$$\tau' = 2,302RT \log \frac{P_2}{P_1}$$

D'après les formules précédentes, donnant le travail en fonction du volume initial  $v_1$  et des pressions, permettent en divisant par le temps, d'obtenir la puissance théorique en fonction des pressions et du débit. Le débit- volumique d'un compresseur se mesure aux conditions de l'aspiration. Si celle-ci s'effectue à la pression atmosphérique normale ( $1,033 \text{ kg /cm}^2$  ou  $760 \text{ mm}$  de mercure), la puissance en chevaux et le débit en  $\text{m}^3/\text{min}$  sont liés par les relations :

$$P_{is} = 2,302 \times \frac{10330}{75 \times 60} q_{nec} \log \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_{is} = 5,28 q_{nec} \log \frac{P_2}{P_1}$$

#### Application numérique :

$$\tau' = 199006 \text{ J / kg}$$

$$P_{is} = 2 \text{ ch}$$

$$p_1 = 10330 \text{ kg / m}^3$$

$$P_2 = 11,0330 \text{ kg / m}^3$$

$$q_{nec} = 0,348 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$R = 29,27 \text{ UI}$$

#### **III.3.2.2** Filtre à l'air :

Sans précaution particulière, l'air comprimé se trouverait chargé de poussière, les unes contenues dans l'air atmosphérique aspiré par le compresseur, les autres provenant de l'oxydation du lubrifiant ou des canalisations en acier.

En conséquence, une double filtre est nécessaire :



-En amont du compresseur, un filtre efficace de l'air aspiré, traverse les mailles de filtre tamis en toile fine ou passe à travers les chicanes métalliques huilées qui agglutinent les poussières le long des parois. En effet, l'air atmosphérique dans les agglomérations urbaines ou industrielles contient 5 ou 20 mg de poussière par m<sup>3</sup> et cette proportion peut s'élever jusqu'à 100 mg au voisinage d'industries très poussiéreuses comme par exemple les cimenteries.

Cette première filtration, qui a pour rôle primordial de protéger les compresseurs en évitant une usure prématurée des segments de pistons ou des palettes ainsi qu'un encrassement rapide des clapets, contribue en outre à l'épuration de l'air du réseau.

- En aval du compresseur, un filtre complémentaire est placé avant chaque poste d'utilisation afin de retenir, avec les poussières atmosphériques non déposées sur les filtres d'aspiration, les particules solides provenant de l'oxydation de l'huile de graissage. On utilise à cet effet des bougies filtrantes poreuses en céramique ou en métal fritté.

### **III.4 La Chaudière**

#### **III.4.1 Généralités :**

Une chaudière est un appareil spécial pour produire de la vapeur. Elle peut être chauffée par combustion, par la résistance électrique ou par le passage de gaz chaud dans le cas des chaudières de récupération.

Actuellement, un générateur de vapeur est caractérisé par la puissance thermique [kcal/h] car les productions horaires de vapeur par unité de surface de chauffage peuvent être très différentes suivant la conception et la constriction de l'appareil, c'est pourquoi l'indication de la surface de chauffage ne présente plus une grande signification.

Les accessoires d'une chaudière peuvent être résumés comme suit :

- Une soupape de sécurité, au minimum pour protéger contre la surpression. Elle est placée sur l'appareil. Pour ce cas, il faut que la perte de charge entre l'appareil et la soupape soit inférieure à 3% de la pression de réglage.
- Une vis de vidange.
- Une vanne de remplissage d'eau.



- Un tube en verre voyant indique le niveau d'eau dans la chaudière.
- Un manomètre indique la pression de la vapeur.
- L'élément de chauffage : une résistance électrique en U est immergée dans l'eau pour assurer le chauffage et la vaporisation de l'eau de la chaudière.
- L'échangeur en tube de cuivre en forme de serpentin reçoit la chaleur venant de la vapeur d'eau et la transmet à l'air comprimé qui y circule.  
On va voir d'abord l'épaisseur et la longueur du tube.

### III .4.2 Détermination de l'épaisseur du tube :

D'après l'abaque pour le tube en cuivre, on trace une ligne horizontale à l'ordonnée qui donne la valeur du taux de travail du métal en kg/mm<sup>2</sup> jusqu'à l'intersection de la courbe inclinée correspondant à la valeur de la pression dans le tube et on lit sur l'échelle supérieure, la valeur de  $\frac{e}{d}$

L'épaisseur théorique à donner au tube est trouvé, sur l'abaque pour le tube en cuivre par le processus suivant:

Il existe plusieurs formules pour le calcul de l'épaisseur à donner aux tubes.

Les plus fréquemment employées sont les suivantes :

$$\text{Formule de LAME : } e = (d/2) \sqrt{\frac{T+p}{T-p}} - 1 \quad (3.5)$$

$$\text{Formule de WINCKLER : } e = (pd/2T)[1 + (1 + 3p/4T)] \quad (3.6)$$

$$\text{Formule généralement utilisée en plomberie : } e = pd/2T \quad (3.7)$$

$$\text{Formule de D.BOULIAU : } e = pd/(2T - 1,14P) \quad (3.8)$$



D'après cette dernière formule (qui semble donner les résultats les plus exacts, notamment pour les fortes épaisseurs), en utilisant l'abaque, par traçage d'une ligne horizontale à l'ordonnée, la valeur du taux de travail du métal pour le cuivre est égale à  $3\text{kg/mm}^2$ . Avec une pression utilisée équivalente à 10 bars.

On trouve  $e = 0.2\text{mm} < 1\text{mm}$

D'où l'épaisseur du tube est vérifiable.

### III.4.3 La longueur totale du tube en cuivre :

Pour calculer la longueur de ce tube, on utilise les formules dans le calcul des échangeurs qui fait intervenir des notions relatives soit à l'écoulement des fluides, soit à la transmission de la chaleur.

On a besoin de 29l d'air chaud à  $100^\circ\text{C}$  par 5 secondes et sous la pression de 5 bars.

Débit d'air nécessaire :  $q_{nec}$

$$q_{nec} = \frac{V_{\text{reacteur}}}{T_{\text{remplissage}}} \quad (3.9)$$

Application numérique :

$$q_{nec} = 5,81.\text{s}^{-1}$$

$$V_{\text{reacteur}} = 29\text{l}$$

$$T_{\text{remplissage}} = 5\text{s}$$

La masse d'air nécessaire :  $m$

Supposons que l'air est un gaz parfait, on a donc :

$$P.V = m.r.t \Rightarrow m = \frac{P.q_{nec}}{r.t}$$



Application numérique :

$$P = 5.10^5 [\text{Pa}]$$

$$q_{\text{nec}} = 5,8.10^{-3} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$m = 0,035 [\text{kg/s}]$$

$$r = 287 \text{UI}$$

$$t = (20 + 273)^\circ\text{K}$$

- La quantité de chaleur nécessaire pour chauffer la masse d'air de 20°C à 100°C :

$$Q = m \cdot c_{\text{air}} \cdot (t_1 - t_0) \quad (3.10)$$

Application numérique

$$Q = 2470 [\text{Kcal} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$m = 0,035 [\text{kg/s}]$$

$$c_{\text{air}} = 0,245 [\text{Kcal} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$$

$$t_1 = 100^\circ\text{C}$$

$$t_0 = 20^\circ\text{C}$$

- Nombre de RENOLDS :

$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu g} \quad (3.1 \ 1)$$

- Détermination des u et  $\rho$  :

$$u = \frac{q_{\text{nec}}}{S_{\text{cuivre}}} \quad (3.12)$$

$$\rho = \frac{m_{\text{air}}}{V_{\text{reacteur}}} \quad (3.12)$$



Application numérique :

$$\begin{aligned} \text{Re} &= 98877,6 \\ \rho &= 5,95[\text{kg/m}^3] \\ \mu &= 3,78.10^{-6}[\text{Kg.s.m}^{-2}] \\ g &= 9,8[\text{ms}^{-2}] \\ d &= 12\text{mm} \\ u &= 51,3[\text{m/s}] \end{aligned}$$

$\text{Re} = 98877,6 < 2100$  on a un écoulement turbulent

Calcul le nombre BIOT ou NUSSELT :

Pour Nu gaz, d'après MC ADAMS donne :

Application numérique :

$$\boxed{\text{Nu} = 0,02 \text{Re}^{0,8}} \quad (3.13)$$

$$\text{Nu} = 198,3$$

➤ Calcul de coefficient de transmission :

$$\boxed{K_{\text{air}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d}}$$

Application numérique :

$$K_{\text{air}} = 377[\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$\lambda = 0,0228[\text{Kcal/h.m} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$d = 12[\text{mm}]$$

$$\text{Nu} = 198,3$$

Calcul de coefficient global : K

$$\boxed{\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\text{air}}} + \frac{r}{\lambda \cdot \ln(r'/r)} + \frac{1}{k'} \cdot \frac{r}{r'}} \quad (3.14)$$



Application numérique :

$$K = 352[\text{Kcal}/\text{m}^2.\text{h}.\text{°C}]$$

$$K_{\text{air}} = 377[\text{kcal}/\text{h}.\text{m}.\text{°C}]$$

$$K' = 15000[\text{kcal}/\text{m}^2.\text{h}.\text{°C}]$$

$$\lambda = 300[\text{kcal}/\text{h}.\text{m}.\text{°C}]$$

$$r' = 7[\text{mm}]$$

$$r = 6[\text{mm}]$$

Or d'après la formule de Newton relative à des parois cylindriques :

$$Q = K.S.(t_{\text{vapeur}} - t_0)$$

$$\text{On a : } S = \frac{Q}{K(t_{\text{vapeur}} - t_0)}$$

$$\boxed{L = \frac{S}{\pi.d}} \quad (3.15)$$

Application numérique :

$$t_{\text{vapeur}} = 120\text{°C}$$

$$t_0 = 20\text{°C}$$

$$S = 0,071[\text{m}^2]$$

$$L = 1,90[\text{m}]$$

$$d = 12[\text{mm}]$$

$$K = 352[\text{kcal}/\text{m}^2.\text{h}.\text{°C}]$$

$$Q = 2470 \text{ kcal h}^{-1}$$

Le tube de cuivre est en forme de serpentin dans la chaudière.



### III .4.4 Détermination de l'épaisseur de l'enveloppe de la chaudière :

On sait que la chaudière se fait en tôle d'acier inoxydable.

- Epaisseur de tôle utilisée:

D'après la théorie des coques, on a les formules :

$$e = \frac{rP}{\sigma_{ad}}$$

$$e = \frac{Pr}{S - 0,5P}$$

$\sigma_{ad}$  Étant la contrainte admissible.

La valeur de cette contrainte est égale à la résistance élastique du matériau  $R_{po,2}$

Certains ouvrages préfèrent utiliser la formule suivante pour déterminer l'épaisseur.

$S$  : L'intensité de contrainte de membrane maximale

Ou encore :

$$e = \frac{Pd}{2\sigma_{ad} + P}$$

Application numérique :

$P$  : Pression statique = 1 MPa

$d = 210$  mm

$\sigma_{ad} = 40$  MPa

$S = 50$  MPa

On trouve l'épaisseur  $e = 3$  m < 5m

D'où l'épaisseur est vérifiée.



### III.4.5 La puissance de la chaudière : $P_{\text{chaudière}}$

D'après le principe de la calorimétrie : la quantité de chaleur donnée par la résistance chauffante est égale à la quantité de chaleur reçue par le système.

-Calcul de chaleur reçu par le système eau – tube cuivré – parois - air

$$Q_{\text{reçue}} = Q_{\text{eau}} + Q_{\text{tube}} + Q_p + Q_{\text{air}}$$

$Q_{\text{eau}}$  : chaleur reçue par l'eau.

$Q_{\text{tube}}$  : chaleur reçue par tube cuivré.

$Q_p$  : chaleur reçue par la paroi.

Eau :

$m_o$  : masse d'eau 10 kg.

$C_o$  : chaleur spécifique de l'eau : 1kcal/kg°C.

$\theta_{fe}$  : Température final de l'eau : 120°C

$\theta_{ie}$  : Température initiale de l'eau : 20°C

$$\begin{aligned} Q_{\text{eau}} &= m_o \cdot C_o (\theta_{fe} - \theta_{ie}) \\ &= 10 \times 1 (120 - 20) \end{aligned}$$

$$Q_{\text{eau}} = 1000 \text{ kcal}$$

Tube cuivre :

$m_t$  : masse du cuivre (à déterminer).

$C_t$  : chaleur spécifique du cuivre : 0,092 kcal/kg°C.

$\rho_t$  : masse volumique du cuivre : 8890 kg/m<sup>3</sup>.

$\theta_{ft}$  : température finale du cuivre : 120°C.

$\theta_{it}$  : température initiale du cuivre : 20°C.



Calcul de la masse du cuivre :  $m_t$

$$V_t = \frac{\pi}{4} h_t (D_e^2 - D_i^2)$$

Avec  $D_e = 14 \text{ mm}$

$D_i = 12 \text{ mm}$

$h_t = 1900 \text{ mm}$

$$V_t = \frac{\pi}{4} \times 1,9(0,014^2 - 0,012^2)$$

$$V_t = 7,76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$m_t = 7,76 \cdot 10^{-5} \times 8890 = 0,69 \text{ kg}$$

$$Q_t = m_t \cdot C_t (\theta_f - \theta_i)$$

$$Q_t = 0,69 \times 0,092(120 - 20)$$

$$Q_t = 6,35 \text{ kcal}$$

Paroi :

$$Q_p = m_p \cdot C_p (\theta_{fp} - \theta_{ip})$$

$m_p$  : masse de l'acier inoxydable.(à déterminer).

$C_p$  : chaleur spécifique de l'acier inoxydable :  $0,12 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

$\rho_p$  : masse volumique de l'acier inoxydable :  $7930 \text{ kg/m}^3$ .

$\theta_{fp}$  : température finale de l'acier inoxydable :  $120^\circ\text{C}$ .

$\theta_{ip}$  : température initiale de l'acier inoxydable :  $20^\circ\text{C}$ .

Calcul de la masse de l'acier inoxydable

$$V_p = V_{\text{latéral}} + V_{\text{section}} = \frac{\pi}{4} [(D_2^2 - D_1^2) h_p + D_1^2 e]$$

$D_1 = 210 \text{ mm}$

$D_2 = 220 \text{ mm}$

$h_p = 850 \text{ mm}$

$e = 5 \text{ mm}$

$$V_p = 3,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_p = 3,69 \cdot 10^{-3} \times 7930 = 29,28 \text{ kg}$$

$$Q_p = m_p \times C_p (\theta_{fp} - \theta_{ip})$$

$$Q_p = 29,28 \times 0,12(120 - 20)$$

$$Q_p = 351,36 \text{ kcal}$$



$$Q_{\text{reçue}} = Q_{\text{eau}} + Q_{\text{tube}} + Q_p + Q_{\text{air}} = 1000 + 6,35 + 351,36 + 0,687$$

$$Q_{\text{reçue}} = 1358,39 \text{ kcal}$$

On utilise une résistance de 9000 watts montée en étoile triphasée, le chauffage se fait en 11 minutes.

#### III.4.6 Calcul de la soupape de sécurité :

La soupape de sécurité est un dispositif de sécurité. La chaudière est déjà munie d'une soupape de sécurité identique, pourtant nous avons essayé de la dimensionner afin de vérifier son efficacité.

La formule de J.RICARD est utilisable pour une vapeur surchauffée à 6 bars dans la chaudière :

$$Q = 201 * \alpha * S * \sqrt{\frac{P}{V}}$$

Q = débit en kg/s

$\alpha$  = coefficient de débit (de l'ordre de 0,6).

S = section de passage de la soupape en m<sup>2</sup>.

P = pression efficace en bars.

V = Volume spécifique de la vapeur en m<sup>3</sup>/kg.

#### APPLICATION NUMERIQUE :

$$\alpha = 0,6$$

$$S = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

$$P = 2 \text{ bars}$$

$$V = 0,3155 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$\text{On trouve } Q = 6,58 \cdot 10^{-2} \text{ kg /s}$$



### III.5 Tuyauterie :

La conduite est composée :

Des deux vannes, l'une 20/27 pour le détente et l'autre 15/20 entre la chaudière et le compresseur.

#### III.5.1. L'épaisseur de la conduite:

On utilise le tube en inox

En prenant l'extrême, dont la valeur plus élevée de la pression équivalent à 10 bars et en utilisant le même procédé du paragraphe (III.4.2), on obtient les résultats suivants :

Application numérique :

Taux de travail de métal : 8 kg/mm<sup>2</sup>

Pression à l'intérieur du tube : 10 bars

L'épaisseur du tube  $e = 0,9$  mm

Le résultat est vérifié car on utilise un tube de :

Diamètre intérieur  $D_i = 15$  mm

Diamètre extérieur  $D_e = 21$  mm

On peut utiliser donc un tube de 15/21

#### III.6 Dimensionnement du support :

Le support de notre appareil peut être formé par des poutres creux de section rectangulaire ou circulaire.

Dans notre cas, nous avons utilisé le support à section circulaire.

Le poids de l'appareil n'est pas négligeable, l'inéquation d'équarrissage est

donc :

$$\frac{F}{S} + \frac{p}{S} \leq R_p \quad (3.16)$$



F= force de compression  
P= poids de l'appareil  
S = Section de support  
 $R_p$ =résistance pratique

Application numérique :

$$E = 2.10^5 \text{ MPa}$$

$$R_e=25 \text{ MPa}$$

$$F = 16000 \text{ N}$$

$$P= 400\text{N}$$

Donc en prenant un coefficient de sécurité égale 1,7.

$$R_p = \frac{R_e}{1,7} = 14\ 705 \text{ MPa}$$

Supposons que l'épaisseur du support est égale au deuxième

L'équation d'équarrissage devient :

$$\frac{911D^2}{100} = \frac{16400}{100}$$

$$d' \text{ où } D \geq 70 \text{ mm}$$

$$e \geq 7 \text{ mm}$$

Appareil de mesure :

- Dynamomètre est suspendu sur un dispositif fixe pour éviter l'erreur de lecture due à la vibration. Sa partie inférieure est munie d'une pince permanente d'accrocher le panier plastique contenant le produit à peser.

On lit directement sur la partie intermédiaire à graduation la valeur de la masse du produit.

Précision : Tolérance maximale  $\pm 0,3$  de la charge (position zéro bien ajustée.)



Chapitre IV :

## **PROCEDURES EXPERIMENTALES ET EXPERIMENTATION**

### **IV.1 Procédures expérimentales :**

- Etapas à suivre :

Enlever de l'étuve le couvercle supérieur pour que leurs températures soient égales à celles des produits, avant l'opération.

On met le produit dans l'étuve et on le ferme.

On chauffe la chaudière jusqu'à ce qu'elle atteigne une pression de 2 bars montrée par le manomètre, puis on ouvre la vanne en amont de la chaudière pour l'alimentation en air comprimé. On ferme la vanne quand le manomètre sur l'étuve montre 5 bars, ensuite on la met sous pression pendant 10 secondes et on ouvre la vanne à sa gauche pour faire détendre l'air après, et ainsi de suite.

- Temps de manipulation : 18 secondes
  - Temps de remplissage d'air dans l'étuve (5 bars) : 5 secondes
  - Temps de mise en sous pression : 10 secondes
  - Temps de la détente : 3 secondes

D'où pendant une heure, on fait à peu près 200 manipulations

Dans cet expérience :

On fixe les paramètres comme : la pression à 5 bars, la température à 100°C pendant l'opération.

N.B :

Le triage a pour but d'écarter les rhizomes trop murs, pourris et infectés de champignons.



On arrête le séchage une fois que sa masse se stabilise en une valeur  $M_S$  correspondant à la masse anhydre.

Avant d'extraire les produits dans l'étuve, on doit attendre une heure de temps pour éviter le changement brusque de la température des produits en contact direct avec l'air ambiant.

Avant l'expérimentation, il est nécessaire de donner la notion sur l'appareil de mesure des poids d'un produit, dont :

#### **IV.2 Expérimentation :**

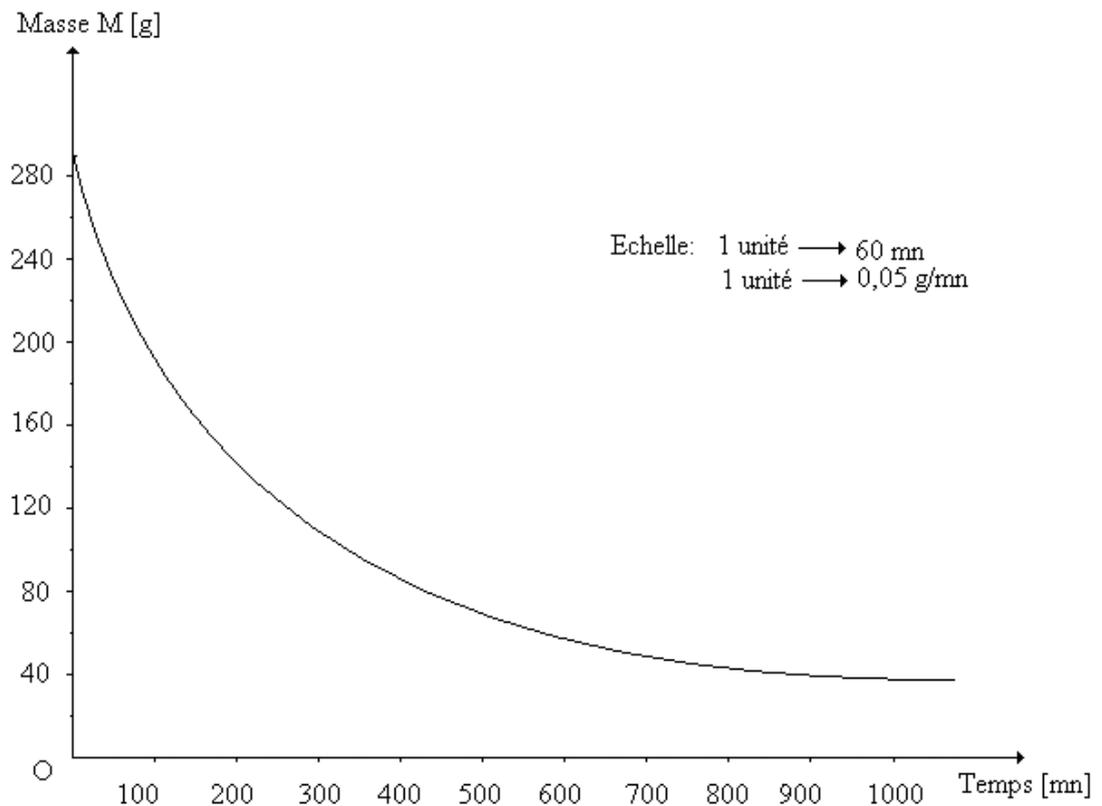
##### **IV.2.1 Cas d'un gingembre :**

Prendre trois échantillons, de 290g environ.

Après avoir bien nettoyé les rhizomes des gingembres, on les met dans l'étuve.

Temps (t) [mn]	Masse du produit M [g]	Humidité relative $\frac{\Delta M}{\Delta t}$
0	290	0
60	218	1,20
120	174	0,73
180	148	0,43
240	122	0,35
300	101	0,26
360	85	0,16
40	75	0,10
480	69	0,08
540	64	0,05
600	61	0,05
660	58	0,05
720	55	0,05
780	52	0,05
840	49	0,05
900	46	0,05
960	44	0,03
1020	42	0,03
1080	41	0,01

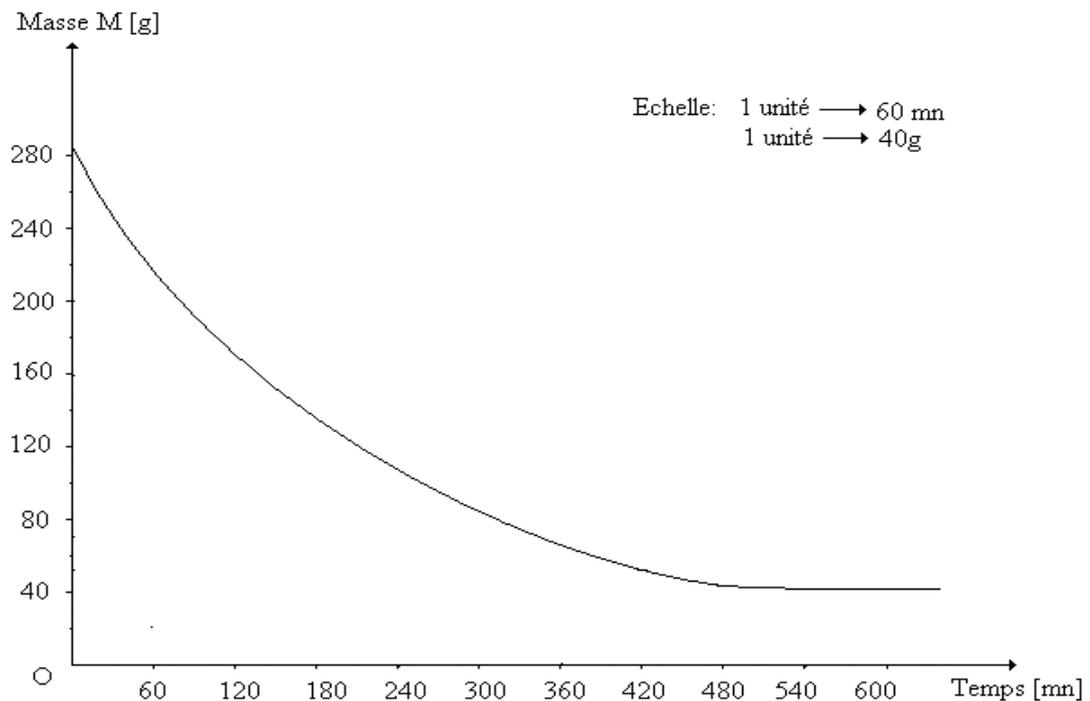
**Tableau n° 4.1:** Cas du gingembre pour l'air comprimé  $P = 2$  bars et à  $100^\circ\text{C}$



Graph n°4.1 : Courbe de séchage du gingembre pour l'air comprimé à 2bars et 100°C

Temps (t) [mn]	Masse du produit M [g]	Humidité relative $\frac{\Delta M}{\Delta t}$
0	290	0
60	200	1,5
120	160	0,6
180	134	0,43
240	106	0,43
300	83	0,38
360	67	0,26
420	51	0,16
480	45	0,10
540	43	0,03
600	41	0,03
660	41	0,03

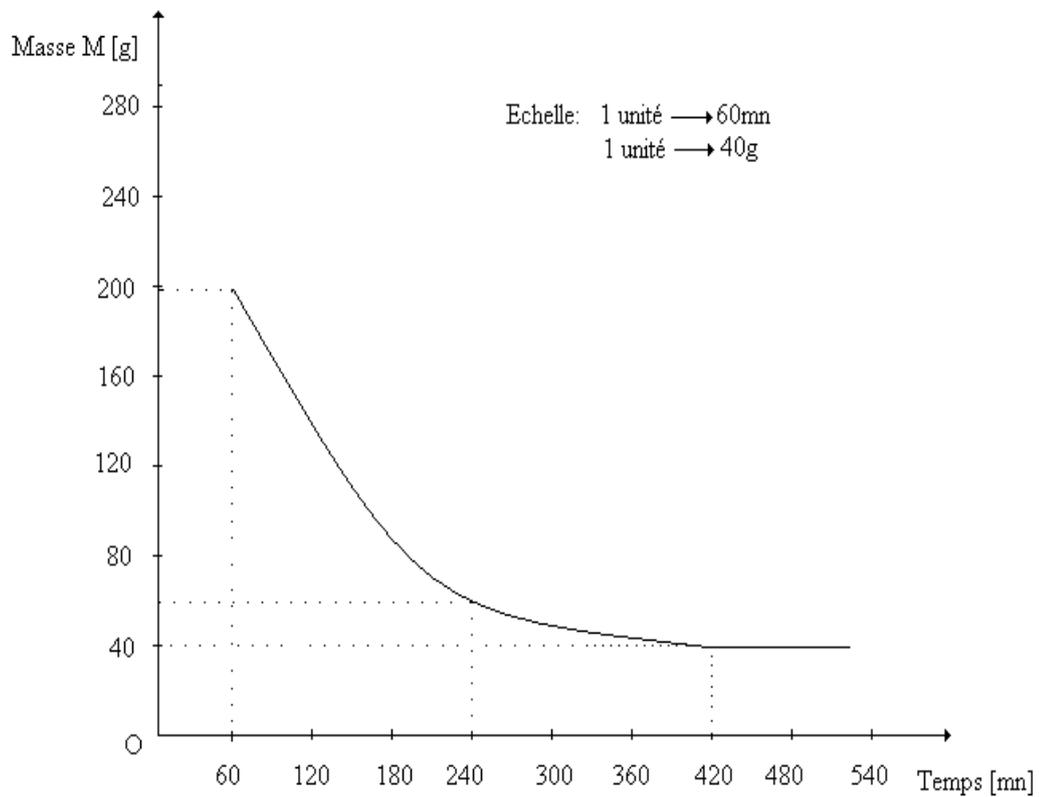
Tableau n°4.2 : Cas du gingembre pour l'air comprimé à 5bars et 70°C



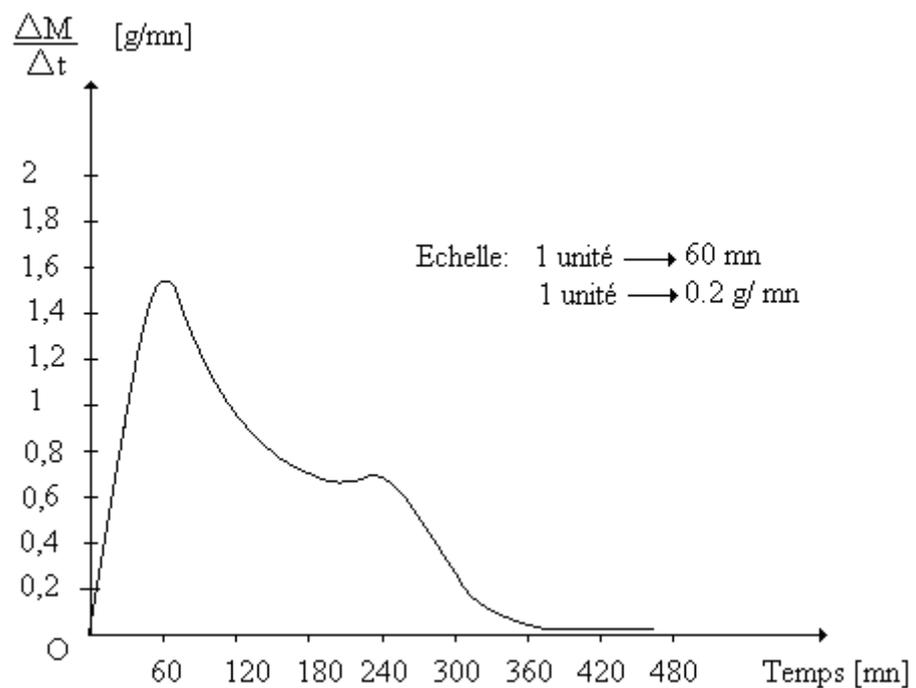
Graph n°4.2 : Courbe de séchage du gingembre pour l'air comprimé à 5bars et 70°C

Temps (t) (mn)	Masse du produit M en [g]	Humidité relative $\frac{\Delta M}{\Delta t}$
0	290	0
60	196	1,57
120	141	0,92
180	99	0,70
240	58	0,68
300	44	0,24
360	41	0,05
420	40	0,02
480	-	-
520	-	-

Tableau n°4.3 : Cas du gingembre pour l'air comprimé à 5 bars et 100°C.



Graph n°4.3.a : *Courbe de séchage du gingembre (à 5 bars et 100°C)*



Graph n°4.3.b : *Courbe de vitesse de séchage du gingembre (à 5 bars et 100°C)*

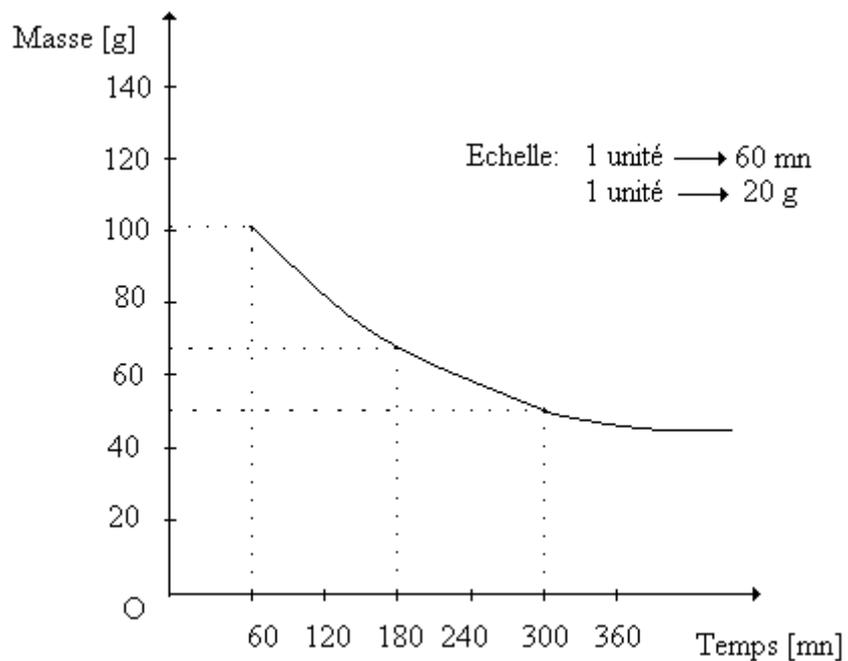


IV.2.2 Cas d'ananas :

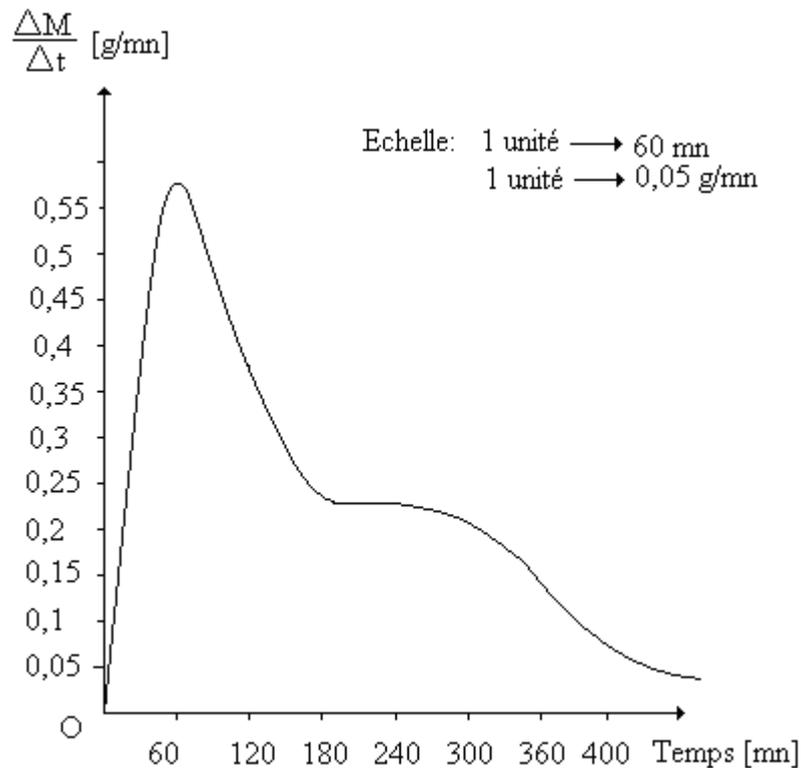
Trier, éplucher puis découper le produit en forme arrondie d'épaisseur de 1cm avant de les disposer dans l'étuve.

Temps (t) (mn)	Masse du produit M en [g]	Humidité relative $\frac{\Delta M}{\Delta t}$
0	139	0
60	104	0,58
120	81	0,38
180	67	0,23
240	58	0,23
300	54	0,15
360	54	0,07

**Tableau n°4.4:** Cas d'ananas pour l'air comprimé à 5bars et 100°C



**Graph n°4.4.a :** *Courbe de séchage d'ananas pour l'air comprimé (à 5bars et 100°C)*



Graph n°4.4.b : *Courbe de vitesse du séchage ananas (à 5bars et 100°C)*

**Interprétation :**

La masse d'eau évaporée est une fonction croissante de la température et pression d'air envoyée.

Les courbes n°4.3.b et n°4.4.breprésente la variation du flux de masse.

Elles permettent de visualiser la variation du flux d'eau évaporée  $dM / dt$  en fonction de temps.

En analysant les courbes, on peut dire que :

Pour les cas du gingembre et d'ananas : les flux d'eau évacuée croit rapidement au début de l'opération qui s'étend entre 0 et 60 mn et atteindre son extremum ; à partir de 60 mn les courbes adoptent une allure strictement décroissante, puis deviennent constantes durant un certain temps. Au environ de 240 mn, elle commence à décroître.



### **Conclusion de l'expérience**

La durée de séchage des produits dépend essentiellement de la température, de la pression et de la masse d'eau à enlever.

Pour le cas d'un gingembre :

- ✓ A la pression  $p = 2$  bars et à la température  $t = 100^{\circ}\text{C}$ , on a une durée de séchage de 18 heures (tableau n° 4.1).
- ✓ A la pression  $p = 5$  bars et à la température  $t = 70^{\circ}\text{C}$ , la durée de séchage est de 10 heures (Tableau n° 4.2).
- ✓ Quand la pression de 5 bars et la température  $100^{\circ}\text{C}$ , la durée est de 7 heures (Tableau n° 4.3).

En comparant les trois résultats, la troisième expérience est la plus satisfaisante.

Donc, le temps de séchage est réduit quand la pression et la température de l'air envoyées sont croissantes.

Mais, pour éviter la modification de la structure des produits il faut tenir compte de la température qui leurs conviennent.



Chapitre V :

**ETUDE ECONOMIQUE  
ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

**V.1- Analyse économique et préliminaire :**

Considérons une fabrique. Elle serait installée à Beforona ( Moramanga dans la province de Toamasina ). De façon qu'on y trouve une infrastructure, un approvisionnement en eau et en électricité. Le terrain est estimé acquis.

On suppose que la fabrique vend des produits séchés. Les productions annuelles sont :

- Gingembres séc.

La fabrique fonctionnera huit heures par jour donc 209 jours par an.

L'installation comprend :

- ❖ Un atelier de production.
- ❖ Un magasin de stockage.
- ❖ Un laboratoire de contrôle et un bureau.

Le personnel sera formé un ouvrier spécialisé et un technicien supérieur pour le suivi de séchage.

**V.2- Calcul économique :**

L'objet de cette étude économique est de savoir si l'utilisation de l'étuve est rentable ou non dans un système de séchage de gingembres et d'étude de la rentabilité économique du séchoir. On peut évaluer sa rentabilité selon deux méthodes, à savoir :

- Calcul de la valeur actuelle nette : VAN
- Calcul du taux de rentabilité interne : TRI



Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire [Ariary]	Montant [Ariary]
Appareil utilisé pour le séchage :				
Matières premières				
- Electrode inox	U	100	1800	180.000
- Tôle inox 30/10	U	1	600.000	600.000
- Tôle en acier doux 30/10	U	1	40.000	40.000
- Tube inox 15/20 barre de 6m	U	1	80.000	80.000
- Tube en cuivre 12/14	m	2	7.000	14.000
- Résistance chauffe-eau	U	1	80.000	80.000
- Coude inox	U	5	5.000	25.000
- Vanne ¼ de tour 20/27	U	1	6.000	6.000
- Vanne ½ de tour 15/21	U	2	4.000	8.000
- Boulon et rondelle de 20	U	16	2.000	32.000
- Manomètre	U	2	40.000	80.000
- Cornières de 30 barre 6 m	U	1	15.000	15.000
- compresseur	U	1	700.000	700.000
Mais d'oeuvre				
- soudure électrique	U	1	15.000	15.000
- Perceuse	U	1	3.000	3.000
- Rouleuse	U	1	15.000	15.000
- Meule	U	1	5.000	5.000
- Cisaille électrique	U	1	4.000	4.000
Appareil de mesures : dynamomètre de précision (de 0 à 600g)	U	1	4.000	4.000
Matériels :				
- couteau	U	1	2.000	20.000
- soude sac (moyenne modèle)	U	1	40.000	40.000
- plateau	U	1	3.000	
Peinture anti-rouille	Kg	1	10.000	10.000
Peinture de finition	Kg	1	12.000	12.000
Installations électriques	U	1	100.000	100.000

**Tableau n° 5.1** : Coût des matériels d'investissements



**V.2.1- Les éléments d'investissements :**

- Investissements unités :  $I_1$

Donc l'investissement pour la construction du séchoir est évalué à Ar 2 095 000.

Provision pour les dépenses imprévues :

- Hausse des prix et divers : Ar 120 000.

Alors les investissements des matériels sont estimés à :

$$I_1 = \text{Ar } 2\,215\,000.$$

- Services généraux et stockages

$I_2 = \text{services généraux} + \text{frais de stockages}$

- Services généraux :

Frais d'atelier : Ar 40 000

- Stockages :

Frais de stockage : Ar 60 000

Donc  $I_2 = \text{Ar } 100\,000$

Ainsi, le coût des investissements unités est de :

$$I_U = I_1 + I_2$$

$$I_U = \text{Ar } 2\,315\,000$$

- Capital fixe : CF

Il est donné par la formule suivante :

$$CF = \sum_{i=1}^4 I_i = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Où  $I_1$  : investissements unités.

$I_2$  : services généraux.

$I_3$  : ingénierie.

$I_4$  : stock de pièces de rechange.

- Ingénierie ( $I_3$ )

Frais d'études : Ar 221 500

- Stock de pièces de rechange ( $I_4$ )

Pour l'installation de séchage, on a besoin de résistance blindée comme pièce de rechange, et qui vaut : Ar 80 000. d'où :  $I_4 = \text{Ar } 80\,000$ .



Le capital fixe est donc égal à :

$$CF = \text{Ar } 2\,616\,500.$$

### V.2.2- Les frais opératoires :

$$\text{Frais opératoires} = \text{charges variable} + \text{mains d'œuvre}$$

- Les charges variables : CV

$$\text{Charges Variables} = \text{charges initiales} + \text{Utilités}$$

- Charge initiales : CI

Coût du produit : Ar 350 nous avons besoin de 20kg par opération de séchage.

Ce qui fait  $\text{Ar } 400 \times 20 \text{ kg} = \text{Ar } 7\,000$  / opération de séchage.

Coût de l'emballage : gaine de 7 imprimées de trois couleurs Ar 25 000 / 5kg.

Ce qui donne Ar 2 250 par opération c'est-à-dire 450 g / opération.

Coût de transport Ar 1 550 / opération

Coût de panier plastique utilisé pour peser le produit : on a besoin d'un paquet.

Qui coûte 200 Ariary/opération.

Ainsi, le coût des charges initiales sera :

$$CI = \text{Ar } 11\,000 \text{ / opération}$$

- Utilités : U

L'utilité est la consommation en énergie et en eau utilisée pour la mise en marche du séchoir. Il se calcule comme suit :

$$CE = QE.C_w$$

CE = Coût total de l'énergie.

$C_w$  = Coût 1 KWh d'électricité

( $C_w = \text{Ar } 92$ / KWh pour la JI RA MA)

QE : consommation d'énergie

(QE = 60 kWh /opération de séchage)

Le coût des utilisés est donc :

Utilités = Ar 5520/ opération de séchage.



Donc :

Changes variables = 11 000 + 5520 = Ar 1 6520 / opération

Charges variables = Ar 1 6520 / opération
---

▪ La main d'œuvre : MO

Nous récapitulons dans le tableau ci- dessous la répartition des taches pendant une opération de séchage.

Opérations effectuées	Nombres de personne	Salaire par heure de travail [Fmg]/Ariary	Nombre d'heure de travail	Salaire par Opération de séchage [Fmg]/Ariary
Suivi de séchage (opérateur)	1 Technicien supérieur	Ar 6 00	4 Heures	Ar 24 00
Chargement déchargement et course	1 ouvrier	Ar 4 00	4 Heures	Ar 1 600

**Tableau n° 5.2** : Evaluation du coût de main d'œuvre.

Le coût total de main d'œuvre pendant une opération de séchage est de : Ar 4 000

Ainsi, pour une opération de séchage les frais opération sont évalués à :

$$FO = CV + MO = 1\,6520 + 4\,000 = \text{Ar } 20\,520 .$$

$$FO = \text{Ar } 20\,520.$$

**V.2.3- Les frais de maintenances: (FM)**

Calculons d'abord le nombre d'opération effectuée pendant une année de fonctionnement.

Ce nombre est donné par le rapport suivant :

$N_{op} = \frac{\text{Nombre de jours ouvrage pendant une année}}{\text{jours de séchage} + \text{Temps mis pour l'entretien}}$
---



$$N_{op} = \frac{288}{0,375 + 1} = 209 \text{ Opérations/ans}$$

Durant une année les frais de maintenance sont estimés à Ar 600 000 / an

$$FM = \text{Ar } 600\,000 / \text{an}$$

**V.2.4- L'amortissement : AI**

$$A_1 = \frac{CF}{n_1}$$

$n_1$  = durée de vie de l'installation égale à 10 ans

D'où  $A_1 = \text{Ar } 261\,650$ .

Ce qui donne par opération de séchage :

$$A_1' = \frac{A_1}{209} = \text{Ar } 1\,250 / \text{opération}$$

**V.3- Détermination du coût d'unité de production :**

$$C_s = \frac{FO + FM + A_1'}{Nb} = \frac{20520 + 2880 + 1250}{30} = \text{Ar } 830 / \text{paquet de } 100g$$

$$C_s = \text{Ar } 830 / \text{paquet de } 100g$$

**V.4- Etude de la rentabilité du projet :**

Pour le calcul de la rentabilité, on utilise la méthode du bénéfice actualisé (VAN) et la méthode du taux de rentabilité interne (TRI).

**VI.4.1- Le temps de retour ou POT :**

Il est défini par la formule :

$$POT = \frac{I}{B(1-d) + A_p}$$

Où

I : capitale amortissable (ou investissement).

B : bénéfices bruts annuels.

D : taux d'imposition sur les bénéfices 35%.

$A_p$  : amortissement annuel constant.



▪ Investissement :

Il est défini par :

$$I = CF + \text{frais de démarrage}$$

- Calcul des frais de démarrage : ( $I_5$ )

$$I_5 = \frac{FO}{6}$$

FO : frais opérations = Ar 20 520

$$\text{D'où } I_5 = \frac{20\,520}{6} = \text{Ar } 3420$$

▪ Amortissement :  $A_p$

L'amortissement est égal à :

$$A_p = A_1 + A_2 = \frac{CF}{n_1} + \frac{I_5}{5}$$

Où  $n_2$  : durée moyenne du capital amortissable 5 ans.

Donc :

$$A_p = \text{Ar } 262\,340.$$

▪ Le bénéfice brute annuel :  $B$

Il est défini par :

$$\text{Bénéfices bruts annuels} = \text{Coût d'exploitation} \times \text{Marge bénéficiaire}$$

Le coût d'exploitation est égal à :

$$\text{Coût d'exploitation} = \text{frais opératoire} + \text{amortissement} + \text{Entretien}$$

Les frais opératoires valent Ar 20 520 pour une opération de séchage, ce qui donne Ar 4 288 680 pour une année de fonctionnement.

$$\text{D'où : CE} = 4\,288\,680 + 262\,340 + 600\,000 = \text{Ar } 5\,151\,020$$

Et le bénéfice annuel est de :

$$B = \text{Ar } 1\,802\,857$$



Le temps de retour est alors égal à :

$$POT = \frac{2\,619\,920}{(1\,802\,857 \cdot 0,65) + 262\,340}$$

$$POT = 1 \text{ ans et } 10 \text{ mois}$$

#### V.4.2- Le bénéfice actualisé ou VAN

Le VAN est défini par la relation suivante :

$$VAN = -(I + f) + \sum_{p=1}^n \frac{(V_p - C_p)(1 - d) + A_p}{(1 + i)^p} + \frac{I_r + f}{(1 + i)^n}$$

Où I : capital amortissable ou investissement.

f : fonds de roulement.

$V_p$  : recette d'exploitation de l'année p.

$C_p$  : coût opératoire.

d : taux d'imposition sur les bénéfices 35%.

$A_p$  : amortissement annuel constant.

i : Taux d'actualisation 14%.

$I_r$  : valeurs résiduelles de l'installation.

- Fond de roulement

On a :

$$f = 2 \cdot I_5$$

AN :  $f = 2 \times 3420 = \text{Ar } 6840$

- Recette d'exploitation par an :  $V_p$

$$V_p = \text{coût d'exploitation} + \text{bénéfice brute annuel}$$

D'où  $V_p = 5\,151\,020 + 1\,802\,857 = \text{Ar } 6953880$

- Coût opératoire :  $C_p$

$C_p$  est donné par :

$$C_p = D_p + A_p + F_p$$



Où  $D_p$  = dépenses d'exploitation.

$A_p$  = amortissement annuel constant.

$F_p$  = intérêts en cas d'emprunts

Nous supposons que le coût initial de l'installation est entièrement payé

D'où : crédits ni emprunts. Donc,  $F_p = Ar\ 0$

$$C_p = 5\ 151\ 020 + 262\ 340 = Ar\ 5413360$$

▪ Investissement initial à l'année 0 :  $I_0$

L'investissement à l'année 0 est égal à :

$$I_0 = I + f$$

D'où  $I_0 = Ar\ 2\ 626\ 760$

▪ Cash flow de l'année 1 à 4

$$(CF)_1 = (V_1 - C_1)(1 - a) + A_1$$

$$(CF)_1 = (6953880 - 5413360)(0,65) + 262\ 340 = Ar\ 1\ 263\ 678$$

▪ Cash flow de l'année 5

$$I_r = I - (n_2 \cdot A_p) = 2\ 619\ 920 - (5 \cdot 262340)$$

D'où :

$$I_r = Ar\ 1\ 308\ 220$$

$$(CF)_5 = (V_5 - C_5)(1 - a) + I_r + f$$

$$(CF)_5 = 1\ 263\ 678 + 1\ 308\ 220 + 6840 = Ar\ 2\ 578\ 740$$

Le bénéfice actualisé sera alors:

$$VAN = -2\ 626\ 760 + 5\ 021\ 309 =$$

$$VAN = Ar\ 3\ 077\ 550$$

Le bénéfice actualisé est positif, par conséquent ce projet est économiquement rentable.

#### VI.4.3- Le taux de rentabilité interne ou TRI :

Par définition le taux de rentabilité interne est la valeur de taux d'actualisation  $i$  pour laquelle le bénéfice actualisé s'annule c'est-à-dire :

$$-(I + f) + \sum_{p=1}^n \frac{(V_p - C_p) + A_p}{(1 + i_r)^p} + \frac{I_r + f}{(1 + i_r)^n} = 0$$



Par la méthode de l'interpolation linéaire, nous déterminons la valeur de  $i_r$  qui annule la valeur du bénéfice actualisé :

Pour  $i_r = 14\%$  VAN = Ar 3 077 550

Pour  $i_r = 30\%$  VAN = Ar 1 321 740

Pour  $i_r = 40\%$  VAN = Ar 434070

Pour  $i_r = 48\%$  VAN = Ar 5550

Pour  $i_r = 50\%$  VAN = Ar -85380

$$\text{Alors } TRI = 48 - \left[ \frac{(48 - 50) \cdot 5550}{5550 - (-85380)} \right]$$

$$\boxed{TRI(i_r) = 48,2 \%}$$

### **CONCLUSION :**

A l'issue de cette étude économique nous pouvons dire que, pour sécher de 20kg à chaque opération de gingembre, l'utilisation de séchoir par détente instantanée contrôlée est rentable s'il coûte environ à Ar 2 046 000

Le coût de séchage obtenu est Ar 830 par paquet, l'étude est faite à partir d'un paquet pesant 100g avec un amortissement de 5 ans , un temps de remboursement de 1ans et 9 mois ce qui correspondant à un taux de rentabilité interne égale à 48,2 %

### **V.5- Impacts environnementaux :**

L'environnement se définit comme étant l'ensemble des éléments qui conditionnent et déterminent l'activité humaine et notamment :

L'entourage biologique (l'homme, flore, la faune).

L'entourage physique (l'équilibre biologique, les ressources naturelles, le climat, sol).

L'entourage socioculturel.



L'interaction de ces divers éléments

Toute croissance directe ou indirecte engendre par une exploitation abusive de l'environnement.

Cet environnement semble être en train de se dégrader. A l'heure actuelle, des efforts intenses sont axés sur la protection et la préservation de l'environnement. La communauté internationale, par le biais des organisations spécialisées, s'efforce de freiner cette dégradation dont les conséquences néfastes commencent à refléter sur les conditions des vies humaines.

Conscient de l'ampleur de ces conséquences, le Gouvernement Malagasy avait élaboré une « charte de l'environnement », traduisant sa volonté de participer activement à la défense et la conservation de l'environnement. Cette charte constitue un outil important en matière de lutte contre les exploitations abusives des ressources naturelles.

On trouve sur notre île plusieurs types de produits végétaux. Cette abondance nécessite donc une parfaite maîtrise de conservation afin d'éviter la pourriture de ces produits qui dégagerait des odeurs nauséabondes.

En réalisant le projet, nous pouvons bénéficier :

D'une activité lucrative pour les cultivateurs en périodes de soudure.

De la satisfaction de besoin locaux en matière des produits séchés, car jusqu'à présent.

La plupart de ces produits qu'on trouve dans le supermarché, sont tous importés.

L'utilisation du séchoir électrique est un moyen de préservation de l'environnement puisqu'on constate actuellement une exploitation abusive de la forêt pour le besoin énergétique : bois de chauffe, charbon de bois. De plus l'opération de séchage ne dégagerait aucun gaz nocif.

Malgré tous ces avantages, le séchage est un procédé de conservation des produits. En effet, il arrête le développement des microorganismes en même temps que les réactions chimiques pour augmenter la durée de vie d'un produit.

En réalisant le projet, aucun effet néfaste n'est observé à part le changement d'état des produits séchés.

Ce projet peut alors être considéré comme très intéressant car il ne risque pas de perturber l'équilibre environnemental.



## **CONCLUSION GENERALE**

Les résultats des expériences ont permis de déterminer l'évolution du produit à sécher.

La durée du temps de séchage à l'air comprimé est moindre que celle qui est à l'air libre.

Cela est éprouvé par la comparaison de la méthode habituelle à celle de la Détente Instantanée Contrôlée : pour le cas de gingembre, elle est de 40 heures contre 7 heures ; et l'ananas de 8 heures contre 4 heures.

Estimer à 10 ans une durée de vie d'installation, nous avons pris un taux d'imposition sur le bénéfice de 35 % avec un taux d'actualisation de 14 % ; le taux de rentabilité interne du système pour 20 kg de gingembre est de 42,8 % avec un temps de retour des investissements de 1 an et 10 mois, puis le coût unitaire de la production considéré à Ar 830 par paquet de 100 g .

Tandis que pour le cas du séchage habituel avec le même quantité, on aura un taux de rentabilité interne de 25,3 % et un temps de retour 3 ans et 6 mois, le coût unitaire de production à Ar 2800 par paquet.

Economiquement la réduction du temps de séchage entraîne la diminution du coût, ce qui revient à ce que la rentabilité du projet s'élève à 17,5 % par rapport au séchoir habituel.

Ainsi, nous avons l'avantage d'exploiter ce séchoir en grande échelle.



## ANNEXE I

Le résultat obtenu en utilisant le séchoir disposé en laboratoire génie industriel :

Cas d'ananas :

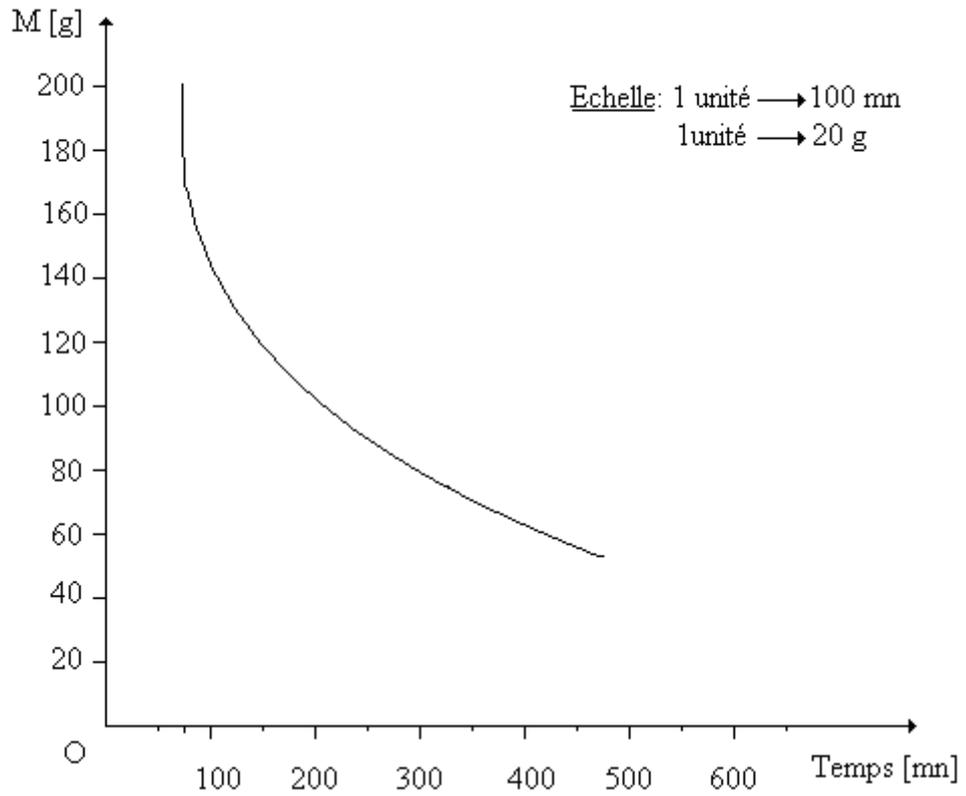
Heures	Durée [h]	Température de asséchant T en [°C]	Humidité de l'air asséchant H <sub>r</sub> en [%]	Masse du produit M en [g]	Teneur en eau d'équilibre (en basse sèche) M <sub>a</sub> en [%]	Vitesse l'air asséchant V en [m/s]
10 h : 35	1 : 15	50	49,9	139	157	8,3
11 h : 00	1 : 40	56	49,8	131	143	7,1
11h : 25	2 : 05	9	49,7	121	124	7,7
11h : 50	2 : 30	65	49,6	114	111	8,2
12h : 20	3 : 00	65	49,5	104	93	8,2
12h : 50	3 : 30	64	49,4	96	77	6,8
13h : 20	4 : 00	64	48	86	65	8,4
14h : 00	4 : 40	61	47,5	81	50	6,9
14h : 40	5 : 20	65	46,8	74	37	6,6
15h : 20	6 : 00	65	46	67	24	9,1
16h : 00	6 : 40	64	44	62	15	7,7
16h : 40	7 : 20	64	43	58	7	7
17h : 20	8 : 00	65	38,5	54	0	10,2

ANANAS													
$\frac{dM}{dt}$ [g / mn]	0	0,32	0,4	0,28	0,33	0,27	0,23	0,20	0,18	0,18	0,13	0,10	0,05
t [mn]	0	75	100	125	150	180	210	240	280	320	360	400	440

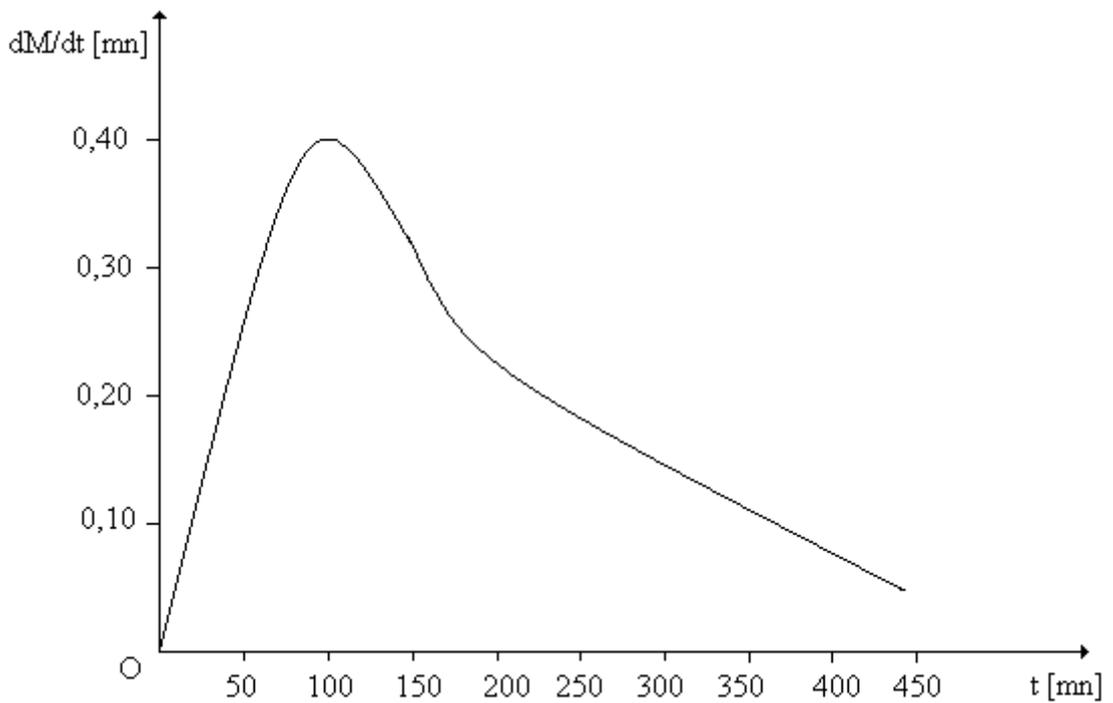
*Variation du flux d'eau évaporée  $dM / dt$  et le temps.*



Masse du produit



*Courbe de séchage d'ananas.*



*Courbe de variation du flux d'eau évaporée  $dM / dt$  en fonction du temps  $t$  (ananas)*



## ANNEXE II

### I- ETUDE ECONOMIQUE :

Cas d'un gingembre en utilisant séchoir habituel.

#### I.1 Les dépenses d'investissements :

Investissement en limites des unités de fabrication :  $I_1$

##### ▪ Caisson :

Dans le tableau ci-après nous donnons un devis estimatif du coût de l'étuve

Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire [Ar]	Montal [Ar]
TPG / 10	5	u	25 000	125 000
Tube carré 50×50	6	m	23 332	14 000
Tôle perforé 1×1	1	m	20 000	20 000
Isolants thermiques (fibre de verre) épaisseur 10cm	3	m	20 000	60 000
Joints thermiques	4	m	5 000	20 000
Paumelle GM	2	u	4 000	8 000
Système de fermeture	1	u	2 500	2 500
Contacteur de sécurité	1	u	6 000	6 000
Matériel de quincaillerie (vis, rondelle, etc....)				30 000
Peinture anti-rouille	3	kg	2 000	6 000
Penture de finition	4	kg	3 000	12 000

Tableau A1 : Evaluation du coût de caisson

Le coût total de caisson est de Ar 303 500



- Ventilation
  - Ventilateurs : Ar 400 000
  - Installations électriques : Ar 250 000
  - Ar 650 000
  
- Appoint électrique
  - Résistance électrique : Ar 160 000
  - Installation électrique : Ar 250 000
  - Ar 410 000
  
- Coût du matériel d'exploitation
  - Anémomètre instantané [Testo .451] : Ar 400 000
  - Dynamomètre de précision 0 à 600g : Ar 4 000
  - Ar 4 04 000
  
- Matériels :
  - Soude sac (moyenne modèle) Ar 3 0 000
  - Couteau Ar 1 000
  - Plateau Ar 1 4 00
  - Ar 3 2 400
  
- Main d'œuvre :
  - Construction métallique Ar 210 000
  - Peinture Ar 36 000
  - Finition Ar 24 000
  - Ar 270 000

Donc l'investissement pour la construction du séchoir est évalué à Ar 2 073 900

- Provisions pour les dépenses imprévues
- Hausse des prix et divers : Ar 120 000



- a)  $I_1 = \text{Ar } 219\,3900$   
 $I_2 = \text{Ar } 40\,0000$   
 $I_0 = \text{Ar } 2\,233\,900$   
 $I_3 = \text{Ar } 219\,390$   
 $I_4 = \text{Ar } 160\,000$

Le capital fixe  $CF = \text{Ar } 2\,613\,290$

- b) Nombre d'opération effectuée par an :

$$N_{op} = \frac{\text{Nombre de jour ouvrable pendant une année}}{\text{jour de séchage + temps l'entretien}}$$

D'où :  $N_{op} = \frac{288}{1,6 + 1} = 110 \text{ opérations/an}$

### **I.2** Frais opératoires :

Charge variable :

#### **Charge initiale :**

Coût du produit : Ar 7000/opération

Coût d'emballage : Ar 2 250 / opération

Coût de transport : Ar 1550

Coût de dernier plastique utilisé pour peser le produit : on a besoin d'un paquet.

Ce qui fait : Ar 200 / opération Pour chaque opération le charge initiale est

donc estimé à :  $CI = \text{Ar } 11\,000 / \text{opération}$

Utilités : Ar 22 500

Charge variable est alors :  $CV = \text{Ar } 31\,500 / \text{opération}$

$MO = \text{Ar } 39\,000 / \text{opération}$

Le main d'oeuvre est alors : Ar 39 000

Ainsi les frais d'opérateur valent Ar 72 500 / opération

### **I.3** Entretien :

Durant une année les frais de maintenances sont estimés à Ar 800 000

Ce qui donne pour chaque opération :

$$FM = \frac{800000}{101} = \text{Ar } 7200 / \text{opération}$$



**I.4** Amortissements :

$$A_1 = \text{Ar } 2\,613\,29$$

$$A'_1 = \text{Ar } 2300$$

**I.5** Coût unité de production :

$$c_s = \frac{72500 + 7200 + 2300}{30} = \text{Ar } 2800 / \text{paquet de } 100\text{g}$$

**I.6** Temps de retour de l'investissement :

- Capital amortissable

$$I_s = \frac{72500}{6} = \text{Ar } 12100$$

- Amortissement annuel constant :

$$A_p = \text{Ar } 262\,100$$

- Bénéfice annuel constant :

$$\text{Coût d'exploitation} = \text{Ar } 9\,037\,100$$

$$B = \text{Ar } 3\,162\,985$$

$$\text{POT} = \frac{7987100}{(3162985 \times 0,65) + 262100} = 3 \text{ ans et } 6 \text{ mois}$$

Soit POT = 3 ans et 6 mois

**1.7** Valeur actuel nette :

- Fonds de roulement

$$f = \text{Ar } 24200$$

- Recettes d'exploitation :

$$V_p = \text{Ar } 12\,200\,085$$

Coût opératoire :

$$C_p = \text{Ar } 9\,299\,200$$



- Investissement initial à l'année 0 :

$$I_0 = \text{Ar } 8\,011\,300$$

Cash flow de l'année 1 à 4 :

$$(CF)_1 = \text{Ar } 2\,147\,680$$

$$I_r = \text{Ar } 6\,676\,600$$

$$(CF)_5 = \text{Ar } 8\,848\,480$$

Le bénéfice actualisé sera alors :

$$\text{VAN} = \text{Ar } 2\,844\,800$$

**I.8** Taux de rentabilité interne :

Pour  $i_r = 14\%$  ;  $\text{VAN} = \text{Ar } 2\,844\,800$



## LISTE DES FIGURES

	<b>Pages</b>
Figure I.1. : Représentation de l'activité de l'eau .....	3
Figure I.2. : Structure des pores d'une matière.....	5
Figure I.3. : Définition des pores pour un amas de produit.....	6
Figure II.1. : Une coque mince soumise à une pression intérieure.....	22
Figure III.1 : Représentation du séchoir.....	27
Figure III.2 : Coupe longitudinale du séchoir.....	28
Figure 3.1 : Effort appliqué sur le boulon et sa rondelle.....	31
Graphe n°4.1. : Courbe de séchage du gingembre (à 2 bars et 100°C).....	50
Graphe n°4.2 : Courbe de séchage du gingembre (à 2 bars et 70°C).....	51
Graphe n°4.3.a : Courbe de séchage du gingembre (à 5 bars et 100°C).....	52
Graphe n°4.3.b : Courbe de vitesse du séchage du gingembre (à 5 bars et 100°C)..	52
Graphe n°4.4.a : Courbe de séchage d'ananas(à 5 bars et 100°C) .....	53
Graphe n°4.4.b : Courbe de vitesse du séchage ananas (à 5 bars et 100°C).....	54



## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau n °4.1 Cas de gingembre ( P = 2 bars et T = 100°C) .....	49
Tableau n°4.2 Cas de gingembre ( P = 5bars et T = 70 °C) .....	50
Tableau n°4.3 Cas de gingembre ( P = 5bars et T = 100°C).....	51
Tableau n°4.4 Cas de l'ananas ( P = 5bars et T = 100°C) .....	53
Tableau n°5.1 Coût des matériels d'investissement .....	57
Tableau n°5.2 Evaluation du coût de main d'œuvre .....	60



## TABLE DES MATIERES

	Pages
<b>CHAPITRE I : RAPPEL SUR LE SECHAGE</b>	
I.1 Généralités sur le séchage.....	2
I.2 Caractérisation d'un produit de séchage.....	4
I.2.1. Structure d'un produit de séchage.....	4
I.2.2. Caractérisation de la porosité.....	4
I.3. La compacité.....	6
I.4. L'humidité des solides.....	7
I.5. Quantification d'eau.....	8
I.5.1. la quantité d'eau dans un matériau de séchage.....	8
I.5.2. L'hygroscopicité.....	9
I.5.3. Vitesse de séchage.....	10
<b>CHAPITRE II : LA THEORIE SUR LA PHYSIQUE DE BASES</b>	
II.A Mécanique des fluides.....	11
II.A.1 Propriété physique.....	11
II. A.1.1 Définition.....	11
II. A. 1.1.1 Compressibilité.....	11
II .A 1.1.2 Viscosité.....	11
II.A.1.1.2.1. Viscosité absolue.....	11
II.A.1.1.2.2. Viscosité cinématique.....	12
II.A.2. Ecoulement visqueux.....	12
II .A.2.1. Nombre Reynolds.....	12
II A.2.2 .Perte de charge.....	13
II.2.2.1Perte de charge Linéaire .....	13
II 2.2.2 Perte de charge singulière.....	13
II.A.2.3 Equation de Bernoulli.....	14
II.B Transmission de chaleur .....	14
II. B.1 Introduction.....	14



II .B .1.1 La conduction.....	15
II.B.1.2. La convection.....	16
III.B.1.2.1 La convection naturelle.....	17
II.B.1.2.2 La convection forcée.....	18
II.B.1.3. Le rayonnement.....	18
II.B.2 .Transmission de chaleur entre deux fluides séparés par une paroi.....	19
II .C. Résistance de matériaux .....	21
II.C.1.Généralités.....	21
II.C.2 Cas de l'enveloppe cylindrique soumise à une pression interne.....	23
<b>CHAPITRE III : REALISATION DE L'APPAREIL</b>	
III.1 La DIC.....	24
III.2.Description des éléments du séchoir.....	25
III.3 Dimensionnement des éléments du séchoir.....	30
III.3.1 La cellule de séchage.....	30
III.3.1.1. Epaisseur de la tôle utilisée.....	30
III.3.2Le compresseur.....	34
III.3.2.1 Le Compresseur isotherme.....	34
III.3.2.2 Filtre à l'air.....	35
III.4 La chaudière.....	36
III.4.1 Généralités.....	36
III .4.2 Détermination de l'épaisseur du tube en cuivre.....	37
III.4.3.La longueur du tube en cuivre.....	38
III.4.4.Détermination de l'enveloppe de la chaudière.....	42
III.4.5 La puissance de la chaudière.....	43
III .4.6 Calcul de la soupape de sécurité.....	45
III. 5. La tuyauterie.....	45
III.5.1 Epaisseur de la conduite.....	46
III.6. Dimensionnement du support.....	46



**CHAPITRE IV : PROCEDURES EXPERIMENTALES ET EXPERIMENTATION**

IV.1. Procédures expérimentales.....	48
IV. 2.Experimentation.....	49
IV.2.1.Cas du gingembre.....	49
IV.2.2.Cas de l’ananas.....	53

**CHAPITRE V : CALCUL ECONOMIQUE- IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

V .1 Analyse économique préliminaire.....	56
V .2 Calcul économique.....	56
V.2.1. Les éléments d’investissement.....	58
V.2.2. Les frais opératoires.....	59
V.2.3. Les frais de maintenances.....	60
V.2.4. L’amortissement .....	61
V .3. Détermination du coût d’unité de production.....	61
V .4.Etude de la rentabilité du projet.....	61
V.4.1 Le temps de retour ou POT .....	61
V.4.2 Le bénéfice actualisé ou VAN.....	63
V.4.3 Le taux de rentabilité interne ou TRI.....	64
V.5. Impacts environnementaux.....	65

**CONCLUSION**

**ANNEXE**

**LISTE DES FIGURE S**

**LISTE DES TABLEAUX**

**BIBLIOGRAPHIE**



## **BIBLIOGRAPHIE**

**[1] : ARTAUD**

Mécanique des fluides, Hydraulique et Aérologie, Tome 2 – M.F 1b. 74 / 81,  
Ecole Supérieure du Génie Militaire 1981.

**[2] : BROUSSIN DANIEL, Février 2001**

Etudes sur les possibilités de séchage du gingembre dans la région de Beforona.  
Rapport de mission / LDI / USAID.

**[3] : J. BOURGIER - M. GEREY - C. MINACORI**

Construction mécanique (Analyse – Dessiner et Construire - Calculer)  
Edition Hachette 1994.

**[4] : JEAN – YVES QUINETTE**

Etude expérimentale du séchage de denrées agroalimentaires en vue de  
l'optimisation d'un séchoir solaire.

**[5] : KRASNOCHTCHKOV F.- SOOKOMEL**

Problème de transfert de chaleur – Edition Mir, Moscou 1980.

**[6] : PARTY J.**

Stockage par chaleur latente, bilan énergétique, applications thermiques, solaires,  
frigorifique – Edition pyc, Paris 1981.

**[7] : RAVAORISON Marie Felicia,**

Le gingembre et ses différentes utilisations, 1976.

**Nom** : TOTO  
**Prénom** : Jasmin Florian  
**Adresse** : Lot. 277 Cité 67 Ha – Antananarivo (101)  
**Téléphones** : 032 07 552 76 et / ou 032 04 847 67

### THEME DU MEMOIRE :

« SECHAGE PAR DETENTE  
INSTANTANEE CONTROLEE »

**Nombre de page** : 67  
**Nombre de tableau** : 06  
**Nombre de figure** : 13  
**Nombre de pages annexes** : 02

#### RESUME :

L'objet de ce travail est d'étudier l'application de DIC (**Détente Instantanée Contrôlée**).

D'abord, nous allons réaliser un appareil de séchage par DIC, puis on relèvera les différents paramètres au cours de l'expérimentation qui ont permis de déterminer la vitesse de séchage pour chaque cas ;

Enfin nous avons terminé l'étude par un calcul économique pour mettre en évidence la rentabilité du projet.

#### SUMMARY :

The main aim of this work is to study the application of DIC (**Instant Controlled Detent**).

At first we achieve a device of drying by DIC, then we'll take the different parameterizes during the experimentation which permitted us to know the speed of drying for every case;

Finally, we finished the studies by economic calculation to put in evidence the profitability of the project.

**Mots clés** : Séchage, air comprimé, DIC.

**Rapporteur** : Professeur ANDRIAMORASATA Josoa