

# ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة —  
Ecole Nationale Polytechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

CONCEPTION D'UN SECHOIR  
DIRECT CONTINU

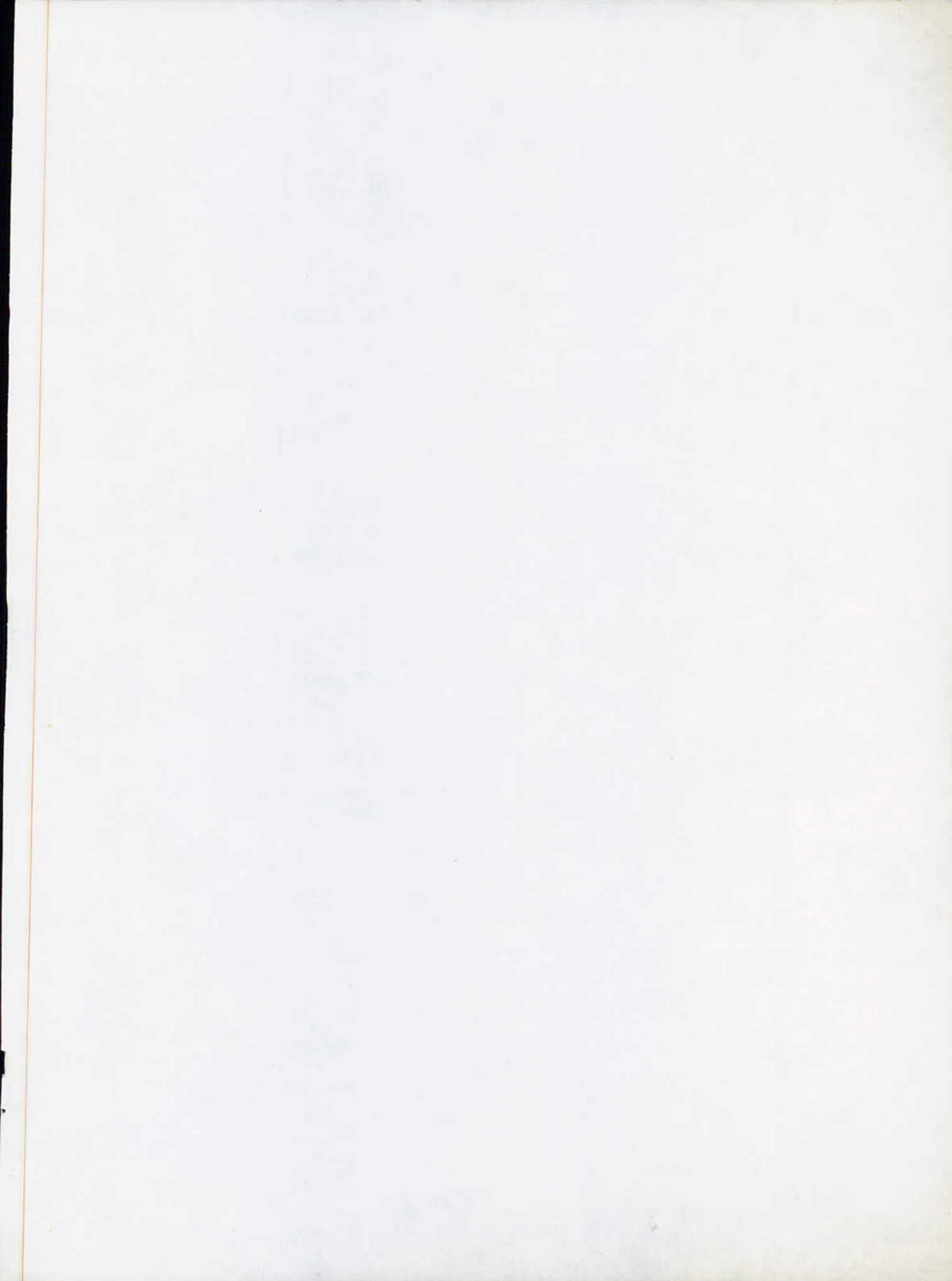
Proposé par :

Etudié par :

Dirigé par :

*Bourkiza M.  
Beniddir M.*

*Dali-Ahmed T. Bourkiza M.  
Beniddir M.*



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

وزارة التعليم العالي

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية لمتعددات التقنيات

Département : GENIE CHIMIQUE

المدرسة الوطنية لمتعددات التقنيات  
المكتبة - BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

الهندسة الكيميائية

Promoteurs : M. M. BOURKIZA  
M. M. BENIDDIR

السيد محمد بوركيزا  
السيد مصطفى بن ابيدير

Élève ingénieur : M. T. DALI-AHMED

تلميذ مهندس : دالي أحمد هيب

<p>الموضوع : تصور جهاز تجفيف الملخص : عملنا هذا يستهدف تصور جهاز تجفيف . ولهذا أتوردنا لمحة نظرية عن الضواهر الأساسية لعملية التجفيف متبوعة بمثال حسابي</p>
<p>Sujet : conception d'un sechoir directe continu Résumé : Notre travail consiste à donner le principe de calcul d'un sechoir . Pour cela on a commencé notre travail par des rappels theorique concernant le phenomene du sechage suivie d'un exemple de calcul .</p>
<p>Subject : Design of a dryer Synopsis : our work consists of designing a dryer. We provide some basic theory dealing with the drying phenomena .</p>

- MEMBRES DE JURY -

PRESIDENTE : Mme MEZIANI . maitre assistante

PROMOTEURS : M M. BOURKIZA . maitre assistant

M M. BENIDDIR . maitre assistant

EXAMINATEUR : M Y. BOUMGHAR . maitre assistant

je dédie cet humble et modeste travail à :

- ma mère
- mon père
- mes frères et sœurs

mes remerciements s'adressent à :

- mes promoteurs Mr BOURKIZA et Mr BENIDDIR qui ont proposé ce travail.
- Mme MEZIANI pour avoir eu l'amabilité de presider le jury.
- ainsi qu'à Mr BOUMGHAR pour avoir bien voulu en faire partie.
- et tous les professeurs et assistants qui ont contribué à ma formation.

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION

### PREMIERE PARTIE : ETUDE THEORIQUE

1. Generalité sur le séchage .....	1
1-1 Humidité d'un solide	
1-2 Grandeurs caractéristiques des gaz humides	
1-3 Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz	
2. Théorie sur le séchage .....	4
2-1 Théorie et concepts fondamentaux	
2-2 période à taux constant	
2-3 période à taux décroissant	
2-4 Temps de séchage	
2-5 estimation du coefficient d'échange de chaleur	
2-6 Influence des facteurs externes sur la vitesse de séchage	
3. Les séchoirs .....	20
3-1 Classification des séchoirs	
3-2 circuit aéraulique associé	
4. Unité de transfert dans les séchoirs .....	25

### DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION ET CALCUL D'UN SECHOIR DIRECT CONTINU

5. Recherche du meilleur séchoir .....	29
6. Dimensionnement .....	30
6-1 Différents moyens de manutention	
6-2 Source de chaleur	
6-3 Ventilateur	
6-4 Calcul	

.7- Aspect économique d'un séchoir . . . . .	43
.8- Application du séchage dans l'industrie des pâtes alimentaires . . . . .	45

## ANNEXE

équipement annexe d'un séchoir

- Broyeur
- Dépoussiereurs
- Réfrigéreur sècheur air humide

CONCLUSION

NOTATION

REFERENCE



# INTRODUCTION

- le séchage joue un rôle important dans presque toutes les branches des industries de consommation. On entend par séchage le procédé mis en œuvre pour éliminer le liquide d'un produit.
- Dans une plus large acception du terme, on peut considérer comme méthode de séchage celles où l'eau, sans changement d'état, est extraite par des moyens mécaniques: pression; filtration; centrifugation. toutefois, il est d'usage de réserver la notion de séchage aux procédés thermiques.
- si quelque fois on intercale les moyens mécaniques avant l'un des procédés de séchage habituel, c'est parce que la dépense d'énergie qu'entraîne les moyens mécaniques est en général assez faible.
- l'objectif principale du séchage:
  - Alléger le produit
  - Faciliter sa conservation
- pour le choix d'une méthode de séchage; il faut tenir compte de la nature de la substance et de son état, c'est ainsi que les aliments sont défavorablement influencés par une haute température ou par la présence d'oxygène, les produits façonnés ou le bois éprouvent lors d'un séchage trop rapide, des modifications de formes indésirables (gauchissement, fissuration).
- pour que toutes les exigences soient satisfaites, il a été établi de nombreux procédés de séchage et des appareils qui se distinguent les uns des autres par le mode de transfert de chaleur.
- dans ce présent ouvrage nous avons donné quelque rappel théorique suivie d'une autre partie dans laquelle on a établi le principe de calcul d'un séchoir avec des exemples numériques.

PREMIERE

PARTIE

ETUDE

THEORIQUE

# 1 GENERALITÉ SUR LE SECHAGE :

## 1-1 Humidité d'un solide :

- Après séparation mécanique de la majeure partie du liquide (liquide d'égouttage) l'humidité restante peut consister en un liquide d'hydratation ou en un liquide de constitution.

### 1-1-1 le liquide d'hydratation est retenu :

- soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide sous l'action de force superficielle.

- soit, d'une façon plus intime, sous l'action de force capillaire, à l'intérieur des interstices ou des pores plus ou moins fins du solide.

- les solides imprégnés de liquide d'hydratation sont dits humides, le séchage a pour but d'en éliminer plus ou moins complètement le liquide d'hydratation et de le transformer en produit sec, retenant encore une certaine fraction d'humidité, ou en produit à l'état de siccité lorsque l'élimination de l'eau a été totale.

1-1-2 le liquide de constitution participe à la structure du solide, comme par exemple l'eau de cristallisation ou l'eau contenu dans les gels. Son élimination, plus ou moins complète, constitue une déshydratation, et n'est pas recherchée lors d'un séchage.

### 1-1-3 teneur en humidité X :

- la teneur en humidité d'un solide, appelée aussi charge d'humidité, ou plus simplement humidité d'un solide s'exprime comme étant la masse de liquide sur la masse du solide à l'état de siccité

$$X = \frac{m}{m_s} \dots \dots \dots 1-1$$

m : masse de liquide (kg)  
m<sub>s</sub> : masse de solide sec (kg)

## 1-2 Grandeurs caractéristiques des gaz humides

### - 1-2-1 Humidité "Y" :

- on appelle humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à 1 kilogramme de gaz sec

$$Y = \frac{V}{G} \dots\dots\dots 1-2$$

V : masse de vapeur (kg)  
G : " de gaz sec (kg)

### - 1-2-2 Humidité relative "φ" :

- l'humidité relative, ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange P, à sa pression saturante P<sub>s</sub> dans le même mélange, pris à la même température.

$$\varphi = \frac{P}{P_s} \dots\dots\dots 1-3$$

## 1-3 Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz : réf. (1)

- soit un solide mouillé d'humidité X soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme de vapeur une certaine quantité de liquide associé au solide.

- sous pression constante, et à une température déterminée le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative "φ".

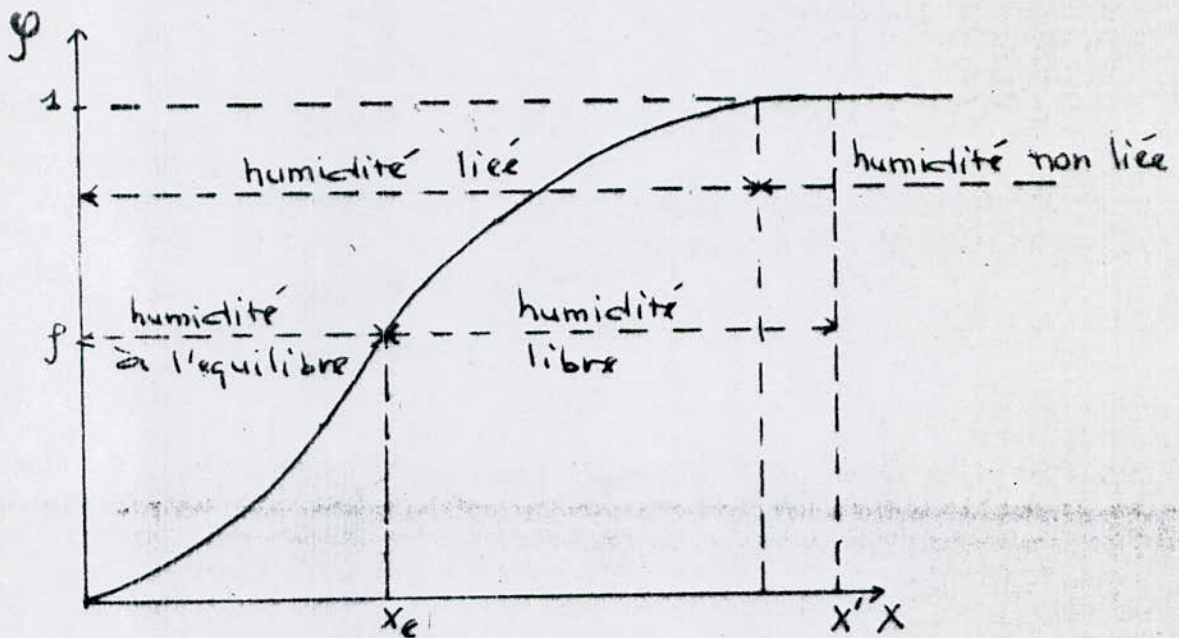
- si la tension de vapeur ω du liquide associé au solide est différente de P, il s'établit, entre les deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque P = ω

- si  $P > u_p$ , le transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère vers le solide (mouillage du solide).

- si  $P < u_p$ , le transfert d'humidité s'effectue de solide vers l'atmosphère (séchage).

- si  $P = u_p$  l'état d'équilibre est atteint

- pour une température et pression constante à chaque valeur de l'humidité relative  $\varphi$  de l'atmosphère correspond une valeur de l'humidité à l'équilibre  $x_e$  du solide, on peut construire une ISOTHERME D'ÉQUILIBRE relative au solide considéré.



- soit  $x_e$  l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère d'humidité relative  $\varphi$ .

- si un solide d'humidité  $x' > x_e$  est soumis à un courant gazeux d'humidité relative  $\varphi$ , il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à  $x_e$ . Un séjour même prolongé du solide dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au dessous de  $x_e$ .

## 2. THEORIE SUR LE SECHAGE :

### 2-1 Theorie et concepte fondamentaux : réf. (2)

- l'operation du sechage depend du mecanisme interne du mouvement de l'humidite, et de l'effet des facteurs externes, tel que la temperature de l'air, l'humidite de l'air, vitesse de l'air.

#### 2-1-1 mecanisme interne du mouvement de l'humidite :

- le deplacement du liquide à l'interieur du solide peut se faire de differentes facons selon la structure du solide.

- les mecanismes possible sont :

- mecanisme par diffusion
- " " capillarite (solide granuleux et poreux).
- " par difference de pression.
- " par gravite.

- En general, un seul mecanisme predomine pour un temps donne, mais l'on peut rencontrer plusieurs mecanismes au cours du sechage du solide.

- le mecanisme particulier controlant la cinetique du sechage d'un solide peut etre determine par l'etude du gradient d'humidite interne.

- On peut experimentalement connaitre sa nature : HOUGEN MAC COULEY et MARSHALL, ont determine pour les cas de diffusion et capillarite deux courbes caracteristiques des modes de mouvement de l'humidite.

Ces courbes indiquent que le mouvement par capillarité est caractérisé par une courbe fig-1- présentant un point d'inflexion, quant au mouvement par diffusion est représenté par une courbe régulière, prévue par les équations de diffusion fig-2-.

Ainsi les auteurs classent les solides suivant deux modes de mouvement interne de l'humidité:

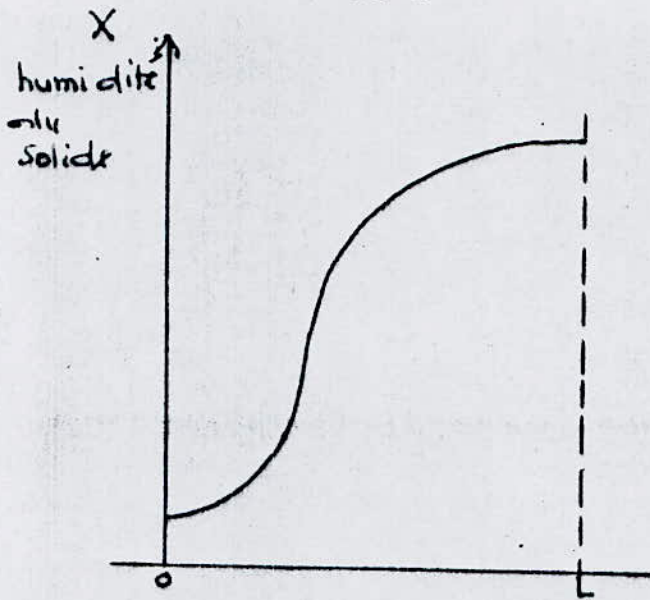
- par capillarité
- " diffusion

### 2-1-2 Facteur externe :

qui - les principaux facteurs externe qui influent sur le séchage sont:

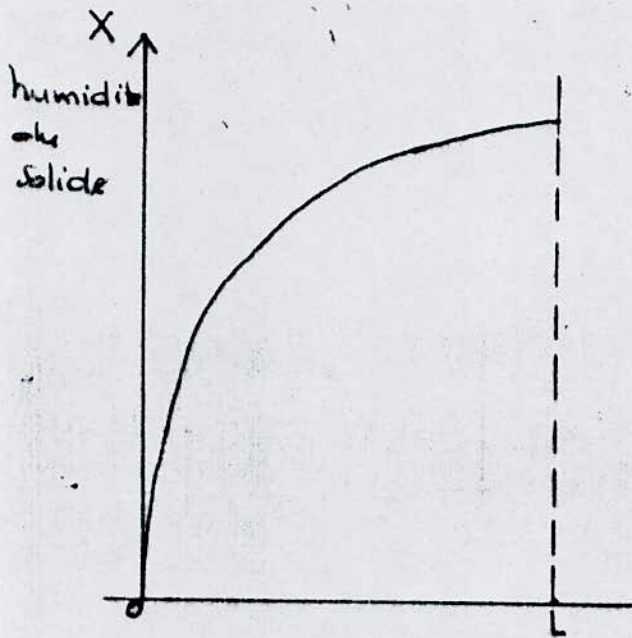
- la température
- l'humidité de l'air
- la vitesse de l'air
- l'état du solide (une éventuelle agitation du solide)
- le mode de transport et de manutention du solide et le contact entre surface chaude et corps humide.





Distance de la surface

fig-1 - Mouvement par capillarité



Distance de la surface

fig-2 - Mouvement par diffusion

## 2-1.3 : Courbes de séchage :

- le produit au repos est soumis à un passage de fluide chaud (agent sécheur), les conditions opératoire (température, humidité, vitesse de l'air) sont maintenue constantes. le produit est pesé à des intervalles de temps déterminé au cours du séchage, ce qui permet de tracer une courbe qui donne la teneur en humidité  $X$  du produit en fonction du temps  $t$  (fig-3-) en différenciant cette courbe par rapport au temps  $t$  et en traçant  $\frac{dX}{dt}$  en fonction du temps  $t$  où de l'humidité  $X$  (fig-4-5) on pourra ainsi distinguer les différentes étapes de séchage d'un produit.

- on constate dans de nombreux cas une courte durée correspondante à la mise en température du corps humide (portion AB).

- portion BC appelée période à TAUX CONSTANT (représenté sur la fig-4-5 par une ligne horizontale) correspond à une simple évaporation de liquide d'une surface saturée (flux de matière constant).

- portion CD appelé période à TAUX DÉCROISSANT. elle est en général composée de deux parties. partie CE la surface saturée en humidité décroît graduellement et le point E représente le commencement de l'étape où le séchage est contrôlé par le mouvement interne de l'humidité. durant cette période le flux de matière décroît puis s'annule lorsque  $X = X_e$ .

- quelque type de courbe de séchage : réf.(3)

- a - séchage de solide non poreux : des courbes de séchage comme la fig-6- sont généralement rencontrés dans le séchage des produits comme le savon, colle, pâte d'argile... le mouvement de l'humidité se fait par diffusion.

- b - séchage des solides poreux : une courbe typique est montrée par la fig-7- le mouvement de l'humidité dans ce cas se fait par capillarité.

Remarque : - dans le cas d'un lit de sable les pores sont large et les forces capillaires sont faible d'où le mouvement dans ce cas se fait par gravité fig-8-

- cas des solides poreux et hygroscopique fig-9-

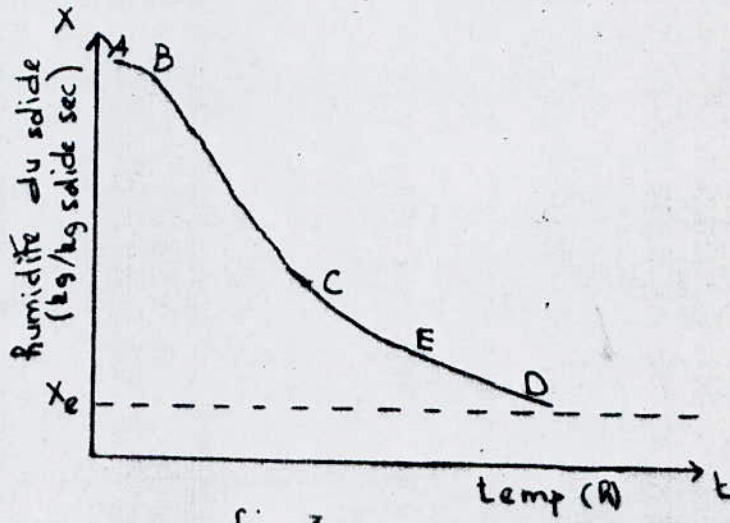


fig-3-

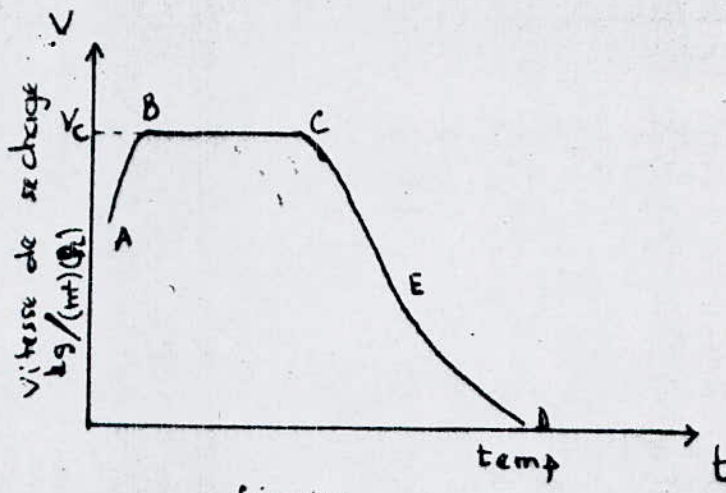


fig-4-

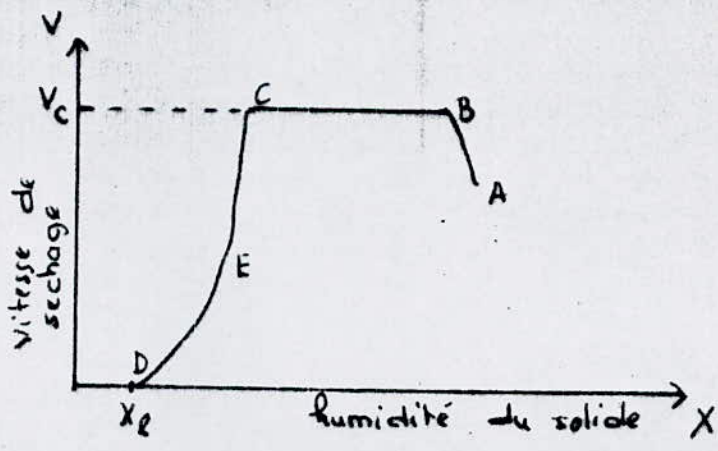


fig-5-

$$V = - \frac{M_s}{s} \left( \frac{dX}{dt} \right)$$

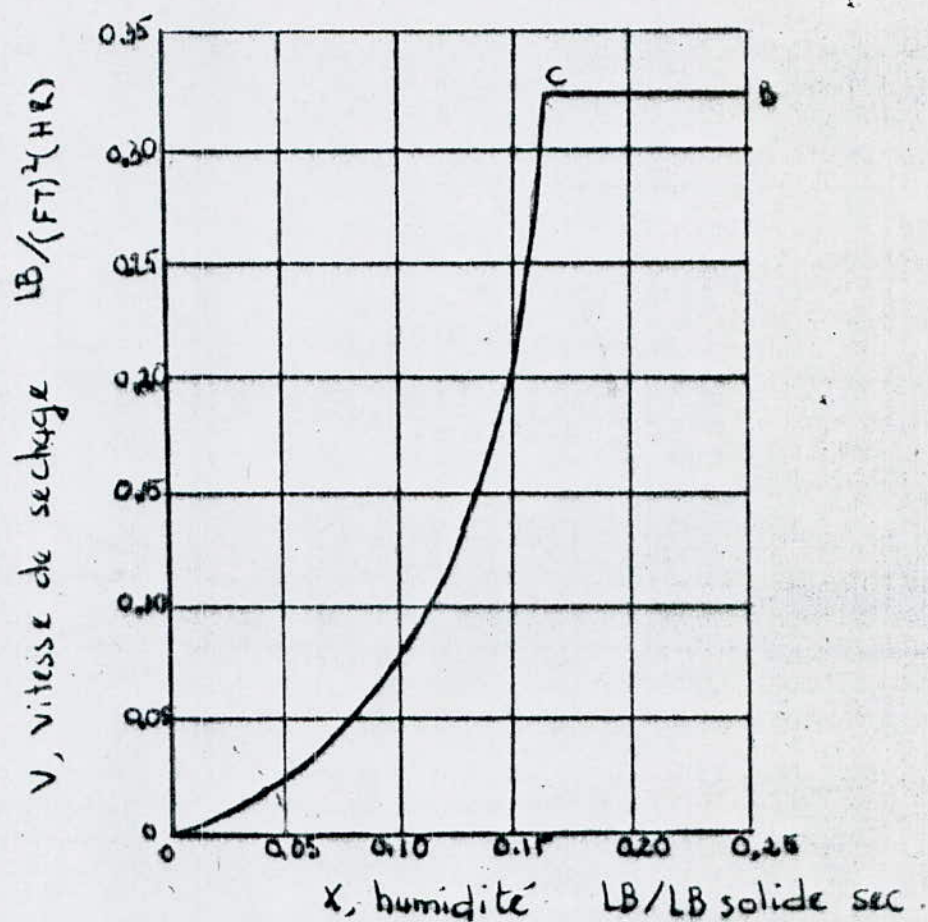


fig-6 - courbe de séchage d'une plaque d'argile

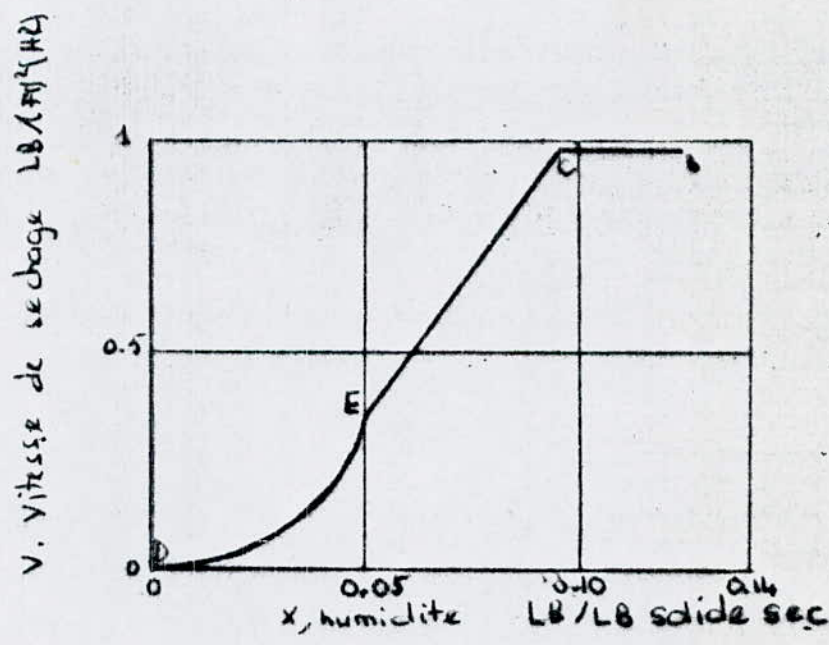


fig-7 - courbe de séchage d'un plat de céramique

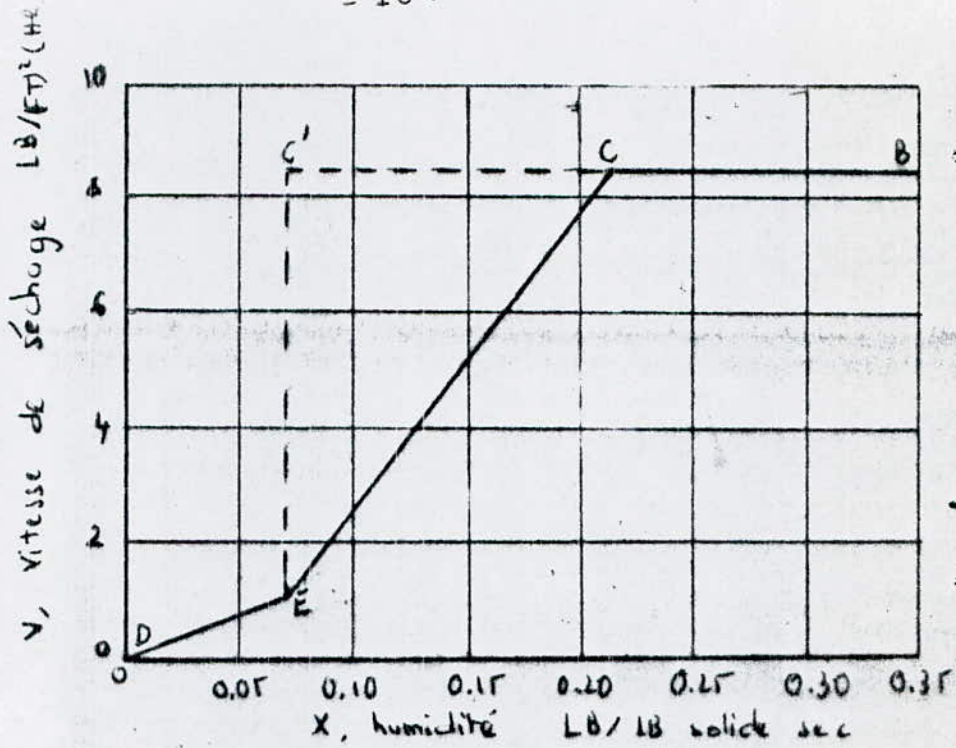


fig-8- courbe de séchage d'un lit de sable

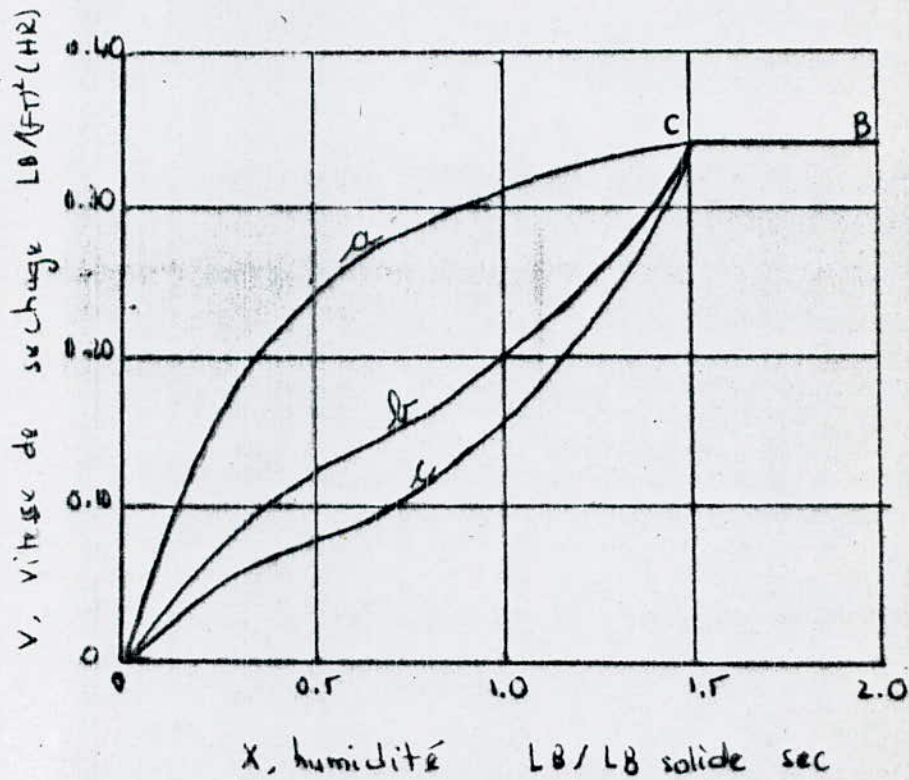


fig-9 - courbe de séchage d'une pâte de papier  
 a : épaisseur 0,108 cm  
 b : épaisseur 0,647 cm  
 c : épaisseur 2,37 cm

## 2-2 Periode à taux constant:

- Dans cette période, l'humidité gagne si rapidement la surface que la pellicule de liquide qui s'y trouve, se renouvelle vite (on suppose que la surface est saturée en humidité à une température constante). Son séchage est, alors analogue à l'évaporation d'une surface de ce liquide. C'est le transfert de matière de la surface du solide vers l'atmosphère qui contrôle la cinétique du séchage.

$$V = - \frac{M_s}{S} \left( \frac{dX}{dt} \right)_c = K (P_0 - P) \dots \dots \dots 2-1$$

V: vitesse de séchage  $\left[ \frac{\text{Kg d'humidité}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$

$M_s$ : masse de solide sec  $[\text{kg}]$

S: surface d'échange de matière  $[\text{m}^2]$

K: coefficient de transfert de matière

$$\left[ \frac{\text{Kg d'humidité}}{\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

$P_0$ : Pression de vapeur saturante à la température du bulbe humide (Pa)

P: pression de la vapeur dans l'air. [Pa]

- du moment que le transfert de matière s'effectue comme une simple évaporation de l'humidité on a alors:

$$- \frac{M_s}{S} \left( \frac{dX}{dt} \right)_c = \frac{h}{\lambda} (\theta - \theta_s) \dots \dots \dots 2-2$$

avec :

$h$  : coefficient de transfert de chaleur par convection  $\left[ \frac{\text{cal}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$

$\theta_s$  : température de la surface du solide humide égale à la température du bulbe humide.  $[^\circ\text{C}]$

$\theta$  : température de l'air  $[^\circ\text{C}]$

$\lambda$  : chaleur Latente de vaporisation du liquide à  $\theta_s$ .  $\left[ \frac{\text{cal}}{\text{kg}} \right]$

de (2.2) on a :

$$\left( \frac{dx}{dt} \right)_c = - \frac{s \cdot h}{M_s \cdot \lambda} (\theta - \theta_s) \dots\dots\dots 2-3$$

$$M_s = \rho_s \cdot s \cdot d \dots\dots\dots 2-4$$

$\rho_s$  : masse volumique du solide  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$d$  : épaisseur de la couche solide  $[\text{m}]$

On a alors :

$$\boxed{\left( \frac{dx}{dt} \right)_c = - \frac{h}{\rho_s \cdot d \cdot \lambda} (\theta - \theta_s)} \dots\dots\dots 2-5$$

## 2-3 Periode à taux décroissant

- Au dernier stade de l'évaporation superficielle, quand l'humidité critique est atteinte, la seconde étape de séchage commence
- la résistance au transfert de matière entre la surface et l'air ambiant est négligeable par rapport à la résistance interne, qui rend plus difficile le transport de l'humidité à l'intérieur de la substance.
- les forces motrices principales dans ce cas sont les forces capillaires et les forces de diffusion ref. (2). c'est les propriétés du solide qui contrôlent dans ce cas la vitesse de séchage
- On note deux théories sur le mouvement de l'humidité à l'intérieur du solide
  - diffusion moléculaire
  - mouvement par capillarité

### 2-3-1 : Cas de la Diffusion moléculaire :

- la solution de l'équation de Fick, proposée par SHERWOOD est :

$$\frac{x - x_e}{x_c - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[ \exp(-nt) + \frac{1}{9} \exp(-9nt) + \frac{1}{25} \exp(-25nt) \dots \dots \dots \right] \dots \dots \dots 2-6$$

avec  $n = \frac{D_L \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2}$

$D_L$  : coefficient de diffusion de l'humidité à l'intérieur du solide  $\dots \dots \dots \left[ \frac{m^2}{s} \right]$

$x ; x_c ; x_e$  : respectivement (humidité du solide au temps  $t$  ; humidité critique ; humidité à l'équilibre)  $\dots \dots \dots \left[ \frac{Kg \text{ d'humidité}}{Kg \text{ de solide sec}} \right]$



d: épaisseur de la couche solide [m]  
t: temps (du début de la seconde période) [s]

- Pour un temps de séchage long; On simplifie l'équation a:

$$\frac{x - x_e}{x_c - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-nt) \dots \dots \dots 2-7$$

en dérivant cette equation et après transformation On aura:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_d = -\frac{\pi^2 D_L}{4 d^2} (x - x_e) \dots \dots \dots 2-8$$

Remarque:  $D_L$  est supposé constant or il dépend de l'humidité ainsi que de la température.

2-3-2: Cas théorie capillaire:

- Dans ce cas la vitesse de séchage est donnée par l'équation suivante:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_d = -K_L (x - x_e) \dots \dots \dots 2-9$$

avec

$$K_L = \frac{-\left(\frac{dx}{dt}\right)_c}{x_c - x_e} \dots \dots \dots 2-10$$

en remplacera  $-\left(\frac{dx}{dt}\right)_c$  par l'équation (2-5)

$$K_L = \frac{h(\theta - \theta_s)}{\varphi_s \cdot d \cdot \lambda (x_c - x_e)} \dots \dots \dots 2-11$$

d'ou alors :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_d = - \frac{h (\theta - \theta_s)}{\varphi_s \cdot d \cdot \lambda (x_c - x_e)} (x - x_c) \dots \dots \dots 2-12$$

2-4 Temps de sechage :

- la duree totale necessaire pour le sechage du produit humide se compose de deux temps, celui du temps a taux constant  $t_c$  et celui du temps a taux decroissant  $t_d$ .

2-4-1 temps de la premiere periode :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_c = \frac{h}{\varphi_s \cdot d \cdot \lambda} (\theta - \theta_s) \dots \dots \dots 2-13$$

apres integration :

$$t_c = \frac{\varphi_s \cdot d \cdot \lambda}{h (\theta - \theta_s)} (x_0 - x_c) \dots \dots \dots 2-14$$

2-4-2 temps de la deuxieme periode :

cas de la diffusion

$$t_d = \frac{4d^2}{D\pi^2} \ln \left( \frac{x_c - x_e}{x - x_e} \right)$$

2-15

theorie capillaire

$$t_d = \frac{\varphi_s \cdot \lambda \cdot d (x_c - x_e)}{h (\theta - \theta_s)} \ln \left[ \frac{x_c - x_e}{x - x_e} \right]$$

2-16

2-4.3 temps de sechage globale :

si on admet que la vitesse est proportionnel a l'humidite  $x$  pendant toute la periode a taux decroissant CD figure 5 on peut ecrire alors :

$$t_t = \frac{\varphi_s \cdot d \cdot \lambda \cdot f_c}{h \cdot (\theta - \theta_s)} \left[ \frac{f_0 - f_c}{f_c} + \ln \frac{f_c}{f_t} \right] \dots \dots 2-17$$

- avec :  $f_0 = x_0 - x_e$   
 $f_c = x_c - x_e$   
 $f_t = x_t - x_e$

2-5 Estimation du coefficient d'échange de chaleur h :

les résultats expérimentaux du coefficient de transfert de chaleur h peuvent être mis dans une corrélation de la forme : réf. (4)

$$j_h = \left( \frac{h}{C_p G'} \right) \times \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)^{2/3} = \phi \left( \frac{L G'}{\mu} \right) \dots \dots \dots 2-18$$

$j_h$  : facteur pour transfert de chaleur (adimensionnel)

$C_p$  : chaleur spécifique du gaz  $\left[ \frac{\text{BTU}}{\text{lb air} \cdot \text{F}} \right]$

$\mu$  : viscosité du gaz  $\left[ \frac{\text{lb air} \cdot \text{ft}}{(\text{ft})^2 \cdot \text{hr}} \right]$

$k$  : conductivité thermique du gaz  $\left[ \frac{\text{BTU} \cdot \text{ft}}{\text{ft}^2 \cdot \text{F} \cdot \text{hr}} \right]$

$G'$  : débit spécifique massique du gaz  $\left[ \frac{\text{lb air}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2} \right]$

$\phi$  : fonction du nombre de Reynolds

pour un déplacement du gaz parallèle à la surface d'évaporation

la fonction du nombre de Reynolds peut être remplacée par  $b \left( \frac{L G'}{\mu} \right)^n$  où b et n sont des constantes.

- l'équation (2-18) devient alors :

$$\left( \frac{h}{C_p \cdot G'} \right) \times \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right) = b \times \left( \frac{L \cdot G'}{\mu} \right)^n \dots \dots \dots 2-19$$

En general, l'exposant  $n$  a une valeur de l'ordre de  $-0,2$ .

pour l'air dans l'intervale de temperature compris entre  $115^{\circ}\text{F}$  et  $300^{\circ}\text{F}$  la variation de  $(C_p \cdot M)^k \approx 0,720,69$  et la variation de  $C_p$  est aussi petite, que  $k$  l'equation (2-19) devient alors:

$$h = 0,0128 \cdot G^{0,8} \dots\dots\dots 2-20$$

## 2-6 Influence des facteurs externe sur la vitesse de séchage:

### 2-6-1: Influence de la vitesse de l'air:

- la vitesse de l'air est un facteur externe qui détermine directement le coefficient de transfert de matière et de chaleur, dans le cas de l'évaporation superficielle (taux constant).

d'après l'expression de  $h$  on voit que le coefficient de transfert de chaleur augmente comme la  $0,8^{\text{ème}}$  puissance de la vitesse de l'air.

Donc plus la vitesse de l'air augmente plus la cinétique du séchage dans cette période augmente elle aussi, par contre cette vitesse n'influe pas beaucoup sur la vitesse de séchage lors de la période de taux décroissant.

### 2-6-2: Influence de l'humidité de l'air:

- D'après la relation (2.1), la vitesse de séchage est directement proportionnelle au gradient de pression de vapeur de la surface du solide et de l'air, qui est lui aussi lié au gradient de température, nous pouvons donc dire qu'une diminution de la pression partielle de vapeur dans l'air entrainera une augmentation de la vitesse de séchage.

2-6-3 Influence du gradient de  
Température :

- le séchage est accéléré par une augmentation de la température de l'air mais souvent dans ce cas on est limité par les risques de cassure due à la tension interne du corps humide à la suite de cette élévation de température.

2-6-4 : moyen à mettre en œuvre pour accélérer le séchage pendant la seconde période du séchage :

- Dans cette période à taux décroissant la vitesse de l'air n'a pas d'influence sur la vitesse de séchage, seul comptent le gradient de température, et celui de pression.

### 3 - LES SECHOIRS :

- les sechoirs peuvent être classés de différentes manières ; les deux classements les plus utilisés sont basés sur :

- le mode de transfert de chaleur vers le solide humide.
- les caractéristiques de manutention et des propriétés physiques du matériel à sécher.

la première méthode de classification est la plus utilisée pour la sélection d'un groupe de sechoir lors des considérations préliminaires d'un problème de séchage. réf. (2) et (5)

#### 3.1 Classification des sechoirs selon le mode de transfert de chaleur :

##### 3-1-1 sechoir directe :

- la chaleur est transmise par convection du gaz chaud vers le solide humide, l'humidité extraite est transportée par le moyen de chauffage c'est à dire le gaz chaud.

- On distingue deux groupes de sechoirs :

##### - a - sechoir continu :

- l'opération de séchage est continue sans interruption tant que l'alimentation en produit humide ne s'arrête.

les différents types sont :

- sechoir à tapis roulant
- " à plateau
- " pneumatique
- " rotatif.
- " atomiseur (pulvérisation)
- " tunnel
- " à circulation transversale
- " à lit fluidisé.

- b - sechoir discontinu : -21-

- sechoir conçu pour le séchage d'un certain volume de solide pour un temps de cycle donnée.

Les différents types :

- sechoir à plateau
- " " à lit fluidisé

3-1-2 Sechoir indirecte :

- la chaleur nécessaire au séchage est transmise par le support.

le liquide vaporisé est transporté indépendamment du moyen de chauffage.

La vitesse de séchage dépend de la manière de contact entre le solide et la surface chaude du support.

Les sechoirs indirecte sont aussi nommés sechoirs à "contact" ou à "conduction".

- a - sechoir continue :

- le séchage est accompli par le passage du matériel humide à travers le sechoir en continue et en contact avec la surface chaude.

- les différents types sont :

- sechoir cylindrique
- " " à tambour
- " " à tube tournant
- " " à plateau vibrant.

- b - sechoir discontinu

- les sechoirs indirectes sont généralement adaptés pour fonctionner sous vide

- les différents types :

- sechoir à plateau sous vide
- " " Rotatif sous vide.
- " " avec agitateur.



### 3-1-3 sechoir à rayonnement :

- soit un tunnel dont les parois peuvent être portées à une température de surface  $T$  réglable à volonté.

faisons avancer dans ce tunnel une file de corps humide. Cet apport de chaleur par rayonnement peut être très important et accélère considérablement l'évaporation de surface.

- On fabrique toute sorte de panneaux rayonnants pouvant constituer des parois des sechoirs tunnel.

ils sont formés par soit :

- assemblage de tube d'aciers de section rectangulaire dans lesquels circule de l'eau chaude, de la vapeur ou un fluide très chaud.

- tube cylindrique par coutus par des flamme longue.

- ou bien composé de plaque refractere chauffés par la combustion d'un gaz.

- ou encore des lampes électrique à fort rayonnement infrarouge.

On réalise ainsi des températures de surface variant de 50 à 500 °C pour les panneaux dit à rayonnement obscur ; et de 500 à 900 °C pour les panneaux dit à rayonnement lumineux.

On se rend compte qu'avec une variation en  $T^4$ , il soit possible de diriger vers le corps humide un flux de chaleur extraordinairement élevé.

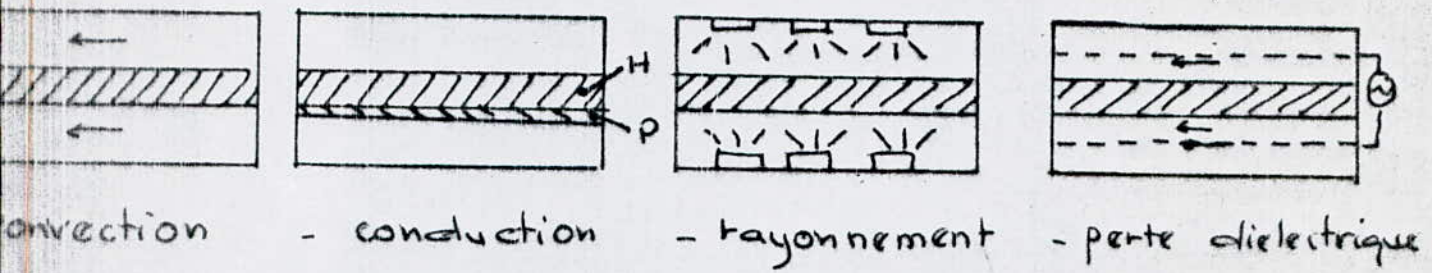
- On a réservé le séchage par rayonnement aux évaporation de surface. le temps de séjour du corps humide dans le tunnel devra être d'autant plus court que la température des parois y sera plus élevée, et ce temps devra être réglé avec précision (pour éviter le risque d'endommager le produit humide).

### 3-1-4 Sechoir a perte dielectrique :

- lorsque le corps humide est Volumineux et, de plus, mauvais Conducteur de la chaleur, ce qui est generalement le cas des dielectriques, isolants de la chaleur et de l'electricite, les trois methodes de chauffage precedant conduisent a un temps de sechage considerable. il faut en effet attendre que le centre du corps soit sec et que, par consequent, le flux de chaleur venant de la surface l'ait atteint, pour considerer le sechage comme termine. l'idee du chauffage dielectrique est venu de la constatation du fait que certains isolants electriques, presentant une bonne tenue a la tension continue, chauffe lorsqu'ils sont soumis a un champ electrique alternatif de frequence elevee. la mise en oeuvre de ce procede consiste a placer le corps humide entre les armatures et un condensateur plan.

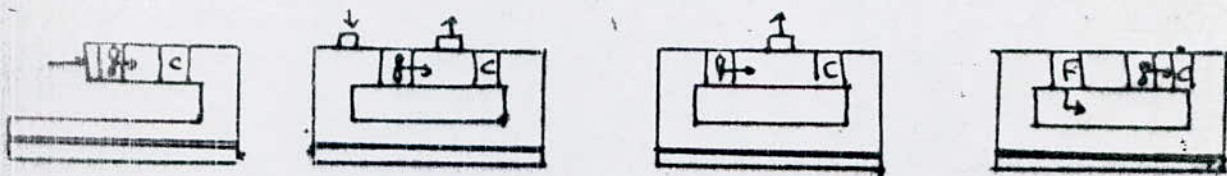
### 3-2 Circuit aeraulique associe :

- l'evacuation de la vapeur necessite generalement un circuit aeraulique (transport de l'humidite extraite).
- lorsque la chaleur est cede'e par conduction rayonnement ou par perte dielectrique le circuit aeraulique associe le plus simple est le circuit ouvert. Il est souvent combine avec un rechauffage d'air.
- lorsque le chauffage est realise par convection, le circuit aeraulique est plus complexe et comporte quatre variantes principales, qui sont represente par le Schema (1).



H: corps humide  
P: plaque chauffante

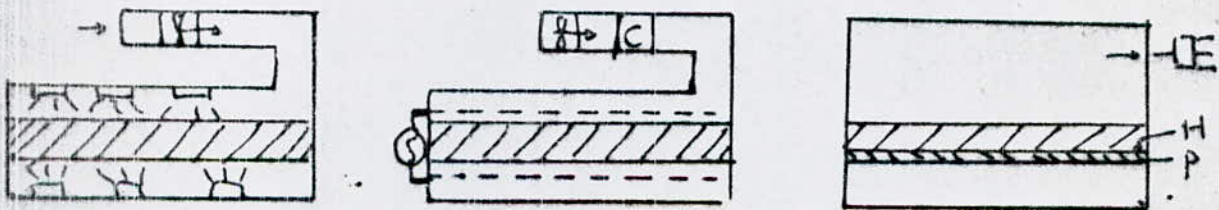
Schemas des enceintes de Sechage.



circuit ouvert      circuit de recyclage      circuit de vapeur      circuit fermé étanche

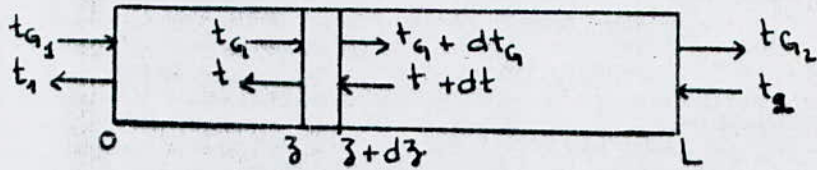
[V] ventilateur ; [C] : rechauffeur ; [F] : refroidisseur.

Schemas(1) aeraulique des sechoirs à convection



rayonnement circuit ouvert      perte dielectrique circuit ouvert chauffé      conduction, sous vide

4. UNITE DE TRANSFERT DANS LES SECHOIRS :



On fait le bilan de chaleur dans l'élément de longueur  $dz$

$$dQ = -G' \cdot s \cdot c_p \cdot dt_G = -q'_s \cdot s \cdot c_s \cdot dt \dots \dots \dots 4-1$$

de l'équation général de transfert de chaleur  
On aura :

$$dQ = U \cdot a \cdot s \cdot (t_G - t) \cdot dz \dots \dots \dots 4-2$$

en combinant (4-1) et (4-2) On a :

$$-G' \cdot s \cdot c_p \cdot dt_G = U \cdot a \cdot s \cdot (t_G - t) \cdot dz \dots \dots \dots 4-3$$

On suppose que  $U \cdot a$  et  $s$  sont constant on aura :

$$\int_0^L dz = -\frac{G' \cdot c_p}{U \cdot a} \int_{t_{G1}}^{t_{G2}} \frac{dt_G}{t_G - t} \dots \dots \dots 4-4$$

$$NUT = \int_{t_{G1}}^{t_{G2}} \frac{dt_G}{t_G - t} \quad ; \quad HUT = \frac{G' \cdot c_p}{U \cdot a}$$

$$L = NUT \times HUT \dots \dots \dots 4-5$$

avec :

- $G'$  : débit spécifique massique du gaz  $\left[ \frac{\text{kg gaz}}{\text{h. m}^2} \right]$
- $q'_s$  : " " " " du solide  $\left[ \frac{\text{kg solide}}{\text{h. m}^2} \right]$
- $C_p$  : Chaleur spécifique du gaz  $\left[ \frac{\text{cal}}{\text{kg.}^\circ\text{C}} \right]$
- $S$  : Section droite du sechoir  $\left[ \text{m}^2 \right]$
- $C_s$  : Chaleur spécifique du solide  $\left[ \frac{\text{cal}}{\text{kg solide.}^\circ\text{C}} \right]$
- $t_g$  : température du gaz  $[\text{}^\circ\text{C}]$
- $t$  : " " du solide  $[\text{}^\circ\text{C}]$
- $L$  : longueur du sechoir  $[\text{m}]$
- $U$  : Coefficient de transfert de chaleur  $\left[ \frac{\text{cal}}{\text{h. m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \right]$
- $a$  : surface d'échange de chaleur par unité de volume du sechoir  $\left[ \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \right]$

Remarque : ce type de calcul de la longueur du sechoir est applicable surtout aux sechoirs à pulvérisation, sechoirs pneumatique, sechoirs à tambour.

Les suppositions faites lors de ce calcul sont :

- pas de perte de chaleur
- il y a apport de chaleur uniquement des gaz, ni par conduction, ni par rayonnement.
- l'humidité du corps humide est une humidité du type non liée.

DEUXIEME

PARTIE

CONCEPTION D'UN

SECHOIR DIRECT.

CONTINU

L'utilisateur d'un séchoir doit en premier lieu préciser l'emploi général qu'il désire faire de son appareil et indiquer en détail les opérations de séchage qu'il entend y réaliser : ce sont "Les données d'établissement".

On peut classer ces données comme suit :

- a - propriétés du corps humides :

- propriétés physiques à l'état humide
- propriétés physiques à l'état sec
- corrosivité
- toxicité
- Inflammabilité
- dimensions des particules
- abrasivité

- b - caractéristique du séchage du corps humide :

- type d'humidité (liée, ou non liée).
- humidité initiale
- humidité finale
- température de séchage permise
- estimation du temps de séchage pour différent séchoir



- c - production :

- la quantité à traiter par heure.
- processus précédant le séchage.
- processus subséquent le séchage.

- d. qualité du produit :

- retrecissement (fissuration).
- contamination.
- température maximale à la sortie.

- e. Récupération éventuelles :

- de poussières.
- de solvant.

- f. modalité d'installation du séchoir :

- espace disponible.
- condition de l'air extérieur (Température ; pureté ; humidité)
- fluide chauffant disponible.
- courant électrique disponible.
- bruit, vibrations, poussière, et chaleur perdue permise.

## 5. RECHERCHE DU MEILLEUR TYPE DE SECHOIR :

- cette recherche est grandement facilitée si l'on se pose les questions que nous proposons ci-après :

- quelle est exactement la texture du corps humide ?  
liquide ; pâteux , pulvérulent , granuleux fibreux ou compacte.
- quelle est l'importance de la production si elle est faible on choisira un séchoir opérant en discontinu , et il sera continu dans le cas contraire.
- quelle sera la source de chaleur la plus économique , en tenant compte de l'existence de fluides chauffant à proximité de l'emplacement du séchoir.
- quel mode de chauffage du corps humide devra-t-on choisir.
- l'air à la pression atmosphérique ne permet pas de réaliser le séchage à basse température de corps délicats qu'il faut traiter dans une enceinte où règne un vide partiel. le corps à sécher est-il dans cette catégorie.
- chaque mode de chauffage peut être associé à un ou plusieurs circuits aérauliques , permettant en particulier une récupération de chaleur , quel sera le circuit le mieux adapté.

## -6- DIMENSIONNEMENT :

pour choisir le sechoir qui convient à notre produit humide On devra examiner les six points cités auparavant.

On constate que c'est la texture du produit humide qui est le point de départ dans notre recherche.

### 6-1 : Les différents moyens de manutention :

- claie sur support fixe ou sur chariot.
- Balancelle.
- tapis transporteur
- support vibrant

### 6-2 : Source de chaleur : (rechauffeur d'air)

Dans les sechoirs à convection, les fluides chauds :

- eau chaude
- liquide très chaud
- vapeur
- gaz de combustion

circulent généralement dans les tubes à ailettes d'un rechauffeur

Lorsqu'on ne dispose ni d'eau chaude, ni de vapeur, ni de gaz de combustion, ou lorsqu'on désire porter l'air chaud à haute température (au dessus de 200°C).  
On utilise :

- a - un générateur d'air chaud :

Cet échangeur combiné, réunit dans un même coffrage :

- un générateur de chaleur composé d'un brûleur et d'une chambre de combustion.

- un réchauffeur d'air à tube ailette parcouru par les gaz de combustion.

- b - générateur mélangeur :

réservé à des produits peu délicats (Température élevée).

Ce sont des générateurs d'air chaud dépourvus de leur réchauffeur d'air, lequel est remplacé par une chambre de mélange de l'air de séchage et des gaz de combustion.

### 6-3 Ventilateurs

- C'est l'appareil qui entretient l'écoulement de l'air dans le circuit aéraulique de séchage.

- Il reçoit une puissance mécanique dont l'importance dépend de sa position dans le circuit ; cette puissance est, toute chose égale, d'autant plus faible que le ventilateur est placé dans un endroit du circuit où l'air est plus froid.

- a - On utilise beaucoup les VENTILATEURS HELECOIDES dans les séchoirs.

Il permettent en effet d'entretenir l'écoulement de débit important, sous de faibles pertes de charge.

toutefois, si l'air véhiculé est trop chaud pour le moteur électrique, on utilise le montage dans un coude à angle droit, qui permet ainsi de placer le moteur à l'extérieur de l'enceinte.

- b - Les VENTILATEURS CENTRIFUGE. Sont réservés aux cas particuliers des séchoirs pneumatique, ou des séchoirs à convection dans lesquels l'air de séchage traverse une couche épaisse de matière.

6-4 : partie calcul :

6-4-1 calcul de la dimension de l'enceintes  
(sechoir continu).

- a- Principe de calcul : soit

$q_s$  : debit du solide [kg/h]

$t$  : le temps de sechage [h]

$\rho_m$  : la masse de matiere repartie dans  
l'unité de volume de l'enceinte de  
sechage.

$v$  : vitesse d'avancement du produit  
dans le sechoir.

$L$  : longueur de l'enceinte de sechage

$S$  : section droite normale à la  
direction de  $v$ .

d'après la formule de mécanique des  
fluides on a :

$$q_s = v \cdot S \cdot \rho_m$$

avec :  $v = \frac{L}{t}$

Ce qui donne

$$q_s = \frac{L}{t} \cdot S \cdot \rho_m$$

$$L \cdot S = \frac{q_s \cdot t}{\rho_m} \quad \text{--- --- --- --- --- 6-1}$$

- Le temps de séchage d'après l'équation (2-17) est de la forme :

$$t = \frac{\lambda \cdot \varphi \cdot d \cdot f_c}{h (\theta - \theta_s)} \left[ \frac{f_0 - f_c}{f_c} + \ln \frac{f_c}{f_t} \right]$$

et de l'équation (2-20) on a :

$$h = 0,0128 G^{0,8}$$

- évaluation de  $\varphi_m$  :

il dépend essentiellement du produit à sécher et du mode de manutention adopté pour le faire avancer dans le séchoir.

- b - Application numérique :

exemple du coton brute

$$q_s = 70 \frac{\text{lb solide sec}}{\text{hr}}$$

$$x_0 = 0,8 \frac{\text{lb d'humidité}}{\text{lb solide sec}}$$

$$x_f = 0,3 \frac{\text{lb d'humidité}}{\text{lb solide sec}}$$

$$d = \frac{1}{2} \text{ in}$$

$$\theta = 200 \text{ F}$$

$$\theta_s = 120 \text{ F}$$

$$\varphi_s = 43 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} = 0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

$$x_c = 0,4 \frac{\text{lb d'humidité}}{\text{lb solide sec}}$$

- d'après le diagramme de l'air humide; connaissant la température du bulbe sec  $\theta$  et du bulbe humide  $\theta_s$  on a alors:

$$Y_0 = 0,06 \frac{1b \text{ d'humidité}}{1b \text{ d'air sec}}$$

on pose  $Y_s = 0,065 \frac{1b \text{ d'humidité}}{1b \text{ d'air sec}}$

la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $\theta_s = 120 \text{ F}$  est

$$\lambda = 1025,8 \frac{BTU}{1b \text{ d'humidité}}$$

l'humidité de l'air à l'entrée  $\varphi = 3\%$

On tire alors  $X_e = 0,008 \frac{1b \text{ d'humidité}}{1b \text{ solide sec}}$  (de la courbe d'équilibre)

- Calcul du débit de gaz nécessaire:

bilan de matière sur l'humidité

$$G_s(X_0 - X_s) = G_g(Y_s - Y_0)$$

$$\Rightarrow G_g = 7000 \frac{1b \text{ d'air sec}}{hr}$$

- le temps de séchage :

$G'_s = \frac{G_s}{S}$  l'équation (2-17) après application numérique devient

$$t = 0,7.5^{0,8}$$

-  $Y_m$  est évalué pour ce produit à

$$Y_m = 0,4 \frac{1b \text{ solide}}{ft^3}$$



En remplaçant  $q_s$ ,  $t$  et  $\varphi_m$  dans la formule (6.1)

On aura :

$$L \cdot s^{0,2} = \frac{0,7 \cdot 70}{0,4}$$

si  $L = 70 \text{ ft} \rightarrow s = 16 \text{ ft}^2$  et  $t = 6 \text{ hr}$

Calcul de la largeur  $l$  du séchoir :

$$q_s = l \cdot d \cdot \frac{L}{t} \cdot \varphi_s$$

d'où  $l = \frac{q_s \cdot t}{d \cdot L \cdot \varphi_s}$

Les dimensions du  
séchoir sont

$$l = 3,8 \text{ ft} = 1 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ ft} = 1,5 \text{ m}$$

$$L = 70 \text{ ft} = 20 \text{ m}$$

$$\vartheta = 6 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

$$Q_{200F} = 0,17 \frac{\text{m}^3 \text{ d'air}}{\text{s}}$$

$$\sigma_{\text{air}} = 0,6 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

6-4-2 Calcul du rechauffeur :

- a - principe de calcul :

flux de chaleur

$$\varphi = G \cdot C_p \cdot (\theta - \theta_i) \dots\dots\dots 6-2$$

$$\varphi = U \cdot A \cdot \text{DTLM} \dots\dots\dots 6-3$$

des equations (6-2) et (6-3) on aura :

$$A = \frac{G \cdot C_p \cdot (\theta - \theta_i)}{U \cdot \text{DTLM}} \dots\dots\dots 6-4$$

Le coefficient globale d'échange de chaleur est égale  $\alpha$  : (pour un fluide circulant à l'intérieur d'un tube)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\ln R_2/R_1}{k} + \frac{1}{h_e}} \dots\dots\dots 6-5$$

- b - Application numérique :

Comme exemple on utilisera un rechauffeur à tubes ailettes alimentés en vapeur saturée à 3 bar et  $T = 142^\circ\text{C}$

tube de 50 mm de diamètre d'ailette ayant une surface d'échange de  $1,15 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$

pour une vitesse frontale de l'air égale à 3,5 m/s  
On a :  $U = 34 \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

on a alors:

$$\dot{Q} = 7000 \cdot 0,27 (200 - 113) = 164,43 \cdot 10^3 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = 41503 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

d'où de l'équation (6-4) on a:

$$A = \frac{41503}{34 \times \frac{(142-45) - (142-93)}{\ln\left(\frac{142-41}{142-93}\right)}} = 17,36 \text{ m}^2$$

- pour avoir  $v_{\text{air}} = 3,1 \text{ m/s}$  avec  $Q = 0,87 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \Rightarrow S = 0,25 \text{ m}^2$   
 $= 0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$

- longueur total du tube désiré:  $l = \frac{17,36}{1,15} = 15 \text{ m}$

- nombre de tube =  $\frac{15}{0,5} = 30$  tubes

- chaque rangé peut avoir  $\frac{0,5}{50 \cdot 10^{-3}} = 10$  tubes

donc le réchauffeur sera composé de

3 rangés de 10 tubes ailettes long de 0,5m

6-4-3 Calcul du ventilateur:

- les caracteristiques principales d'un ventilateur sont:

- le debit volumique  $Q$  [ $m^3/s$ ]
- la perte de charge  $\Delta P$  [Pa]
- le rendement  $\eta$

la puissance qu'il transfert  $\mathcal{P}$  s'ecrit:

$$\mathcal{P} = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} \dots \dots \dots 6-6$$

Application numerique

calculons les pertes de charge dans le sechoir...

$$\Delta P_T = \Delta P_{E_1} + \Delta P_{E_2} + \Delta P_L$$

$\Delta P_T$ : Perte de charge totale

$\Delta P_{E_1}$ : Perte de charge due a un elargissement brusque

$\Delta P_{E_2}$ : Perte de charge due a un deuxieme elargissement brusque.

$\Delta P_L$ : perte de charge due aux frottement du fluide le long de l'enceinte du sechoir

$$\Delta P_L = \frac{1}{2} \varphi_{air} v_{air}^2 \frac{\epsilon \cdot L}{D_e} \dots \dots \dots 6-7$$

$$\Delta P_{E_1} = \frac{1}{2} \varphi_{air} v_{air1}^2 \xi_1 \dots \dots \dots 6-8$$

$$\Delta P_{E_2} = \frac{1}{2} \varphi_{air} v_{air2}^2 \xi_2 \dots \dots \dots 6-9$$

$\epsilon; \xi_1; \xi_2$ : coefficients de perte de charge

1) calcul de  $\Delta P_L$ 

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{air} \cdot d_{air}}{\mu_{air}} \dots \dots \dots 6 \cdot 10^4$$

$$d_2 = 4 \cdot \frac{S}{P} = 4 \cdot \frac{1,25}{5} \approx 1,2 \text{ m}$$

$$Re = \frac{1,2 \cdot 0,6 \cdot 1,2}{1,8 \cdot 10^{-7}} = 44 \cdot 000$$

on sait que pour un nombre de Reynolds "Re"  
 $4 \cdot 000 \leq Re \leq 20 \cdot 10^6$  on a  $E = 4 \cdot 0,04 \cdot Re^{-0,16}$

d'où :

$$\Delta P_L = 0,1 \text{ Pa}$$

2) perte de charge due aux élargissement :

$$- \Delta P_{E_1} = \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot (22)^2 \cdot \xi_1$$

d'après les corrélations on a :

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{0,04}{0,25}\right)^2$$

$$\xi_1 = 0,70$$

$$\Delta P_{E_1} = 187 \text{ Pa}$$

$$- \Delta P_{E_2} = \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot (3,5)^2 \cdot \xi_2$$

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$$\xi_2 = \left(1 - \frac{0,25}{1,5}\right)^2$$

$$\xi_2 = 0,70$$

$$\Delta P_{E_2} = 4,7 \text{ Pa}$$

puisque nous venons de calculer les trois types de perte de charge nous allons maintenant calculer

$$\Delta P_T = \Delta P_L + \Delta P_{E_1} + \Delta P_{E_2}$$

$$\Delta P_T = 192 \text{ Pa} \approx 21 \text{ mm d'eau}$$

d'après les courbes caractéristiques du ventilateur SOLYVENT H4.45.6 pales (fig 10) on trouve la puissance nécessaire égale à  $P = 0,8 \text{ ch.}$  (diamètre du ventilateur 400 mm).

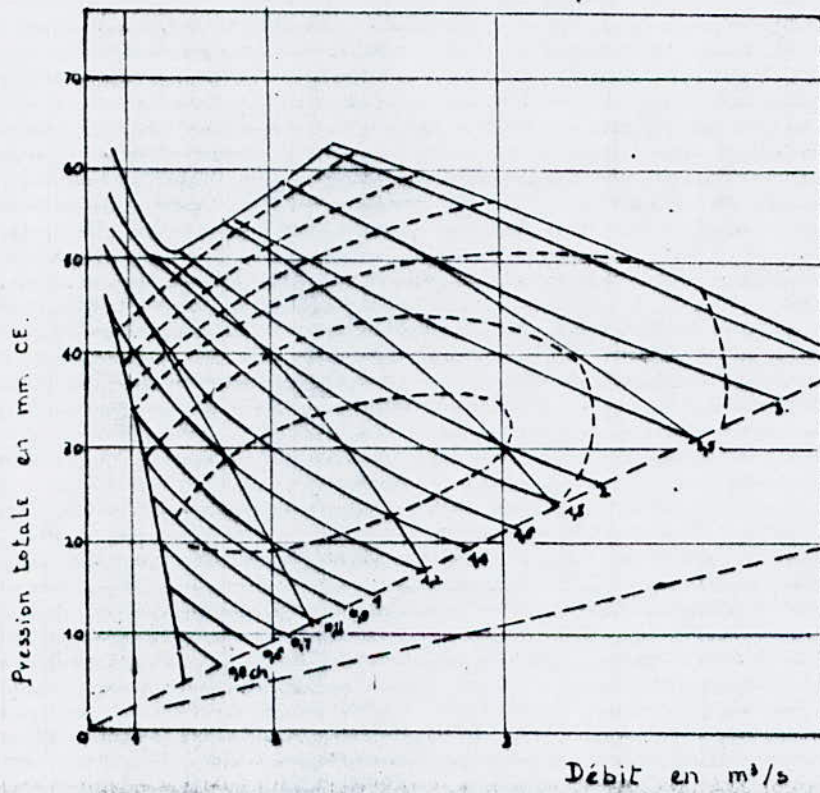


fig: 10

Courbe Caractéristique d'un ventilateur SOLYVENT HU 45. 6 Pales,  
2900 tr/mn, Calage maximum: 26°.

## 7. Aspect économique d'un séchoir : réf. (6)

D'après les recherches faites sur l'amélioration des performances énergétiques des séchoirs utilisés en industrie agro-alimentaire. Un tableau, présente le bilan thermique d'un séchoir conventionnel, à chauffage direct, présentant une consommation thermique spécifique de 5.023 KJ/Kg (1200 Kcal/Kg).

Tableau : Bilan thermique d'un séchoir conventionnel

Energie / Kg d'eau		% de consommation spécifique totale	utilisation de la chaleur
KJ/Kg	Kcal/Kg		
753,5	180	15	Perte par l'échangeur thermique
100,5	24	2	Perte par diffusion
301	72	6	perte par échauffement du grain
603	144	12	perte par insaturation de l'air usé
753,5	180	15	perte par la chaleur sensible de l'air usé supposé saturé
2 511,5	600	50	Chaleur de vaporisation de l'eau du grain
5 023	1200	100	Consommation spécifique totale

les diverses pertes totalisent environ 50% de la chaleur fournie par le combustible.



Pour cela diverses possibilités actuelles d'amélioration de l'efficacité énergétique des sècheurs ont été données :

1 - Réduire les fuites et les pertes par les parois

2 - Opérations de récupération :-

- emploi des gaz de chaudière (au propane ou au gaz naturel) pour le fonctionnement du sècheur

- utilisation de l'échappement d'une machine thermique (moteur à explosion ou turbine à gaz) comme gaz de séchage.

- utilisation d'énergie solaire (production directe d'air chaud par capteurs plans ou à concentration).

3 - Modification des conditions de fonctionnement du sècheur :-

- utiliser un air de séchage le plus chaud possible.

- saturer l'air le mieux possible.

- Recycler une partie de l'air humide à l'entrée du sècheur (possibilité limitée par l'échauffement du produit ; les condensations et les fuites --).

- Diviser le sècheur en plusieurs sections. recycler l'air de l'une dans l'autre, à co-courants ou contre-courant.

- Améliorer la régulation du sècheur, permettant par exemple de ne pas sécher plus qu'il ne faut.

4 - Enfin : sécher le moins possible :-

- Éviter d'humidifier le produit avant séchage

- le récolter le plus sec possible

- Remplacer une partie du séchage par l'une des opérations mécaniques moins coûteuses en énergie.

## - 8. Application du séchage dans l'industrie des pâtes alimentaires: réf. (7)

En agro-alimentaire, si le séchage n'était qu'un des principes généraux sur lequel est basée la conservation de la plupart des denrées alimentaires. (il importe peu que les fruits, légumes ou plantes desséchés aient perdu leur couleur, aspect et forme initiale).

Au point de vue de pâte alimentaires, il en va tout autrement: le séchage est un stade important de fabrication faisant suite au pétrissage et treffilage: c'est la phase la plus délicate.

Le séchage, en pâtes alimentaires, doit exalter et stabiliser la double qualité des matières premières utilisées et du traitement mécanique de formage du produit fabriqué. Il ne doit altérer en rien ni la forme, ni l'aspect, tout en permettant au produit fabriqué de rester insensible aux influences extérieures pendant sa conservation (stockage).

Au point de vue physico-chimique, il doit donc réaliser un état d'équilibre, sans fermentation entre les principaux constituants (eau - amidon - gluten additifs).

par ailleurs, le goût, la digestibilité et l'assimilation nutritionnelle sont fonction, pour une part, du séchage et de la façon dont il a été conduit.

Normalement, le séchage des pâtes alimentaires est composé de quatre phases bien distinctes qui sont les suivantes:

- 1 - phase de pré-séchage à allure constante
- 2 - phase de séchage à allure ralentie
- 3 - séchage définitif.
- 4 - La "stabilisation finale" des pâtes à sécher.

## - 1 - phase de pré-séchage :

C'est la phase préliminaire la plus délicate, car de la façon dont elle est exécutée dépendent les deux phases suivantes de séchage.  
En réalité, durant cette phase, on doit réaliser les conditions ci-après :

- Enlever à la pâte fraîche, dans un laps de temps relativement court (environ 1/10 de la phase de séchage à allure ralentie), une proportion d'eau relativement élevée : soit 28 à 35% de la quantité globale d'eau à enlever. Ce temps est variable suivant le type de format à fabriquer : il est normalement compris entre 30 et 60 minutes. Il est ainsi pour éviter tout développement de moisissures et freiner brusquement tout processus de fermentation.

- stabiliser la pâte sous sa forme : empêcher la déformation de gros formats, l'agglomération des pâtes fines, l'allongement des pâtes longues sur les cannes.

- obtenir des pâtes transparentes et de bel aspect car les pâtes restant longtemps humides sont mates et d'aspect sombre.

## - 2 - phase de séchage à allure ralentie :

C'est la phase qui suit immédiatement le pré-séchage. Il consiste à obtenir le ramollissement des pâtes afin de rétablir dans toute la masse de la pâte à sécher, l'équilibre d'humidité, momentanément rompu par la forte chauffe - ventilation durant la précédente phase.

En effet à la sortie du pré-sechoir la partie externe des pâtes est desséchée, alors que leur partie interne contient encore de l'humidité : il y a donc tension de matière entre les deux parties. Pour rétablir l'équilibre (ramollissement) il faut donc :

- arrêter l'évaporation brutale de l'humidité encore contenue dans les pâtes.

- placer les pâtes à sécher en équilibre avec leur propre vitesse de séchage. Pratiquement, il faut placer les pâtes dans un milieu dont l'atmosphère sera saturée par

L'humidité sortant des pâtes à sécher.

- 3- Séchage définitif:

C'est l'avant dernière étape qui doit amener graduellement la pâte à son taux d'humidité d'équilibre (12,5 à 13% d'humidité).

La caractéristique fondamentale durant la présente phase est d'effectuer le séchage dans des enceintes où les périodes de ventilation avec admission d'une plus ou moins grande quantité d'air alternent avec celles de repos.

- 4- Stabilisation finale en silo:

Théoriquement, le cycle de fabrication des pâtes alimentaires se termine avec la phase de séchage définitif.

Pratiquement, l'expérience industrielle démontre que ce n'est point suffisant, au point de vue de séchage pour certains gros formats de pâtes alimentaires.

En réalité, pour certains gros formats de pâtes alimentaires l'équilibre hydrique n'est pas encore entièrement établi entre les deux principaux composants: amidon et gluten.

Signalons que de ce phénomène d'équilibre dépend la qualité des pâtes.

## - 8-1- Defauts de sechage des pâtes alimentaires:

- Parmi la liste des accidents de sechage, se dégagent 3 types couramment constatés:

- a - La gercure (ou filure) aboutissant normalement à la cassure ou brisure.
- b - la moisissure.
- c - l'excès d'acidité par fermentation.

### - a - la gercure:

c'est le résultat d'un sechage dans une atmosphere trop chaude et particulièrement sèche.

la diffusibilité de la chaleur, en cours de sechage, n'est pas homogène à travers l'épaisseur de la pâte: les parties superficielles, trop vite dessechées et imperméabilisées, bloquent l'évaporation de l'humidité contenue dans les parties internes de la pâte. les différences de tension de la matière resultantes se traduisent donc par des fêlures.

une pâte gercée est excessivement fragile, elle tombera d'elle même en petit morceaux au moindre choc: la mouture pour remise en fabrication est la seule destination raisonnable. si, par hasard exceptionnel, elle conserve suffisamment de resistance pour ne pas se briser, elle ne tiendra nullement à la cuisson et se fragmentera en morceaux.

### - b - la moisissure:

Elle est la conséquence d'un séchage en ambiance trop chargée en humidité avec une température relativement basse. (humidité relative  $\geq$  supérieure à 62%, température inférieure à 35°C).

Quelles que soient les conditions de séchage, l'accident peut se produire quand:

- la ventilation des séchoirs se trouve partiellement ou totalement obstruée.

- la libre circulation d'air ne peut s'effectuer à travers les grillages des tapis.
- les toiles grillagées des tapis séchoirs présentent des poches et affaissement créant ainsi une inégalité de surcharge.
- les séchoirs sont mal entretenus (en particulier toutes parties en toiles grillagées) renfermant dans leurs mailles ou leur atmosphère une infinité de germes de moisissure.

En résumé, les deux types d'accidents (gerçure et moisissure) sont déterminés par des causes opposées. Paradoxalement, si l'on s'éloigne par des conditions favorable à l'un, on se rapproche des conditions qui déterminent l'autre, il faudra donc choisir un juste milieu.

Cependant, le remède préventif consistera surtout à maintenir le matériel en parfait état de propreté, à employer un air débarrassé de poussières et germes de moisissure; à surveiller le bon fonctionnement de tous les psychromètres et appareils de régulation de chaleur.

### - c - l'excès d'acidité :

la fermentation exagérée se développe à la faveur d'une atmosphère d'humidité et chaleur excessives. Fréquemment, elle est accompagnée de moisissures. la pâte présente plusieurs petites cavités internes qu'on peut apercevoir à la cassure. Cette fermentation donne un produit impropre à la consommation dont la saveur est masquée par un goût acide très prononcé.

ANNEXE

## Equipements annexe d'un sechoir :

1- certaine contexture se prêtant mal au séchage ou à la manutention doivent subir des préparations effectuées dans des appareils précédant immédiatement l'enceinte de séchage.

- a - broyage : nous savons que le temps de séchage, augmente avec l'épaisseur du corps humide. il est donc logique de diviser en parties plus petite les particules d'un corps épais avant séchage, lorsque ce corps se prête bien à cette division et que le produit fini s'en accomode. certain séchoir pneumatique par exemple sont combiné à un broyeur.

- b - mélange avec matière sèche : lorsqu'un corps pulvérulent ou granuleux est collant, il est souvent possible de rendre facile sa manutention en le mélangeant à une certaine quantité de matière sèche. c'est un procédé de recyclage de matière qui est souvent utilisé dans les séchoirs pneumatiques.

## 2. Dépoussiereur :

un dépoussiereur est un appareil destiné à séparer d'un courant gazeux les particules de poussières en suspension.

le principe de fonctionnement est d'appliquer une force aux particules qui le traversent de façon à imposer à ces particules une trajectoire qui les écarte de la veine gazeuse et les acheminé vers un collecteur d'ou elles sont évacués.

On distingue plusieurs dépoussiereurs :

- dépoussiereurs à inertie et principalement à force centrifuge nommés CYCLONE

Principe de fonctionnement :

le gaz est introduit tangentielllement, au sommet du cyclone, dans la zone annulaire constitué par la paroi extérieur et la tuyauterie d'évacuation du gaz. celui-ci prend un mouvement helicoidal vers le bas au cours duquel les particules solides sont centrifugées vers la paroi et évacuée par l'orifice inférieur, le gaz épure à la base du cyclone remonte dans la partie centrale puis est évacué par la cheminée supérieur.



### - 3. Refroidisseur sécheur air humide :

comme le réchauffeur, un refroidisseur secheur se presente sous la forme d'un assemblage de tubes à ailettes parcourus par un fluide à basse température :

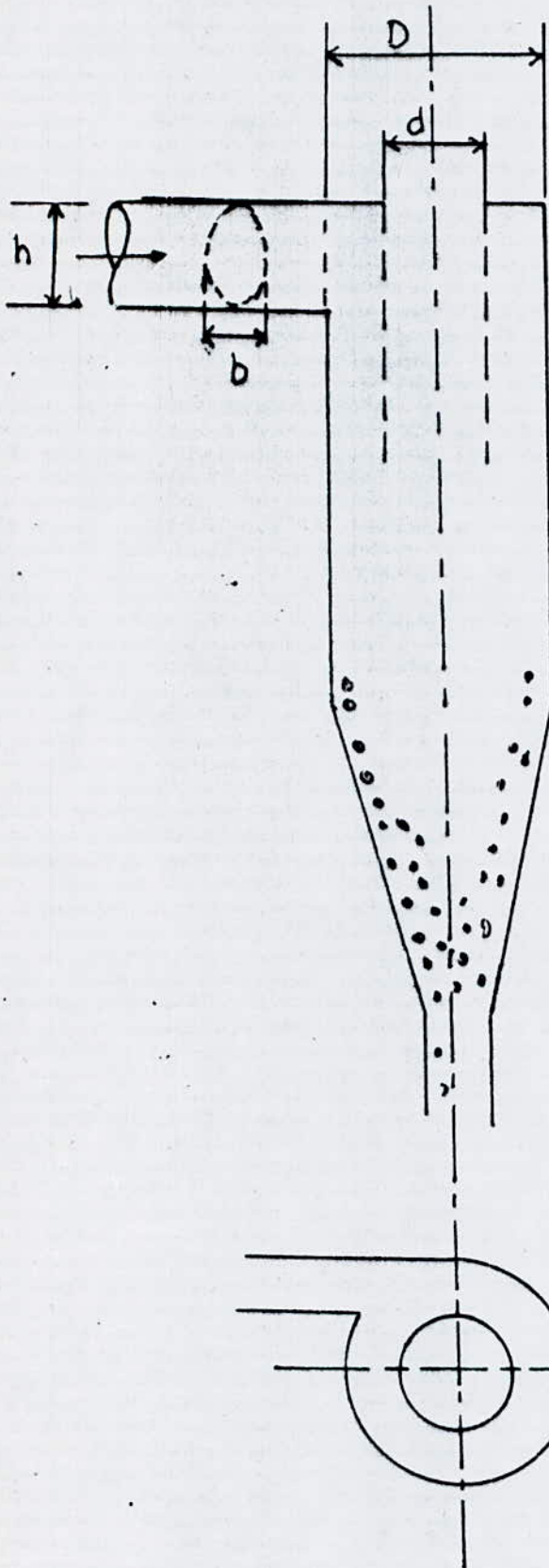
- eau froide
- fluide frigorigene

traversé par le gaz humide à refroidir et à sécher. Le but principale de cet échangeur est soit de refroidir le gaz, soit de le sécher, mais les deux opérations sont concomitantes.

Théoriquement l'utilisation de fluides frigorigene à très basse température permettrait d'abaisser considérablement la teneur en humidité d'un gaz.

Malheureusement, l'abaissement de la température de surface du refroidisseur au-dessous de zéro degrés celcius engendre pour l'eau la formation de givre se collant à sa paroi, et dont l'épaisseur grandit rapidement, obstruant ainsi la surface de passage du gaz. des dispositifs de dégivrage peuvent être mis en œuvre, mais ils compliquent l'exploitation de l'appareil.

Nous supposons donc que la température de surface ne descend pas au dessous de zéro degrés celcius lorsqu'on condense de la vapeur d'eau.



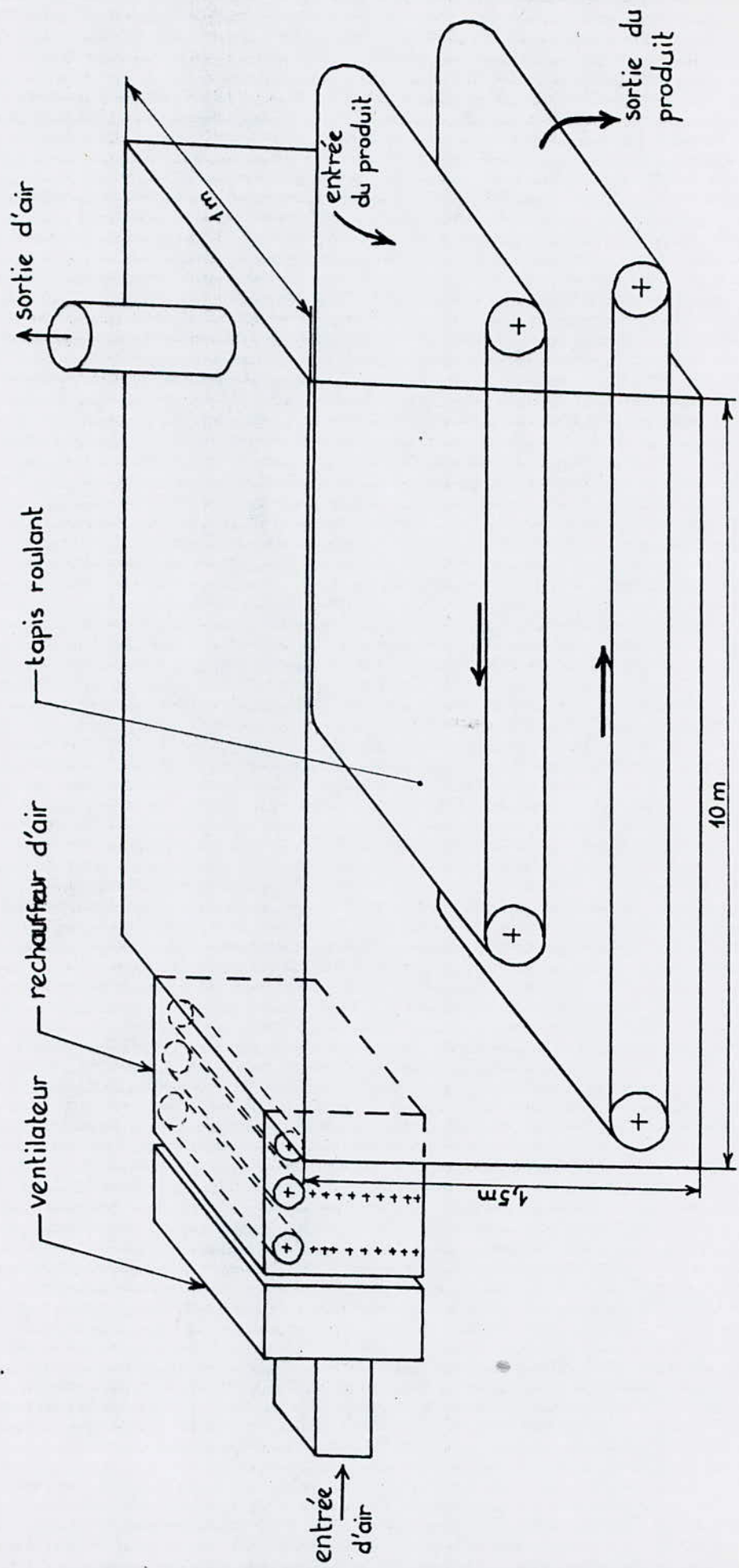
DIMENSIONS  
RECOMMANDÉES

$$h = D/2$$

$$b = D/4$$

$$d = D/2$$

CYCLONE



SECHOIR CONTINU

## CONCLUSION :

On sait que le séchage fait souvent partie du groupe d'opérations dans divers types d'industries.

Il nous a été donc utile dans ce present memoire , d'essayer de mettre en evidence les differents points qui nous ont paru essentiels à étudier lors de la conception d'un sechoir, à savoir :

- la dimension de l'enceinte du sechoir .
- le calcul du réchauffeur du gaz .
- le calcul du ventilateur .

Esperons que ce travail puisse servir à l'avenir comme base à d'autres travaux .

# NOTATION

A :	surface d'échange de chaleur (rechauffeur d'air).....	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>p</sub> :	chaleur spécifique du gaz .....	[ $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ ]
DTLM :	Difference de temperature moyenne logarithmique.....	[ $^\circ\text{C}$ ]
f <sub>0</sub> = x <sub>0</sub> - x <sub>e</sub> ; f <sub>c</sub> = x <sub>c</sub> - x <sub>e</sub> ; f <sub>f</sub> = x <sub>f</sub> - x <sub>e</sub> .....		[ $\frac{\text{kg d'humidite}}{\text{kg de solide sec}}$ ]
d :	épaisseur de la couche solide .....	[m]
G :	debit massique du gaz .....	[ $\frac{\text{kg d'air}}{\text{s}}$ ]
G' :	debit massique du gaz spécifique .....	[ $\frac{\text{kg d'air}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ ]
h :	coefficient d'échange de chaleur par convection gaz - solide .....	[ $\frac{\text{kcal}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ]
h <sub>i</sub> ; h <sub>e</sub> :	coefficient d'échange de chaleur par convection respectivement interne et externe .....	[ $\frac{\text{kcal}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ]
k :	conductivité thermique .....	[ $\frac{\text{kcal}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$ ]
L :	Longueur du séchoir .....	[m]
Q :	debit volumique du gaz .....	[ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ]
q <sub>s</sub> :	debit massique du solide .....	[ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]
S :	section droite du séchoir .....	[m <sup>2</sup> ]
t :	temps de séchage .....	[s]
v <sub>air</sub> :	vitesse du gaz .....	[ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]
x <sub>0</sub> ; x <sub>f</sub> ; x <sub>c</sub> ; x <sub>e</sub> :	respectivement humidité du solide à l'entrée ; finale ; critique ; d'équilibre .....	[ $\frac{\text{kg d'humidite}}{\text{kg de solide sec}}$ ]
Y <sub>0</sub> ; Y <sub>s</sub> :	humidité du gaz à l'entrée et à la sortie .....	[ $\frac{\text{kg de vapeur}}{\text{kg de gaz sec}}$ ]
θ ; θ <sub>s</sub> ; θ <sub>i</sub> :	temperature du gaz respectivement à la sortie du rechauffeur ; à la surface du solide , a l'entrée du rechauffeur .....	[ $^\circ\text{C}$ ]
ρ ; ρ <sub>s</sub> :	masse volumique du gaz et du solide .....	[ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
λ :	Chaleur latente de vaporisation .....	[ $\frac{\text{kcal}}{\text{kg d'humidite}}$ ]

# REFERENCES

-1- ARDITTI G.

Technologie chimique industrielle Tome 3  
édition EYROLLES. . 1972

-2- PERRY - CHILTON

Chemical engineers Handbook  
5<sup>e</sup> édition Mc GRAW HILL

-3- McCABE W.L. - SMITH J.C.

Unit operations of chemical engineering  
3<sup>e</sup> édition Mc GRAW HILL . 1966

-4- WALTER - BADGER

Introduction to chemical engineering  
édition Mc GRAW HILL

-5- Technique de l'ingénieur

Genie chimique j 2710

-6- BIMBENET

le séchage dans les industries agro-alimentaire  
- aspects énergétiques-

-7- NGUYEN TAN

Séchage des pâtes alimentaires Tome 3  
(atelier et chantiers de Bretagne - acb) . 1980

-8- KNEULE F.

le séchage  
édition EYROLLES

- 1959

-9- FOUST A.S. - WENZEL

Principles of unit operations  
édition WILEY J. and SONS

- 1960

-10- BELKESSAM M.

Projet de fin d'étude  
ENP

- 1981

-11- MOHAMED I O.

Projet de fin d'étude  
ENP

- 1983

