

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للهندسة

en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

**THEME**

**Séchage de Silicagel  
dans un  
Séchoir à Couches Fluidisées  
Optimisation du Procédé**

Proposé par :

W. TOMCZAK

Etudié par :

N. LAOUSSADI

Dirigé par :

W. TOMCZAK

PROMOTION Juin 85

BIBLIO

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

**THEME**

**Séchage de Silicagel  
dans un  
Séchoir à Couches Fluidisées  
Optimisation du Procédé**

Proposé par :  
W. TOMCZAK

Etudié par :  
N. LAOUSSADI

Dirigé par :  
W. TOMCZAK

PROMOTION Juin 85

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فِي كِتَابِ اللَّهِ وَالْأَنْبِيَاءِ وَالرُّسُلِ وَالْأَقْبَابِ  
وَالْأَنْبِيَاءِ وَالرُّسُلِ وَالْأَقْبَابِ  
وَالْأَنْبِيَاءِ وَالرُّسُلِ وَالْأَقْبَابِ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

الأقسام - ١٦٢

## Dédicaces



je dédie ce modeste travail à :

- mes parents
- tous ceux qui témoignent qu'il n'existe de dieu qu'ALLAH et que Mohamed est son envoyé et son prophète

N. LAOUSSADI

## Remerciements



Je tiens à adresser mes vifs remerciements à mon promoteur M<sup>r</sup> W. TOMCZAK d'avoir proposé et dirigé ce travail et l'aide qu'il n'a cessé de m'apporter.

Que tous les professeurs qui ont contribué à ma formation trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de cette étude trouvent ici mes sincères remerciements.

N. LAOUSSADI

# TABLE DES MATIERES



	Page
Introduction	1
Objet et but du projet	2
Chap I Notions de base de technique de séchage	3
1_ <i>Théorie de séchage</i>	3
2_ <i>Transferts de chaleur et de masse</i>	6
Chap II Etude du séchage en couches fluidisées	10
1_ <i>Paramètres caractérisant la fluidisation</i>	10
2_ <i>Caractéristiques générales aérodynamique des séchoirs à couches fluidisées</i>	10
3_ <i>Transferts de chaleur et de masse dans une couche fluidisées</i>	15
Chap III Modèle mathématique d'optimisation	
1_ <i>Notions de modèle</i>	18
2_ <i>Principe de recherche d'un maximum discret</i>	18
Chap IV L'analyse économique et exergique	26
Chap V OPTimisation du séchoir à couches fluidisées	29
1_ <i>Equilibre thermodynamique du Silicagel et l'air humide</i>	29
2_ <i>Fonction de but d'optimisation</i>	30

3_ <i>Billans d'énergie et de masse.</i>	32
4_ <i>calcul des caractéristiques principales de l'air humide</i>	34
Chap VI <i>Modèle logique de résolution</i>	38
1_ <i>classification des paramètres.</i>	39
2_ <i>structures des organigrammes.</i>	41
Chap VII <i>Résolution et interprétations</i>	46
1_ <i>Données de base</i>	46
2_ <i>Résultats et discussions.</i>	47
Conclusion	56
Annexes	
Bibliographie	



## Légende des symboles



- $Q_x$ : Flux de quantité de chaleur suivant l'axe  $\vec{x}$  (Watt)
- $W_x$ : Flux de quantité de masse diffusante suivant  $\vec{x}$  (Kg/s)
- $\alpha$ : conductibilité thermique (W/m°C)
- $D_c$ : conductibilité d'une masse diffusante (m<sup>2</sup>/s)
- $\epsilon$ : porosité d'une couche de grains
- $U_{mf}$ : Vitesse minimale de fluidisation.
- $U_t$ : Vitesse maximale de fluidisation.
- $U_0$ : Vitesse de fluidisation.
- $\Delta P$ : chute de pression
- $H$ : la hauteur libre "Free Board".
- $Re$ : nombre sans dimension Reynolds.
- $Nu$ : nombre sans dimension Nusselt
- $Sh$ : nombre sans dimension Sherwood.
- $H$ : Hamiltonien
- $Z^{(n-1)}$ : equation conjuguée
- $F$ : Fonction de but d'optimisation.
- $b_i$ : l'exergie spécifique de l'air (KJ/Kg).
- $\lambda$ : Variable économique.
- $e$ : prix unitaire d'exergie de l'air
- $G$ : débit masse d'air sec
- $S$ : débit masse de silicagel
- $T^0$ : température ambiante à l'extérieur du séchoir

- $W_s^0$  : l'humidité absolue du silicagel à l'entrée du séchoir  
 $H_s^0$  : l'enthalpie du silicagel à l'entrée du séchoir.  
 $W_s^{(N)}$  : l'humidité absolue du silicagel à la sortie du séchoir.  
 $H_s^{(N)}$  : l'enthalpie du silicagel à la sortie du séchoir.  
 $T_s^{(N)}$  : la température du silicagel à la sortie du séchoir.  
 $W_s^{(n)}$  : l'humidité absolue du produit à la sortie de l'étage "n".  
 $H_s^{(n)}$  : l'enthalpie du produit à la sortie de l'étage "n".  
 $W_s^{(n-1)}$  : l'humidité absolue du produit à l'entrée de l'étage "n".  
 $H_s^{(n-1)}$  : l'enthalpie du produit à l'entrée de l'étage "n".  
 $h_s^{(n)}$  : l'enthalpie de l'air à la sortie de l'étage "n".  
 $x_s^{(n)}$  : l'humidité absolue de l'air à la sortie de l'étage "n".  
 $h_g^{(n)}$  : l'enthalpie de l'air à l'entrée de l'étage "n".  
 $x_g^{(n)}$  : l'humidité absolue de l'air à l'entrée de l'étage "n".  
 $D_n$  : rapport des débits masse à l'entrée de l'étage "n".

Nom : LAOUSSADI

Prénom : Nourredine

Promoteur : W. TOMCZAK

**الموضوع :** تجفيف السيليكا جال في مجفف ذو طبقات مميعة .  
ايجاد الطريقة المثلى .

**مباخص :** بواسطة الآلة الحسابة الالكترونية ، أُجري تحليل لايجاد  
طريقة التجفيف المثلى ، وذلك بعد عرض النموذج الرياضي الذي  
يرتكز على ايجاد الذروة الرّصينة وتطبيقه على مجففنا ،  
وبذلك يمكن حساب مشروع تجهيز مصنع لتجفيف السيليكا جال في طبقات مميعة .

**Titre :** Séchage de Silicagel dans un séchoir à couches  
fluidisées : Optimisation du procédé .

**Resumé :** Une analyse d'optimisation a été faite à l'aide des  
calculateurs informatiques , après avoir exposé la méthodologie  
mathématique qui repose sur la recherche d'un maximum discret  
et son application à notre séchoir , qui par la suite permettra de calculer  
un projet d'installation industrielle du séchage de Silicagel en  
couches fluidisées .

**Subject :** Silicagel drying in fluidized beds dryer .  
Optimization of process .

**Abstract :** An analytical design of optimization has been  
carried with computers , after having showed the mathéma-  
tical method which rely on the research of a discrete  
maximum and its application in our dryer , and than  
it let us to project a scheme of an industrial plant  
of drying Silicagel in fluidized beds .

## INTRODUCTION

L'opération de séchage a pour but d'éliminer partiellement ou totalement les produits volatils d'un corps humide par évaporation de ces produits, dans notre cas, le produit volatil est l'eau. Selon les caractéristiques exigées du produit à traiter, nous utilisons différents types de sècheurs. Le choix d'une méthode de séchage doit tenir compte de la nature de la substance, de son état et éventuellement de sa préparation.

Parmi ces sècheurs nous distinguons :

- Chambres de séchage.
- Sècheurs-tunnel.
- Convoyeurs de séchage.
- Tours de séchage.
- Sècheurs rotatifs.
- Sècheurs à fluidisation.
- Sècheurs pneumatiques.
- Sècheurs par pulvérisations, etc...

Notre choix s'est porté sur le séchoir en couches fluidisées qui présente plusieurs avantages par rapport à d'autres qui sont :

- Mélange et circulation intenses du solide

au sein du lit .

- Très bonnes isothermicité' .

- Grands coefficients de transferts de chaleur et de matière entre les grains et le fluide .

## OBJET ET BUT DU PROJET

Ce n'est que dans les dernières décennies, que nous avons réuni et concrétisé les principes scientifiques qui sont à la base du phénomène complexe du séchage par fluidisation .

Chaque phénomène de séchage est caractérisé simultanément par un transfert de chaleur et un transfert de masse .

L'objet de notre travail est le procédé d'optimisation à l'aide des calculateurs informatiques du séchage d'un produit appelé "silicagel" dans un séchoir à couches fluidisées .

Une telle étude permettra de calculer un projet d'installation industrielle de séchage du silicagel en lit fluidisé .

# Chap I NOTIONS DE BASES DE TECHNIQUE DE SECHAGE

## 1. Théorie de séchage

En plaçant un corps humide dans un courant d'air chauffé, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tel que:

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de la température
- Un transfert d'eau s'effectue dans le sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour les produits volatils enlevés.

### 1.1. Différentes Périodes de séchage

En terme générale, l'opération de séchage est caractérisée par trois périodes différentes, voir fig 1 et fig 2.

#### 1.1.1. Mise en température du produit

Le produit contenant de l'eau libre sur sa surface placé dans un courant d'air chauffé, se stabilise à une température  $t_e$ , égale à la température de saturation adiabatique.

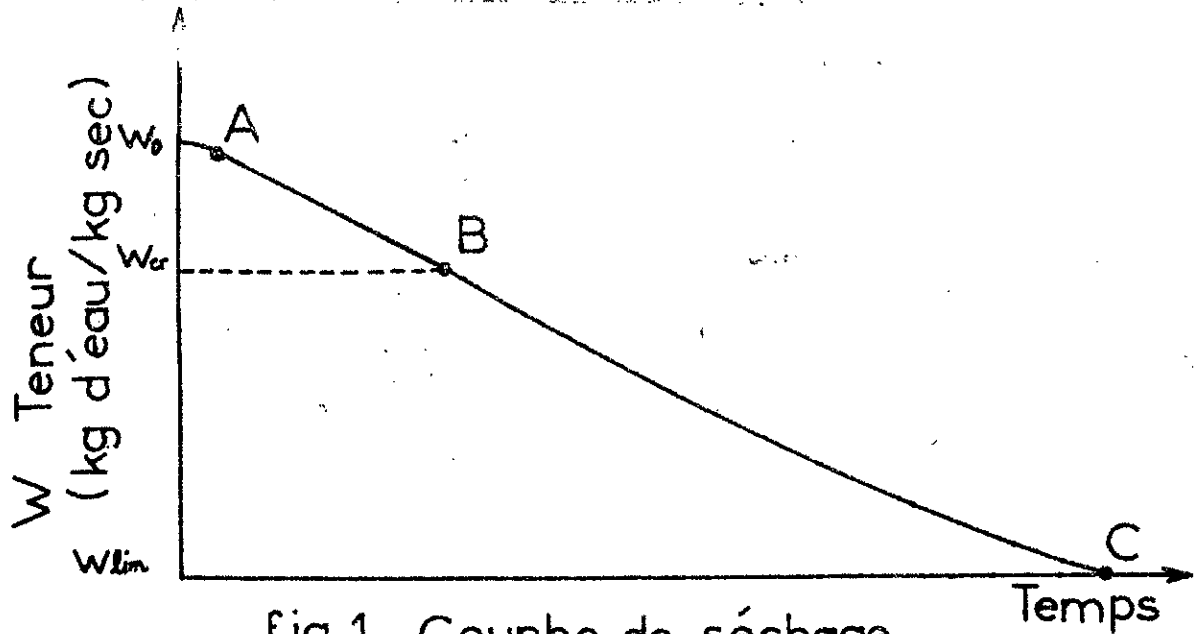


fig 1 Courbe de séchage

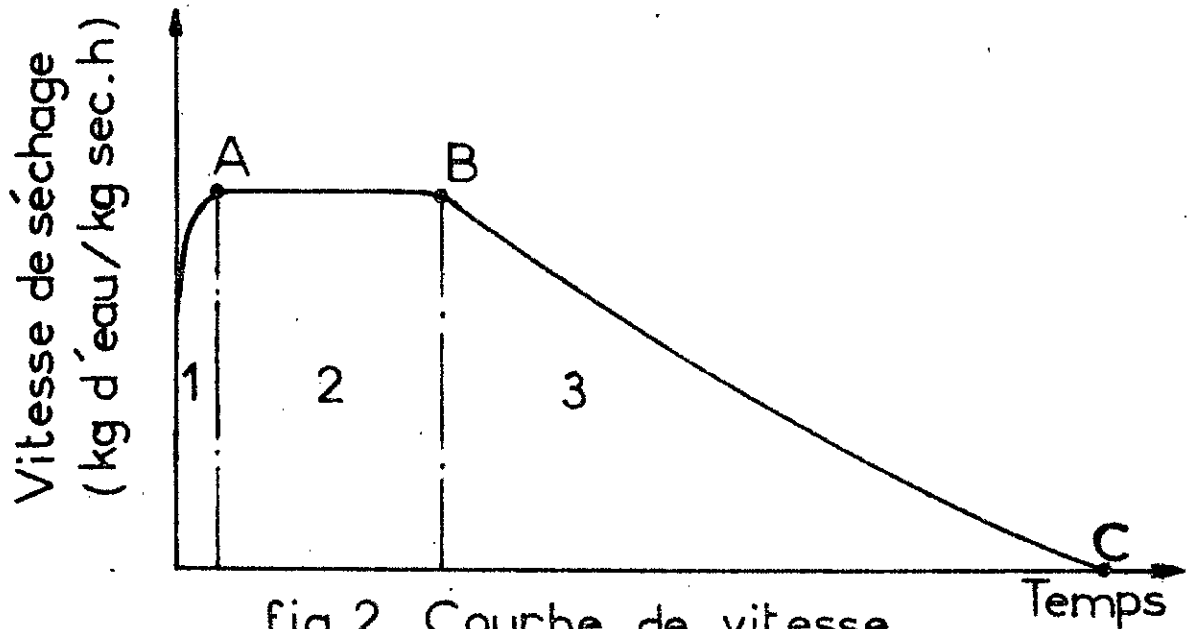


fig 2 Courbe de vitesse de séchage

- 1 : mise en température du produit
- 2 : période à allure constante
- 3 : période de ralentissement

## 1.1.2. Période à allure constante

Au cours de cette période, l'humidité gagne si rapidement la surface que la pellicule d'eau qui s'y trouve, se renouvelle vite ( nous supposons que la surface est saturée en humidité à une température constante). Le séchage est alors analogue à l'évaporation d'une surface liquide (évaporation superficielle).

## 1.1.3. Période de ralentissement

Lorsque le produit atteint, au cours du séchage à allure constante, une teneur en produit volatil suffisamment basse, nous observons un ralentissement de l'allure; le point est caractérisé par une teneur critique " $W_{cr}$ ".

A cette teneur critique, la surface n'est plus mouillée et le séchage dépend du mouvement de l'eau dans le solide pour atteindre la surface de vaporisation.

## 1.2. Evolution de la température dans le produit

La température du produit se stabilise à une valeur " $t_e$ "; égale à la température de saturation adiabatique. La température de la surface quitte la valeur  $t_e$  et s'accroît, ce qui correspond au passage de la période à allure constante à la période de ralentissement.



L'intérieur du produit s'échauffe par conduction, la température du produit tend vers celle de l'air, le séchage s'arrête lorsque la température du produit égale la température de l'air (voir fig 3).

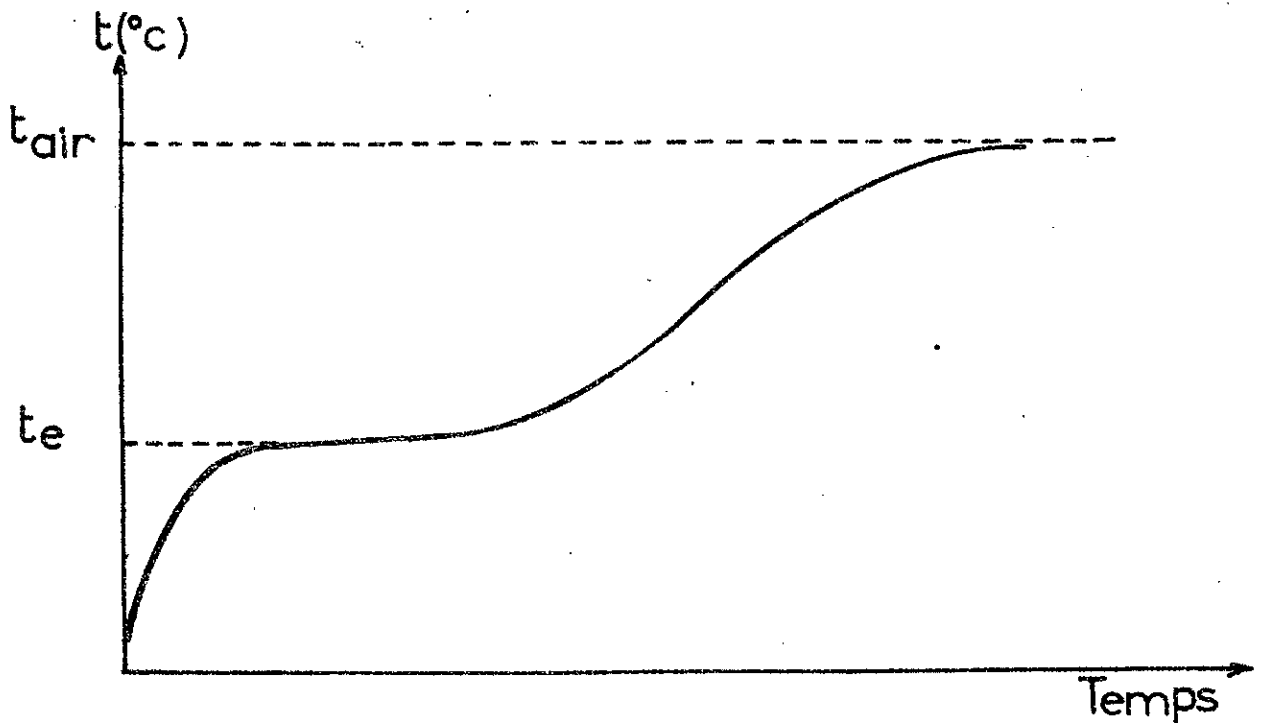


fig 3 Evolution de la température du solide au cours du temps

## 2. Transferts de chaleur et de masse

les transferts de chaleur et de masse s'effectuent de deux manières :

- A l'intérieur du solide par conduction.
- Dans la couche limite par convection.

fig 4 représente les différents échanges entre un corps humide et l'air ambiant.

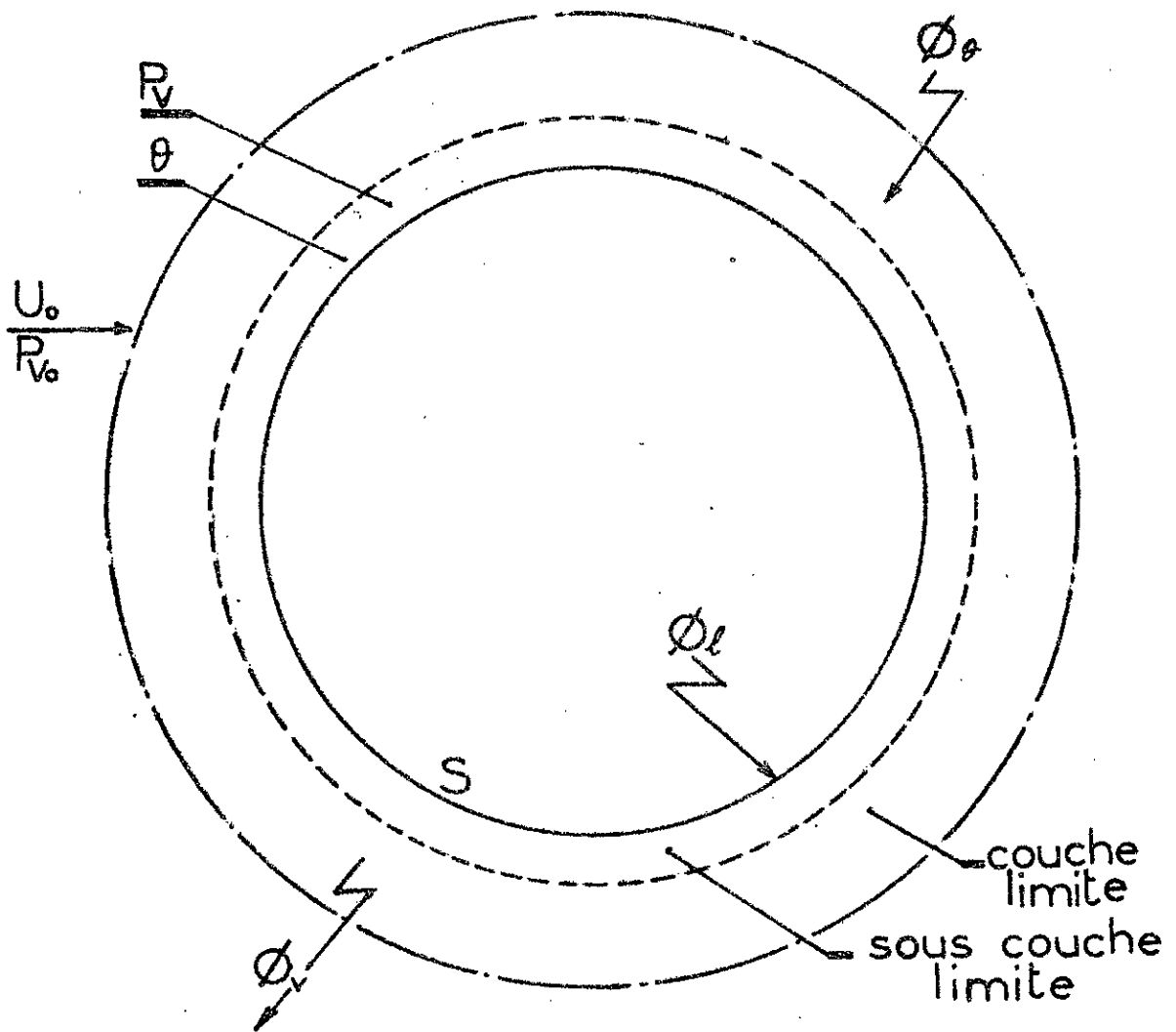


fig 4 - Echanges entre un corps humide et l'air ambiant

$\Phi_l =$  flux de liquide

$\Phi_v =$  flux de vapeur

$\Phi_\theta =$  flux de chaleur

$S =$  surface du corps

## 2.1. Transferts de chaleur et de masse dans le produit

La conduction de la chaleur dans le produit est gouvernée par la loi de FOURIER où intervient le gradient de température.

$$Q_x = - \alpha A \frac{\partial \theta}{\partial x} \text{-----} (1)$$

$Q_x$  = flux de quantité de chaleur suivant l'axe  $x$  (Watt).

$A$  = surface d'échange perpendiculaire à l'axe des  $x$  ( $m^2$ ).

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$  = gradient de température dans le produit ( $^{\circ}C/m$ ).

$\alpha$  = conductibilité thermique d'un milieu ( $W/m^{\circ}C$ )

De même, lorsqu'il existe un gradient de concentration dans une substance, il y a un transfert de matière obéissant à la loi de Fick :

$$W_x = - A D_c \frac{\partial C}{\partial x} \text{-----} (2)$$

$W_x$  = flux de quantité de masse diffusante suivant  $x$  ( $kg/s$ )

$\frac{\partial C}{\partial x}$  = gradient de concentration de matière suivant  $x$  ( $\frac{kg}{m^3}/m$ )

$D_c$  = conductibilité d'une masse diffusante dans un milieu relative aux concentrations ou diffusivité de matière ( $m^2/s$ )

## 2.2. Transferts de chaleur et de masse dans l'air entourant le produit

Dans la pratique industrielle, l'air est le plus souvent en régime turbulent dans le séchoir. Cependant au voisinage immédiat du produit il s'établit une couche limite dont l'écoulement est en régime laminaire. Alors l'air, au contact du produit est

considère comme immobile.

Il s'établit donc un équilibre de température et d'humidité entre l'air et la surface du produit.

$$t^* = t_s \quad \text{et} \quad \varphi^* = \alpha W_s$$

$t_s, t^*$  = les températures respectives du solide et de l'air à l'équilibre

$\alpha W_s, \varphi^*$  : les humidités relatives respectives du solide et de l'air

à l'état d'équilibre.

Nous admettons que toute la résistance aux transferts se situe dans la couche limite (voir fig 4), et les équations de Fourier et de Fick s'appliquent malgré le mouvement de l'air.

$$Q = A \cdot \lambda \cdot (t - t^*) = A \cdot \lambda \cdot (t - t_s) \text{ ----- (3)}$$

$$W = A \cdot \beta_p \cdot (P^* - P) = A \cdot \beta_p \cdot (P_s - P) \text{ ----- (4)}$$

$P_s$  : pression de vapeur d'eau saturante à la surface du produit en (Pa).

$P$  : pression de vapeur d'eau en (Pa).

$P^*$  : pression de vapeur d'eau d'un air en équilibre avec un produit en (Pa)

$\lambda$  : coefficient de transfert de chaleur entre les deux phases (air - produit) en ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

$\beta_p$  : coefficient de transfert de masse entre les deux phases relatif aux pressions partielles ( $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$ ).

## Chap II ETUDE DU SECHAGE EN COUCHES FLUIDISEES

### 1\_ Parametres caracterisant la fluidisation.

Le grain solide : est caractérisé par

- Sa masse volumique ( $\rho_s$ ).
- Son diamètre propre ( $d_p$ ) qu'on détermine expérimentalement.
- Sa forme ou facteur de sphéricité ( $\psi$ ).

Propriétés d'un ensemble de grains

- Sa masse volumique ( $\rho_{\text{moy}}$ ).
- Diamètre moyen ( $d_{\text{moy}}$ ) d'une distribution de grains défini par granulométrie.
- Facteur de forme ( $\psi_{\text{moy}}$ ).

Porosité d'une couche de grains ( $\epsilon$ )

On définit la porosité ( $\epsilon$ ) par :

$$\epsilon = \frac{\text{Volume total} - \text{volume des grains}}{\text{Volume total}} = \frac{\text{Volume du vide}}{\text{Volume total}}$$

avec  $\epsilon_m$  = porosité minimale de la couche à l'état préfluidisé ; donc  $\epsilon$  dépend de l'état de la couche.

### 2\_ Caractéristiques générales aérodynamique des séchoirs à couches fluidisées

Dans les séchoirs de ce type, l'état de fluidisation est donné par l'action d'un flux d'air avec une vitesse " $u$ " à travers la couche de grains de diamètre " $d$ ", et de porosité " $\epsilon$ ".

Reynolds, Nusselt et Sherwood, pour un état de fluidisation sont définis pour le diamètre moyen des grains.

## 2.1 - Vitesses minimale et maximale de fluidisation

Lors de la fluidisation en phase gazeuse nous observons divers aspects représentés sur la figure 5.

L'opération de fluidisation est caractérisée par :

### Vitesse minimale ( $U_{mf}$ )

Qui correspond à l'état préfluidisé c'est à dire, susceptible de maintenir les particules solides en suspension, puis la couche fixe se transforme en couche fluidisée. D'après Kunii et Levenspiel [4] pour  $Re < 20$

$$U_{mf} = \frac{d^2}{150} \cdot \frac{(\rho_m - \rho) g}{\eta} \sqrt{\frac{E_{mf}^2}{1 - E_{mf}}} \quad \text{-----} (5)$$

### Vitesse maximale ( $U_t$ )

Quand la vitesse du fluide gazeux augmente ( $v > v_{lim}$ ) les particules sont entraînées avec le gaz, c'est le phénomène de transport pneumatique.

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_m - \rho) g d}{\rho} \frac{1}{C_D}} \quad \text{-----} (6)$$

$C_D$  : facteur de traînée est fonction de Reynolds.

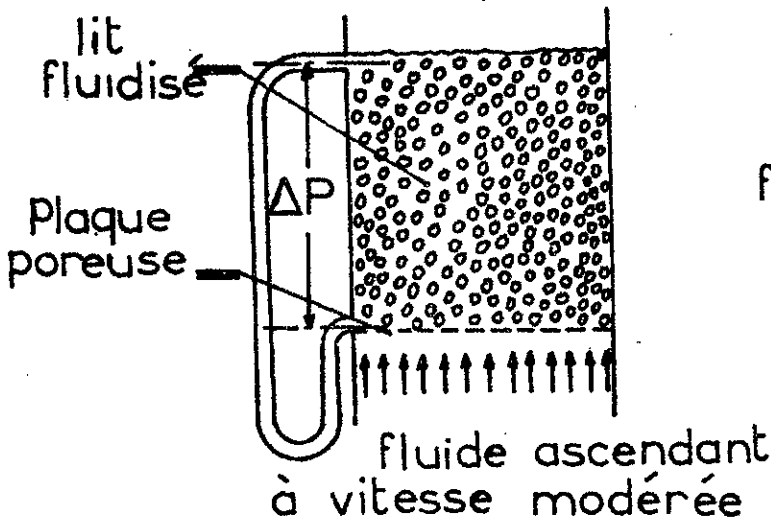
$$C_D = a Re^{-n} \quad \text{-----} (7)$$

ou  $a$  et  $n$  sont des constantes qui dépendent de  $Re$  tels que :

$a$	$n$	Domaine de Validité	Régime d'écoulement
24	1	$Re < 1$	Stokes
18,5	0,6	$1 < Re < 10^3$	Allen
0,44	0	$Re > 10^3$	Newton

## 2.2- Chute de pression ( $\Delta P$ )

A la traversée de la couche solide, le fluide subit une perte de charge  $\Delta P$  et celle-ci reste constante au cours de la fluidisation.



$$\Delta P = \frac{\text{Poids apparent de la couche}}{\text{section de colonne}}$$

Cette perte de charge peut être exprimée par l'équation d'Ergun [5].

$$\frac{\Delta P}{Z} = 150 \eta \frac{(1-E)^2 U}{d^2 E^3} + 1,75 \rho_m \frac{(1-E) U^2}{d E^3} \quad \text{--- (8)}$$

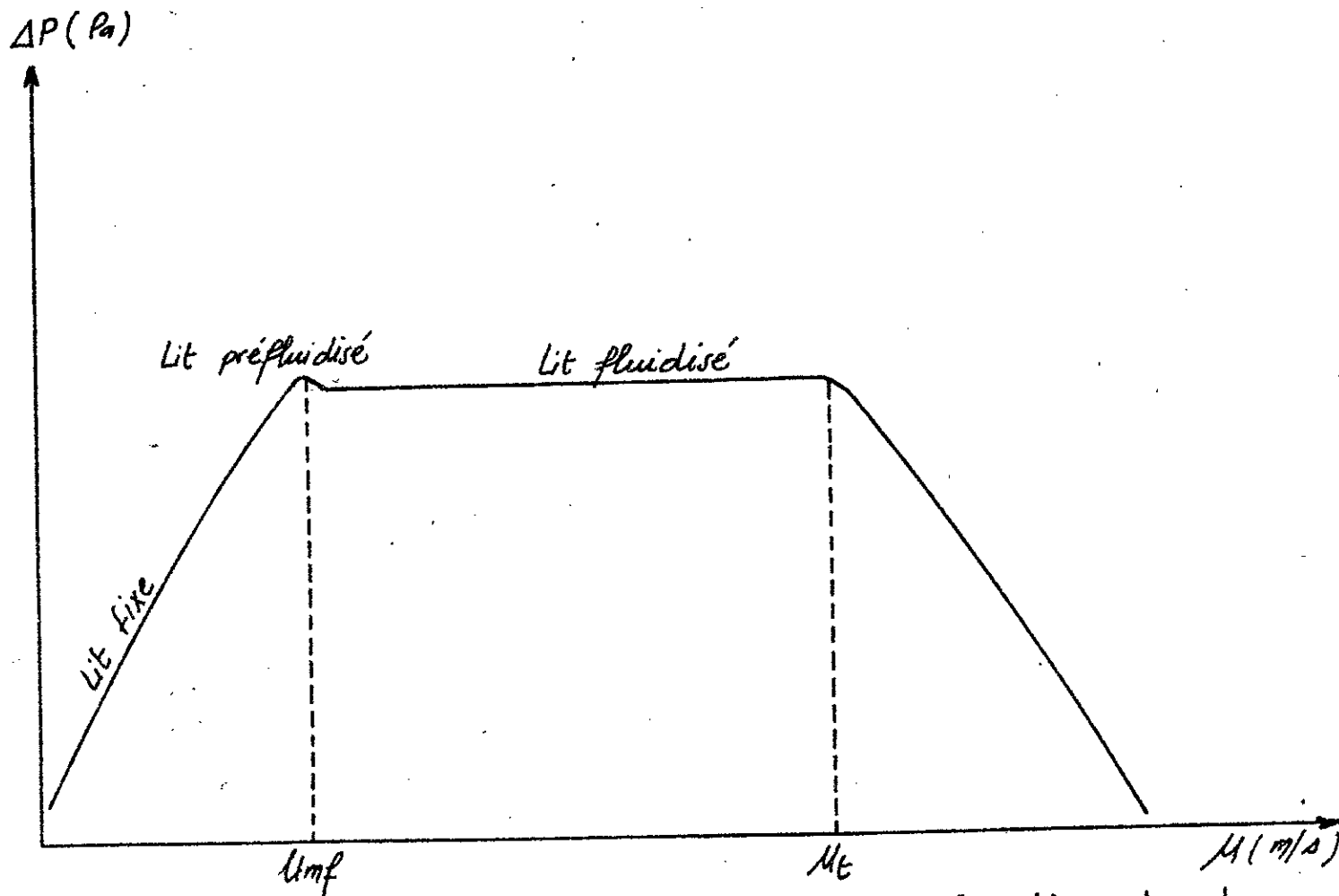


fig 6 Chute de pression en fonction de la vitesse du courant gazeux



## 2.3\_ Choix de la vitesse de fluidisation ( $U_0$ )

Le meilleur moyen de déterminer la vitesse opérationnelle  $U_0$  est l'expérience. Cependant différentes méthodes ont été données pour l'estimation de celle-ci telle que :

$$2U_{mf} < U_0 < 5U_{mf} \quad \text{-----} (9)$$

$U_0$  peut être aussi déterminée en fonction de la vitesse maximale de fluidisation d'après W.C LAPPLE [6].

$$U_0 = \frac{U_t}{10} \quad \text{si} \quad d < 1,651 \text{ mm} \quad \text{-----} (10)$$

$$U_0 = \frac{U_t}{5} \quad \text{si} \quad d > 1,651 \text{ mm}$$

$d$  : diamètre des particules.

## 2.4\_ Estimation de la hauteur libre " Free Board H "

Dans tout projet d'installation, nous devons prévoir une hauteur de désengagement solide - fluide appelée "hauteur libre H".

Cas d'un appareil à section constante :

$$H = H_0 \cdot \frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon} \quad \text{-----} (11)$$

$H_0$  = hauteur statique.

$\epsilon_0$  = porosité statique.

$\epsilon$  = porosité de la couche.

### 3 - Transferts de chaleur et de masse dans une couche fluidisée

#### 3.1 - Transfert de chaleur

L'échange de chaleur entre la couche solide et le gaz est gouverné par convection thermique, transfert résultant de deux mécanismes principaux simultanés : conduction (selon la loi de Fourier) et transport par le mouvement du fluide.

Le processus de convection est défini par l'équation de Newton.

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \Delta t_{sr} \quad (\text{W}) \quad \text{-----} \quad (12)$$

$\lambda$  : coefficient de transfert par convection ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

$A$  : surface latérale de toutes les grains ( $\text{m}^2$ ).

$\Delta t_{sr}$  : différence de la température moyenne logarithmique.

$$\Delta t_{sr} = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_m}{t_2 - t_m}} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{-----} \quad (13)$$

avec

$t_m$  : température de la couche fluidisée

$t_1, t_2$  : températures respectives d'entrée et de sortie du gaz.

Pour l'air de Prandtl ( $Pr = 0,7$ ), Kunii et Levenspiel [4] ont donné une corrélation générale :

$$\text{Nu} = 0,03 \cdot \text{Re}^{1,3} \quad \text{pour} \quad \begin{matrix} \text{Re} = 0,1 + 80 \\ \text{Pr} = 0,7 \end{matrix} \quad \text{-----} \quad (14)$$

Ils ont trouvé expérimentalement que le coefficient de transfert de chaleur par convection dans une couche fluidisée

varie entre  $\lambda = 1 \div 30$  ( $W/m^2 \cdot c$ ).

### 3.2\_ Transfert de masse

Les plus connus sont des résultats expérimentaux. Il est difficile de donner une corrélation universelle; d'après Richardson [4].

$$\begin{aligned} Sh &= 0,374 \cdot Re^{4,18} && \text{pour } 0,1 < Re < 15 \\ Sh &= 2,01 \cdot Re^{0,5} && \text{pour } 15 < Re < 250 \end{aligned} \quad \text{-----(15)}$$

Cette corrélation donne en pratique de bons résultats pour des couches moins épaisses et pour  $Re > 100$ .



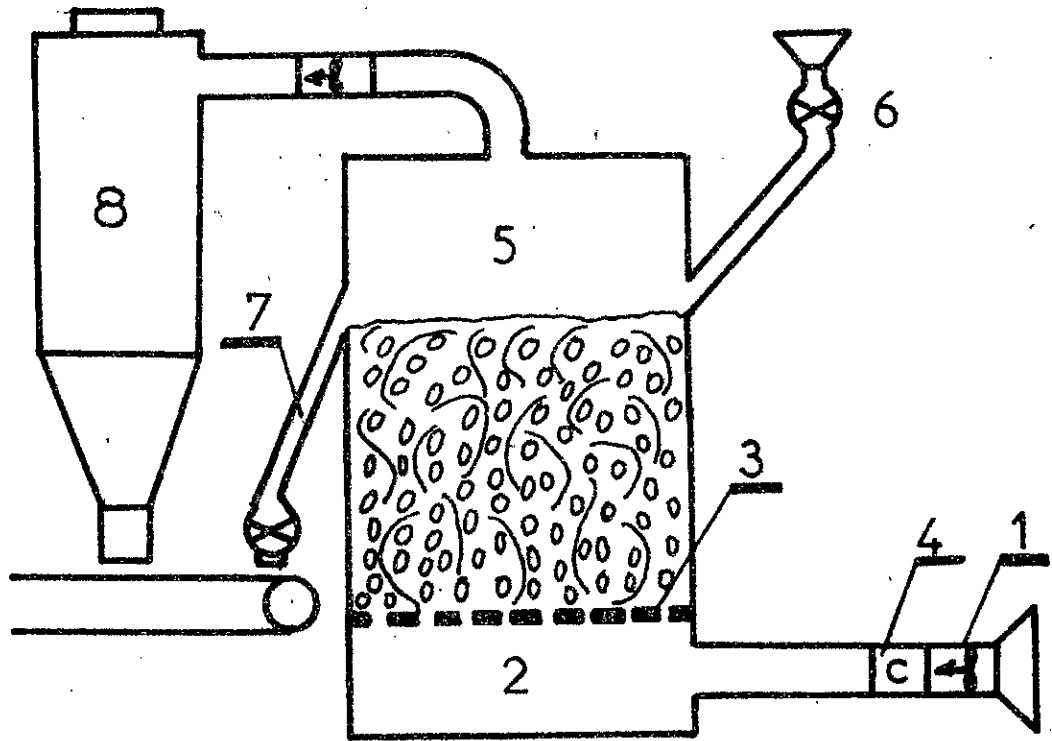


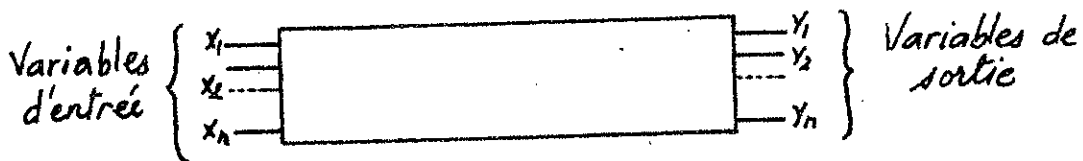
Fig 7 Séchoir à lit fluidisé

- 1\_ Ventilateur .
- 2\_ Chambre de répartition .
- 3\_ plaque poreuse de diffusion .
- 4\_ Réchauffeur e .
- 5\_ Enceinte de séchage .
- 6\_ une écluse rotative .
- 7\_ Conduite d'évacuation du produit séché' .
- 8\_ cyclone

# Chap III MODELE MATHÉMATIQUE D'OPTIMISATION

## 1. Notion de modèle

Un système physique, chimique, biologique, économique ..... peut se concevoir comme étant une relation entre des causes (ou variables d'entrée) et des conséquences (variables de sortie).



Pour se faire il est intéressant de synthétiser un modèle dont le comportement soit analogue à celui du système étudié.

## 2. Principe de recherche d'un maximum discret

### 2.1. Méthode continue

Soit le système mathématique comme l'indique le schéma de la fig 8

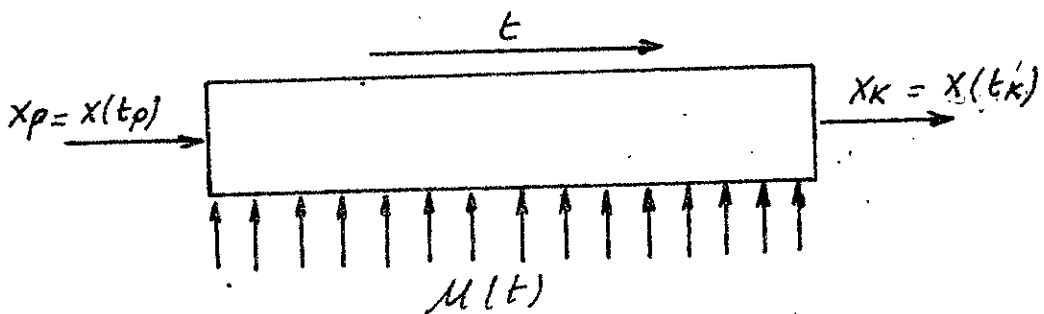


fig 8 Modèle continu

$x(t)$  : Vecteur-fonction de ( $n$ ) dimension, qui caractérise l'état du processus.

$t_p$  : Valeur initiale de ( $t$ ).

$t_k$  : Valeur finale de ( $t$ ).

$x_p = x(t_p)$  : Valeur initiale du vecteur-fonction ( $x$ ).

$x_k = x(t_k)$  : Valeur finale du vecteur-fonction  $x$ .

$u(t)$  : Vecteur-fonction de ( $r$ ) dimensions, qui caractérise les décisions.

Equations du processus continu sont :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, u) \\ x(t_p) = x_p \end{cases} \text{----- (16)}$$

donc le but de cette méthode d'optimisation est de chercher un vecteur-fonction  $u(t)$  continu c'est à dire qui prend des valeurs infiniment proches l'une de l'autre dans des intervalles de " $t$ " avec la condition suivante :

$$\Psi_j[u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)] \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, m \text{----- (17)}$$

Et qui donne un minimum ou maximum de la fonction des facteurs de qualité définie par :

$$F = \sum_{i=1}^n C_i x_i(t_k) \text{----- (18)}$$

$C_i =$  des constantes

$F =$  fonction de qualité, elle est linéaire en fonction des paramètres de l'état final.

## • Résolution du problème

On introduit un vecteur-fonction  $Z(t)$  de  $(s)$  dimensions et un Hamiltonien  $\mathcal{H}$  avec :

- La définition mathématique du Hamiltonien

$$\mathcal{H}[x(t), u(t), Z(t)] = \sum_{i=1}^s [Z_i f_i(x(t), u(t))] \text{ ----- (19)}$$

- L'équation conjuguée

$$\frac{dZ_i}{dt} = - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x_i} = - \sum_{i=1}^s (Z_i \cdot \frac{\partial f_i}{\partial x_i}) \text{ ----- (20)}$$

- Les conditions finales pour les variables conjuguées

$$Z_i(t_K) = C_i \text{ ----- (21)}$$

les décisions  $\hat{u}(t)$  pour lesquelles la fonction de qualité a un extrémum, provoqueront également un extrémum du Hamiltonien  $\mathcal{H}$  p.a.d :

pour  $t_p \leq t \leq t_K$  on a :

$$\mathcal{H}[x(t), u(t), Z(t)] = \min \mathcal{H}[x(t), \hat{u}(t), Z(t)] \text{ ----- (22)}$$

on peut dire pour un vecteur-fonction  $u(t)$  continu dans les intervalles de "t", la valeur optimale de  $\mathcal{H}$  est constante pour chaque "t" dans les intervalles la condition nécessaire pour l'extrémum de  $F$  est défini par le système d'équations :

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial u_l} = 0 \quad l = 1, 2, \dots, r \text{ ----- (23)}$$

## 22 - Méthode discrète

On utilise la méthode discrète en considérant que le système ne peut prendre que des valeurs discernables l'une de l'autre (voir fig 9)

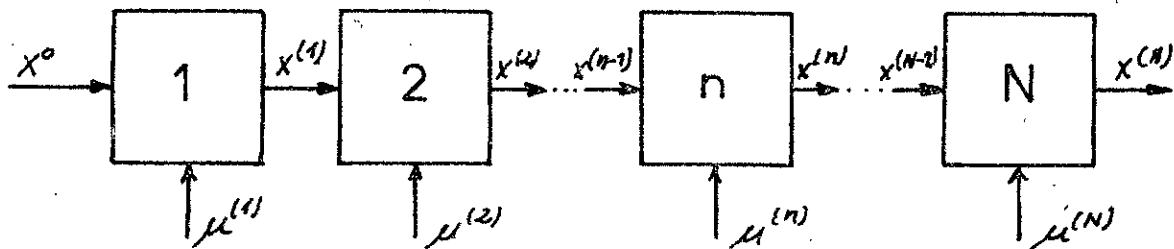


fig 9 Modèle discret

$x^{(n)}$  ( $0 \leq n \leq N$ ) : Vecteur-fonction de ( $N$ ) dimensions, qui caractérise l'état du processus au début de chaque étage.

$\mu^{(n)}$  ( $0 \leq n \leq N$ ) : Vecteur-fonction de ( $r$ ) dimensions qui caractérise les décisions à chaque étage.

$x^{(n-1)}$  : L'état du processus au début de l'étage "n".

$x^{(n)}$  : L'état à la fin du "n" étage.

La transformation d'état dans un étage "n" est donnée par l'équation vectorielle :

$$x^{(n)} = T^{(n)}(x^{(n-1)}, \mu^{(n)}) \text{ ----- (24)}$$

$n = 1, 2, \dots, N$

Le but de cette méthode d'optimisation est de trouver un vecteur-fonction  $\mu^{(n)}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) discret avec les conditions suivantes :



$$\Psi_j^{(n)}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r) \leq 0 \quad \text{-----} (25)$$

$n=1, 2, \dots, N$  et  $j=1, 2, \dots, m$

Et qui donne un extrémum pour la fonction de qualité

$$F = \sum_{i=1}^A C_i X_i^{(N)} \quad \text{-----} (26)$$

la fonction de qualité  $F$  est fonction des paramètres de l'état final.

On introduit un vecteur fonction  $Z^{(n)}$  de  $(s)$  dimensions et un Hamiltonien  $\mathcal{H}^{(n)}$  avec :

- La définition du Hamiltonien

$$\mathcal{H}^{(n)} = \sum_{i=1}^A Z_i^{(n)} T_i^n(X^{(n-1)}, \mu^{(n)}) \quad \text{-----} (27)$$

- L'équation conjuguée

$$Z_i^{(n-1)} = - \frac{\partial \mathcal{H}^{(n)}}{\partial X_i^{(n-1)}} \quad \text{-----} (28)$$

- Les conditions finales

$$Z_i^{(N)} = C_i \quad \text{avec } i=1, 2, \dots, s \quad \text{-----} (29)$$

Dans le cas où quelques composantes du vecteur d'état à la fin du processus sont bien définies (par exemple les composantes  $X_a^{(N)}$  et  $X_b^{(N)}$ ) alors la fonction de qualité a la forme suivante :

$$F = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq a \text{ et } i \neq b}}^A C_i X_i^{(N)} \quad \text{-----} (30)$$

les conditions d'optimisation par la méthode discrète ne sont pas suffisantes que pour la méthode continue.

la condition nécessaire pour l'extremum local de la fonction de qualité est :

$$\frac{\partial \mathcal{H}^{(n)}}{\partial \mu^{(n)}} = 0 \quad \text{-----} (31)$$

c'est pour un optimum, Hamiltonien possède en générale un point stationnaire (maximum, minimum ou point d'inflexion).

### 23. Méthode discrète avec décision linéaire

Dans cet algorithme du principe de recherche de maximum discret, Hamiltonien  $\mathcal{H}$  a une valeur constante pour tout le chemin optimal (comme pour la méthode continue). Il est utilisé pour les processus où il existe la possibilité de distinguer une décision avec la structure linéaire. Nous désignons cette décision par la variable " $\theta$ ".

Dans ce cas la fonction de qualité appelée aussi fonction de but a la forme suivante :

$$F = \sum_{n=1}^N f_0^{(n)} (x^{(n)}, \mu^{(n)}) \theta_n \quad \text{-----} (32)$$

Or l'équation d'état est de la forme :

$$\frac{x_i^{(n)} - x_i^{(n-1)}}{\theta_n} = f_i^{(n)} (x^{(n)}, \mu^{(n)}) \quad \text{-----} (33)$$

$i = 1, 2, \dots, s$   
 $n = 1, 2, \dots, N$

Et éventuellement la condition globale pour la somme des décisions  $\theta_n$ , dans notre cas il n'existe pas de conditions locales sur  $\theta_n$ .

$$\sum_{n=1}^N \theta_n \leq v_n \quad \text{-----} (34)$$

Pour cette classe de processus, on définit :

- Hamiltonien par

$$\mathcal{H}^{(n-1)}(x^{(n)}, \mu^{(n)}, z^{(n-1)}) = f_0(x^{(n)}, \mu^{(n)}) + \sum_{l=1}^L z_l^{(n-1)} f_l(x^{(n)}, \mu^{(n)})$$

$i = 1, 2, \dots, I$   
 $n = 1, 2, \dots, N$  ----- (35)

- Equations conjuguées par :

$$\frac{z_i^{(n)} - z_i^{(n-1)}}{\theta_n} = - \frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial x_i^{(n)}} \quad \text{-----} (36)$$

- Les conditions finales pour les variables conjuguées sont les suivantes :

\* Si les composantes du vecteur-fonction  $x^{(N)}$  sont indépendantes ; alors les composantes du vecteur  $z^{(N)}$  sont nulles.

\* Si les composantes du vecteur-fonction  $x^{(N)}$  sont données, alors les composantes du vecteur  $z^{(N)}$  sont arbitraires.

Donc la condition nécessaire pour l'extremum de

$$F \text{ est : } \frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial \mu_l^{(n-1)}} = 0 \quad \text{-----} (37)$$

$n = 1, 2, \dots, N$   
 $l = 1, 2, \dots, r$

- La partie constante du Hamiltonien est positive ou nulle pour  $\sum_{k=1}^N \theta_k$  non limitée.
- La partie constante du Hamiltonien est arbitraire pour la condition (34).

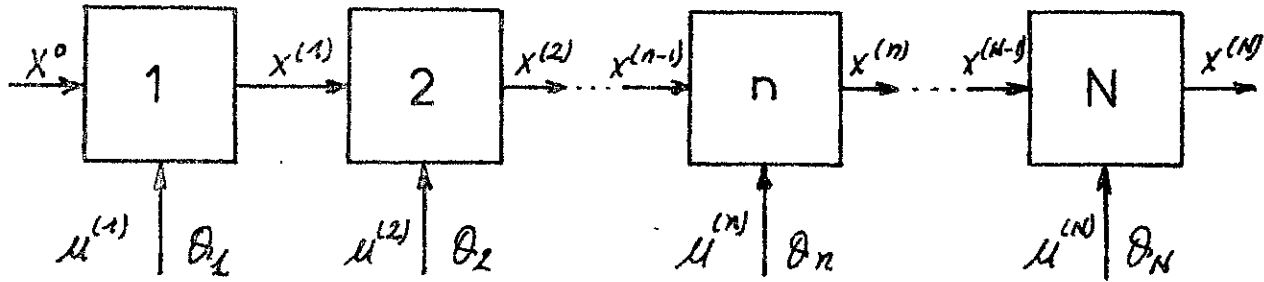


fig 10 Schéma d'un modèle discret avec décision linéaire



# Chap IV L'ANALYSE ECONOMIQUE ET EXERGIQUE

## Fonction de but d'optimisation

Cette analyse consiste à déterminer la fonction de but d'optimisation en introduisant le prix de revient de séchage, compte tenu des paramètres fonctionnels.

L'équation de base d'après Bolvary-Zohr [7] a la forme suivante :

$$E = K_e + K_i + K_p \quad \text{-----(38)}$$

$K_i$ : frais d'investissement, d'entretien et de réparation pour 1 Kg de silicagel sec.

$K_e$ : coûts de consommation d'énergie d'air dans l'exploitation. Ils sont fonction du processus de séchage.

$K_p$ : coûts de refoulement d'air (ventilation).

$$K_i = \frac{\left(\frac{Z}{T_{gr}} + \beta\right) \cdot I}{s \cdot T_u} \quad \text{DA/Kg de silicagel sec} \quad \text{-----(39)}$$

avec

$I$ : coûts d'investissement en (DA)

$Z$ : coefficient d'amortissement des frais d'investissement

$s$ : débit masse de silicagel sec (Kg/h).

$T_{gr}$ : période d'amortissement des coûts d'investissement (an)

$T_u$ : Temps de travail du séchoir par an (h/an).

$\beta$ : coefficient des frais de réparation par an (1/an)

les recommandations sont les suivantes :

$$\beta = 0,01 \div 0,03 \quad (\text{an}^{-1})$$

$$T_{gr} = 3 \div 10 \quad (\text{an})$$

$$- K_e = e \cdot b_i \cdot \frac{G}{S} \quad \text{DA/Kg de silicagel sec} \quad \text{--- (40)}$$

avec

$b_i$ : l'exergie spécifique de l'air (KJ/Kg).

$e$ : prix unitaire, d'exergie de l'air (DA/KJ).

$G$ : débit masse d'air sec (Kg/h).

$S$ : débit masse de silicagel sec (Kg/h).

$$- K_p = \frac{e_d \cdot \Delta P \cdot G}{\eta \cdot \rho \cdot S} \quad \text{DA/Kg de silicagel sec} \quad \text{--- (41)}$$

avec

$e_d$ : prix unitaire d'énergie électrique (DA/KJ).

$\Delta P$ : chute de pression pour l'écoulement d'air (KN/m<sup>2</sup>).

$\eta$ : rendement du ventilateur.

$\rho$ : masse volumique de l'air (Kg/m<sup>3</sup>).

Prenant " $\theta$ " comme rapport du débit masse d'air sur le débit masse de silicagel.

$$\theta = \frac{G}{S} \quad \text{--- (42)}$$

les formules respectivement peuvent se mettre

sous les formes suivantes :

$$K_e = e \cdot b_i \cdot \theta \quad \text{--- (43)}$$

$$K_p = \frac{e_d \cdot \Delta P}{\rho \cdot \eta} \cdot \theta \quad \text{--- (44)}$$

la relation peut aussi se mettre sous une autre

$$\text{forme : } K_i = \frac{(\frac{Z}{T_{gr}} + \beta) P_r}{T_{u} \cdot \rho \cdot v} \cdot \theta \quad \text{--- (45)}$$

or  $I = P_r \cdot F$  et  $G = \rho \cdot v \cdot F$

$P_r$  : coûts d'investissement pour  $1 \text{ m}^2$  de fonte poreuse.

$F$  : Surface de la fonte poreuse

$v$  : Vitesse frontale

En introduisant les relations (43), (44) et (45), donc l'équation de base (38) est:

$$E = \left( e_{bi} + \frac{e_d \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho} + \frac{\left(\frac{Z}{T_g} + \beta\right) \cdot P_r}{T_u \cdot \rho \cdot v} \right) \theta \quad \text{----- (46)}$$

Donc la fonction de but d'optimisation pour un séchoir à couches fluidisées de plusieurs étages est:

$$F = \sum_{n=1}^N \frac{E_n}{e_n} \quad (\text{KJ/kg}) \quad \text{----- (47)}$$

Pour des température  $T < 100^\circ\text{C}$  (conditions de travail de notre séchoir), le prix unitaire d'énergie peut être maintenu constant pour tous les étages donc:

$$F = \frac{1}{e} \sum_{n=1}^N E_n \quad (\text{KJ/kg}) \quad \text{----- (48)}$$

alors on a:

$$F = \sum_{n=1}^N \left( b_n + \left(\frac{Z}{T_g} + \beta\right) \frac{P_r}{T_u \cdot \rho \cdot v \cdot e} + \frac{e_d \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho \cdot e} \right) \theta_n \quad \text{----- (49)}$$

avec  $\lambda = \left(\frac{Z}{T_g} + \beta\right) \frac{P_r}{T_u \cdot \rho \cdot v \cdot e} + \frac{e_d \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho \cdot e} \quad (\text{KJ/kg}) \quad \text{----- (50)}$

la fonction de but d'optimisation qui dans notre, on cherche à la minimiser est alors:

$$F = \sum_{n=1}^N (b_n + \lambda) \theta_n \quad (\text{KJ/kg}) \quad \text{----- (51)}$$

$\lambda$  = Variable économique des coûts d'investissement et du prix d'exploitation

# Chap V OPTIMISATION DU SECHOIR A COUCHES FLUIDISEES

## 1. Equilibre thermodynamique du Silicagel et l'air humide

Le Silicagel humide est séché dans un séchoir à lits fluidisés de plusieurs étages en cascade.

Au début du processus de séchage et à l'entrée du premier étage, le silicagel possède les caractéristiques suivantes :

$W_s^0$  : l'humidité absolue du silicagel à l'entrée (Kg/Kg).

$H_s^0$  : l'enthalpie du silicagel à l'entrée du séchoir (KJ/Kg).

$T_s^0$  : Température du silicagel à l'entrée (K).

A la fin du processus de séchage et à la sortie du dernier étage, les caractéristiques du silicagel sont les suivantes :

$W_s^{(N)}$  : l'humidité absolue du silicagel à la sortie du séchoir (valeur fixe) (Kg/Kg).

$H_s^{(N)}$  et  $T_s^{(N)}$  : l'enthalpie et la température à la sortie du séchoir (Valeurs libres).

L'air sera évacué à l'atmosphère libre, et l'humidité absolue minimale de l'air sec  $X^*$  (Kg/Kg).

On prend comme hypothèse qu'il existe un équilibre thermodynamique isobarique entre les phases solide-gazeuse.



Les équations d'équilibre thermodynamique sont données empiriquement par [ . . . ] ; elles sont valables pour des températures entre  $0 \div 100^\circ\text{C}$  et pour l'humidité du silicagel entre  $0,1 \div 0,2 \text{ (Kg/Kg)}$  ; les équations sont expérimentalement interpolées avec une erreur maximale de 10%.

$$\bullet h_s^{(n)}(W_s^{(n)}, H_s^{(n)}) = 4,19 \left[ \frac{0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}}}{(a_1 W_s^{(n)} - b_1) \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + c_1 W_s^{(n)} + d_1} \right]^2 \quad \text{---52}$$

(KJ/Kg)

$$\bullet x_s^{(n)}(W_s^{(n)}, H_s^{(n)}) = \left[ \frac{0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}}}{(a_2 W_s^{(n)} - b_2) \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + c_2 W_s^{(n)} + d_2} \right]^2 \quad \text{---53}$$

(Kg/Kg)

avec :

$$a_1 = 7,1114 \cdot 10^{-2}$$

$$a_2 = 5,2355$$

$$b_1 = 1,3913 \cdot 10^{-4}$$

$$b_2 = 5,6037$$

$$c_1 = 1,6448 \cdot 10^4$$

$$c_2 = 4,5728 \cdot 10^2$$

$$d_1 = 5,0111$$

$$d_2 = 1,8365 \cdot 10^4$$

## 2\_ Fonction de but d'optimisation

Pour déterminer la fonction de but il faut savoir l'exergie de l'air humide

### - L'exergie de l'air humide

L'évolution d'un fluide se termine dès qu'il aura atteint l'état d'équilibre avec le milieu, situation à partir de laquelle il avait perdu toute

possibilité de fournir un travail quelconque.

Une machine dans laquelle le fluide évoluerait suivant ce processus s'arrêterait donc après une seule évolution et n'aurait de ce fait qu'un intérêt industriel limité.

En principe, le fluide après avoir traversé la machine, soit rejeté au dehors afin d'être remplacé par une nouvelle quantité de fluide dans un état identique à l'état initial du fluide précédent, qui effectuera à son tour son évolution et de suite de façon continue, aussi longtemps que fonctionnera la machine.

Nous sommes donc amenés à faire entrer un terme supplémentaire représentant le travail de déplacement ou transvasement du fluide.

Une expression explicite de l'énergie utilisable pour l'air humide [ ], en fonction de la température et de l'humidité absolue de l'air à l'entrée de l'étage  $n$ .

$$b_g^{(n)}(T_g^{(n)}, x_g^{(n)}) = (C_p + x_g^{(n)} C_w) (T_g^{(n)} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_g^{(n)}}{T_0}) + \frac{RT_0}{M_w} x_g^{(n)} \ln \frac{x_g^{(n)} (M_w/M_p + x_0)}{x_0 (M_w/M_p + x_g^{(n)})} + \frac{RT_0}{M_w} \frac{M_w}{M_p} \ln \frac{(M_w/M_p + x_0)}{(M_w/M_p + x_g^{(n)})} \dots \dots \dots 54$$

(KJ/Kg)

D'après le développement de Taillor à l'ordre (2), pour le couple  $(T_0, x_0)$  on a :

$$b_{g}^{(n)}(T_g^{(n)}, x_g^{(n)}) = \frac{1}{2} A (T_g^{(n)} - T_0)^2 + \frac{1}{2} B (x_g^{(n)} - x_0)^2 \quad \text{---- 55}$$

(KJ/Kg)

avec  $A = \frac{c_p + x_0 C_w}{T_0} \quad \text{---- 56}$

$$B = \frac{RT_0}{x_0 (M_w + x_0 M_p)} \quad \text{---- 57}$$

Donc de la relation (51), la fonction de but est de la forme suivante :

$$F = \sum_{n=1}^N \left[ \frac{1}{2} A (T_g^{(n)} - T_0)^2 + \frac{1}{2} B (x_g^{(n)} - x_0)^2 + \lambda \right] \vartheta_n \quad \text{---- 58}$$

(KJ/Kg)

### 3. Bilans d'énergie et de masse

L'établissement des bilans d'énergie et de masse se fait d'après le schéma représentatif du séchoir à couches fluidisées (voir fig 11)

Etablissement des bilans d'énergie et de masse

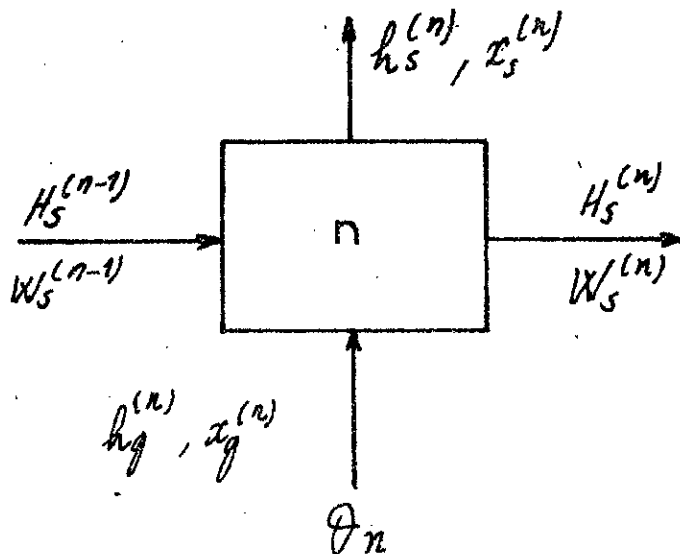


fig 12 Schéma de calcul des bilans

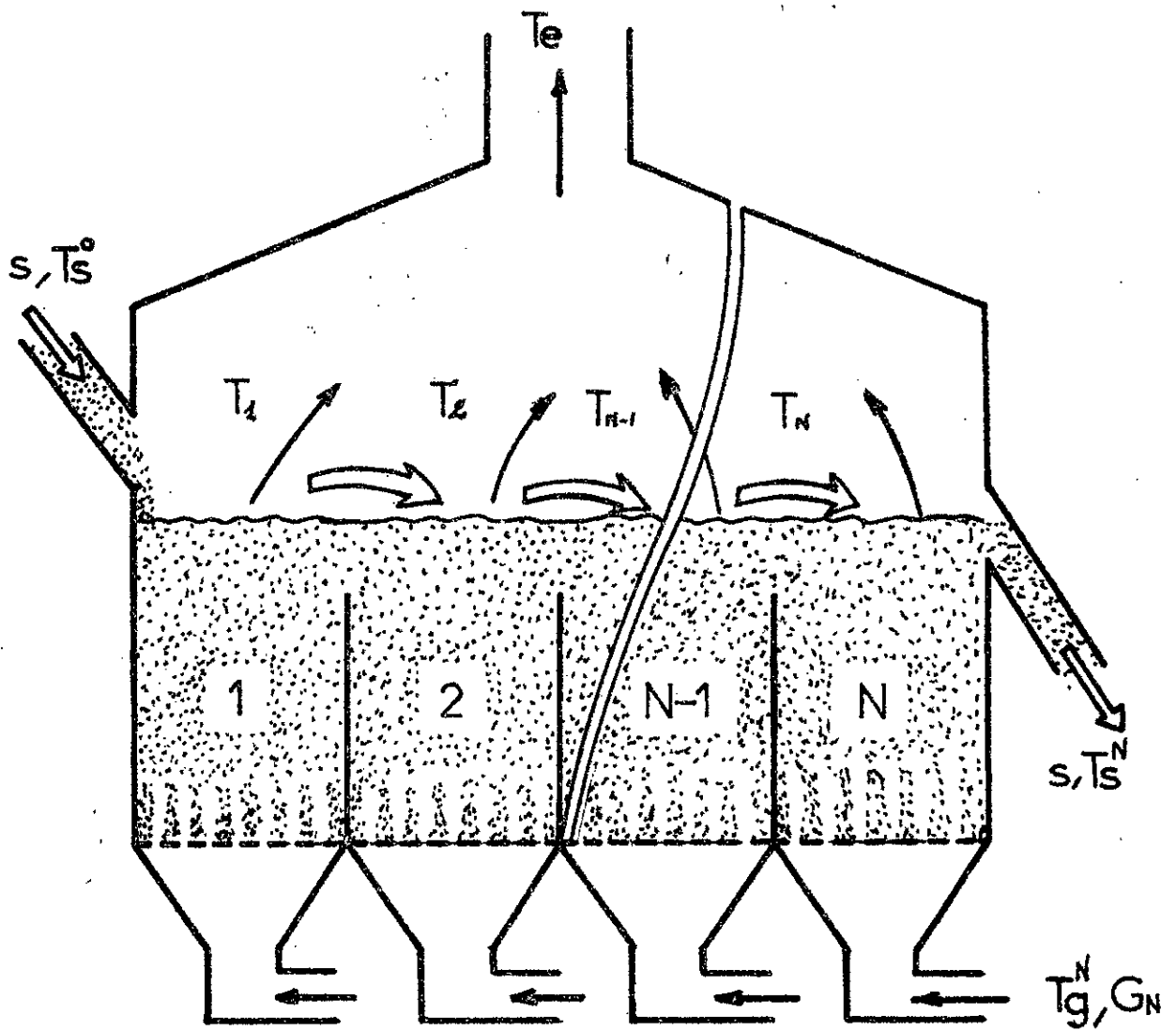


fig 11 Schéma représentatif d'un séchoir à couches fluidisées en cascades

## BILAN D'ENERGIE

(Chaleur cédée par le gaz entrant) = (Chaleur transférée du solide pour vaporiser le liquide)

$$H_s^{(n)} - H_s^{(n-1)} = [h_g^{(n)}(T_g^{(n)}, x_g^{(n)}) - h_s^{(n)}(W_s^{(n)}, H_s^{(n)})] \theta_n \quad \text{--- 59}$$

(KJ/Kg)

## BILAN DE MASSE

(humidité fixée par l'air) = (humidité éliminée du produit)

$$W_s^{(n)} - W_s^{(n-1)} = x_g^{(n)} - x_s^{(n)}(W_s^{(n)}, H_s^{(n)}) \theta_n \quad \text{--- 60}$$

avec  $h_s^{(n)}$  et  $x_s^{(n)}$  sont déterminées par (52) et (53) équations d'équilibre thermodynamique.

$h_g^{(n)}(T_g^{(n)}, x_g^{(n)})$ : Chaleur totale de l'unité de l'air humide à la température  $T_g^{(n)}$  (°C) et d'humidité absolue  $x_g^{(n)}$  de l'air à l'entrée de l'étage "n".

$$h_g^{(n)}(T_g^{(n)}, x_g^{(n)}) = (C_p + x_g^{(n)} C_w)(T_g^{(n)} - 273,15) + 2502,7 \cdot x_g^{(n)} \quad \text{--- 61}$$

(KJ/Kg)

### 4 - Calcul des caractéristiques principales de l'air humide

L'état de l'air humide est, dans le cas général du séchage, caractérisé par les variables indépendantes qui sont d'ordinaire :

- La température  $T_g$
- L'humidité absolue  $x_g$ ; (ou degré hygrométrique,

ou encore le taux de saturation).

L'air et la vapeur d'eau seront supposés assimilables à des gaz parfaits (tout au moins tant que l'on reste dans le domaine des basses températures).

Pour chaque étage ; les conditions d'entrée sont données par (59), (60) et les conditions de sortie par l'équilibre thermodynamique (82), (83) mais pour l'étage  $N$ ,  $H_s^{(N)}$  est une valeur libre.

Notre travail est de déterminer les variables  $\Phi_n$ ,  $T_g^{(n)}$  et  $x_g^{(n)}$  pour  $n=1, 2, \dots, N$  qui donne le minimum de la formule (88) avec (59), (60) les conditions frontières.

- $x_g^{(n)}$  a une valeur minimale  $x_*(Kg/Kg)$ .
- $\sum_{n=1}^N \Phi_n$  n'est pas limité d'après le modèle mathématique de notre processus.

Les équations (88), (59) et (60) sont linéaire car le débit masse  $\Phi_n$  est une valeur libre, et pour cela on prend pour optimiser par le principe de recherche de maximum discret avec Hamiltonien constant.

$$\begin{aligned} \mathcal{H}^{(n-1)} [w_s^{(n)}, H_s^{(n)}, Z_1^{(n-1)}, T_g^{(n)}, x_g^{(n)}] &= \frac{1}{2} A (T_g^{(n)} - T_0)^2 + \frac{1}{2} B (x_g^{(n)} - x_0)^2 \\ &+ \lambda + Z_1^{(n-1)} [(c_p + x_g^{(n)} c_w) (T_g^{(n)} - 273,15) + 2502,7 \cdot x_g^{(n)} \\ &- h_s^{(n)} (w_s^{(n)}, H_s^{(n)})] + Z_2^{(n-1)} [x_g^{(n)} - x_s^{(n)} (w_s^{(n)}, H_s^{(n)})] \end{aligned}$$

$n=1, 2, \dots, N$

-----62

Les équations conjuguées sont :

$$\frac{Z_1^{(n)} - Z_1^{(n-1)}}{\theta_n} = - \frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial H_s^{(n)}} = Z_1^{(n-1)} \frac{\partial h_s^{(n)}(W_s^{(n)}, H_s^{(n)})}{\partial H_s^{(n)}} + Z_2^{(n-1)} \frac{\partial x_s^{(n)}}{\partial H_s^{(n)}} \quad \text{-----} \quad 63$$

$$\frac{Z_2^{(n)} - Z_2^{(n-1)}}{\theta_n} = \frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial W_s^{(n)}} = Z_1^{(n-1)} \frac{\partial h_s^{(n)}}{\partial W_s^{(n)}} + Z_2^{(n-1)} \frac{\partial x_s^{(n)}}{\partial W_s^{(n)}} \quad \text{-----} \quad 64$$

Les conditions finales pour les variables conjuguées pour le dernier étage :

$$Z_1^{(n)} = 0 \quad \text{-----} \quad 65$$

$$Z_2^{(n)} \text{ arbitraire} \quad \text{-----} \quad 66$$

On résout le système (63), (64) après avoir effectué  $\frac{\partial h_s^{(n)}}{\partial H_s^{(n)}}$ ,  $\frac{\partial x_s^{(n)}}{\partial H_s^{(n)}}$ ,  $\frac{\partial h_s^{(n)}}{\partial W_s^{(n)}}$  et  $\frac{\partial x_s^{(n)}}{\partial W_s^{(n)}}$  données par

(52.) et (53) d'où l'on tire les valeurs de

$Z_1^{(n-1)}$  et  $Z_2^{(n-1)}$

$$Z_1^{(n-1)} = \frac{Z_1^{(n)} - \theta_n (Z_1^{(n)} \beta_2 + Z_2^{(n)} \beta_1)}{1 + \theta_n (\alpha_1 - \beta_2) + \theta_n^2 (\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2)} \quad \text{-----} \quad 67$$

$$Z_2^{(n-1)} = \frac{Z_1^{(n)} \theta_n \alpha_2 + Z_2^{(n)} (\alpha_1 \theta_n + 1)}{1 + \theta_n (\alpha_1 - \beta_2) + \theta_n^2 (\alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \beta_2)} \quad \text{-----} \quad 68$$

avec

$$\alpha_1 = \frac{2 \left( 0,124 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) (C_1 W_s^{(n)} + d_1)}{\left[ (a_1 W_s^{(n)} - b_1) \left( 0,124 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_1 W_s^{(n)} + d_1 \right]^3} \quad \text{-----} \quad 69$$

$$\beta_1 = \frac{2 \left( 0,124 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) (C_2 W_s^{(n)} + d_2)}{\left[ (a_2 W_s^{(n)} - b_2) \left( 0,124 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_2 W_s^{(n)} + d_2 \right]^3} \quad \text{-----} \quad 70$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) \left[ a_1 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_1 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) - \frac{3,064 (C_1 W_s^{(n)} + d_1)}{(0,094 + W_s^{(n)})^2} \right]}{\left[ (a_1 W_s^{(n)} - b_1) \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_1 W_s^{(n)} + d_1 \right]^3} \quad \text{---71}$$

$$\beta_2 = \frac{2 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) \left[ a_2 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_2 \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) - \frac{3,064 (C_2 W_s^{(n)} + d_2)}{(0,094 + W_s^{(n)})^2} \right]}{\left[ (a_2 W_s^{(n)} - b_2) \left( 0,24 H_s^{(n)} + \frac{32,6 W_s^{(n)}}{0,094 + W_s^{(n)}} \right) + C_2 W_s^{(n)} + d_2 \right]^3} \quad \text{---72}$$

les valeurs optimales  $T_g^{(n)}$  et  $x_g^{(n)}$  sont données par :

$$\frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial x_g^{(n)}} = B(x_g^{(n)} - x_0) + Z_1^{(n-1)} C_w (T_g^{(n)} - 273,15) + 2502,7 + Z_2^{(n-1)} = 0 \quad \text{---73}$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}^{(n-1)}}{\partial T_g^{(n)}} = A(T_g^{(n)} - T_0) + Z_1^{(n-1)} (C_p + x_g^{(n)} \cdot C_w) = 0 \quad \text{---74}$$

La résolution du système d'équations (73) et (74) donne :

$$x_g^{(n)} = \frac{B x_0 + 273,15 \cdot Z_1^{(n-1)} \cdot C_w - 2502,7 - Z_2^{(n-1)} - Z_1^{(n-1)} \cdot C_w \cdot T_0 + \frac{(Z_1^{(n-1)})^2 \cdot C_p \cdot C_w}{A}}{B - \frac{(Z_1^{(n-1)})^2 \cdot C_w}{A}} \quad \text{---75}$$

$$T_g^{(n)} = T_0 - \frac{Z_1^{(n-1)} (C_p + x_g^{(n)} \cdot C_w)}{A} \quad \text{---76}$$

Dans le cas où l'humidité de l'air est inférieur à  $x_x$  (l'humidité minimale), l'humidité optimale est égale à  $x_x$  ou :

$$x_g^{(n)} = x_x \quad \text{---77}$$

$$T_g^{(n)} = T_0 - \frac{Z_1^{(n-1)} (C_p + x_x \cdot C_w)}{A} \quad \text{---78}$$



## Chap VI MODELE LOGIQUE DE RESOLUTION

Si dans les systèmes réels, l'expérimentation directe constitue la phase décisive; avec l'avènement des ordinateurs, l'optimisation se révèle être un outil appréciable à l'instant de l'investigation théorique; elle présente ces systèmes réels par l'utilisation de modèles mathématiques ou logiques dont l'étude est en générale assez accessible et avantageuse; son intérêt majeur réside dans la possibilité qu'elle apporte à l'intéressé:

- \* D'étudier des systèmes complexes à causes du nombre important des paramètres et de transformations impliquées et d'opérations à effectuer.
- \* De voir l'influence sur le système complet d'un paramètre considéré isolément par rapport aux autres (on peut contrôler tous les paramètres dénombrés).

Dans le cas présent, l'analyse d'optimisation du séchoir à couches fluidisées présente de grands avantages:

- L'exploitation la plus rentable durant la durée d'utilisation du séchoir.

- Déterminer la valeur optimale des différents paramètres afin de les fixer au constructeur.

L'analyse de la méthode utilisée sera achevée après que les deux points suivants auront été successivement observés :

- Définition du modèle logique de résolution.
- Examen des organigrammes correspondant au modèle de résolution en décrivant les opérations à effectuer.

## 1. Classification des paramètres

### 1.1. Paramètres principaux

#### - En sortie du séchoir :

Le sont ceux dont on veut étudier l'influence de la variation sur les grandeurs caractéristiques du produit à sécher.

$H_s^{(N)}$  : l'enthalpie du produit à la sortie du séchoir.

$X_s^{(N)}$  : l'humidité absolue du produit à la sortie du séchoir.

$G^{(N)}$  : débit masse d'air

$Z_2^{(N)}$  : condition finale de l'équation conjuguée ; pour notre cas c'est une constante arbitraire.

$Z_1^{(N)} = 0$  (d'après le modèle mathématique).

#### - En entrée du séchoir

Le sont les paramètres qui caractérisent les grandeurs d'entrée du produit à sécher.

$H_s^\circ$  : l'enthalpie du produit à l'entrée du séchoir.

$X_s^\circ$  : l'humidité absolue du produit à l'entrée du séchoir.

$T_s^\circ$  : Température du produit à l'entrée du séchoir.

## 1.2 - Paramètres secondaires

Ce sont les paramètres qui, au cours des diverses exécutions du programme doivent être déterminés pour chaque étage.

$H_s^{(n)}$  ;  $H_s^{(n-1)}$  : les enthalpies respectives de sortie et d'entrée à l'étage "n".

$X_s^{(n)}$  ;  $X_s^{(n-1)}$  : les humidités absolues respectives de sortie et d'entrée à l'étage "n".

$X_g^{(n)}$  ;  $X_s^{(n)}$  : les humidités absolues respectives d'entrée et de sortie de l'air humide.

$T_g^{(n)}$  : Température d'entrée de l'air humide.

$G^{(n)}$  : débit masse d'air à l'étage "n".

## 1.3 - Paramètres frontières

Ce sont les conditions limites qu'il ne faut dépasser au cours de l'exécution du programme.

$X_*$  : l'humidité absolue minimale de l'air humide.

$T_g$  : Température maximale de l'air humide.

$\Sigma G$  : la somme des débits masse d'air pour tous les étages dans le cas du rejet de l'air avec recyclage (ce n'est pas notre cas).

## 2 - Structures des organigrammes

### 2.1 - Organigramme générale

Il s'agit à ce niveau de voir pour le programme l'influence des différents paramètres ; autrement dit, d'étudier les organigrammes qui représentent les opérations globales à effectuer. (Voir fig 13)

### 2.2 - Organigramme détaillé

Il est basé sur deux méthodes d'exécutions du programme :

- Optimisation à débit constant (voir fig 14)

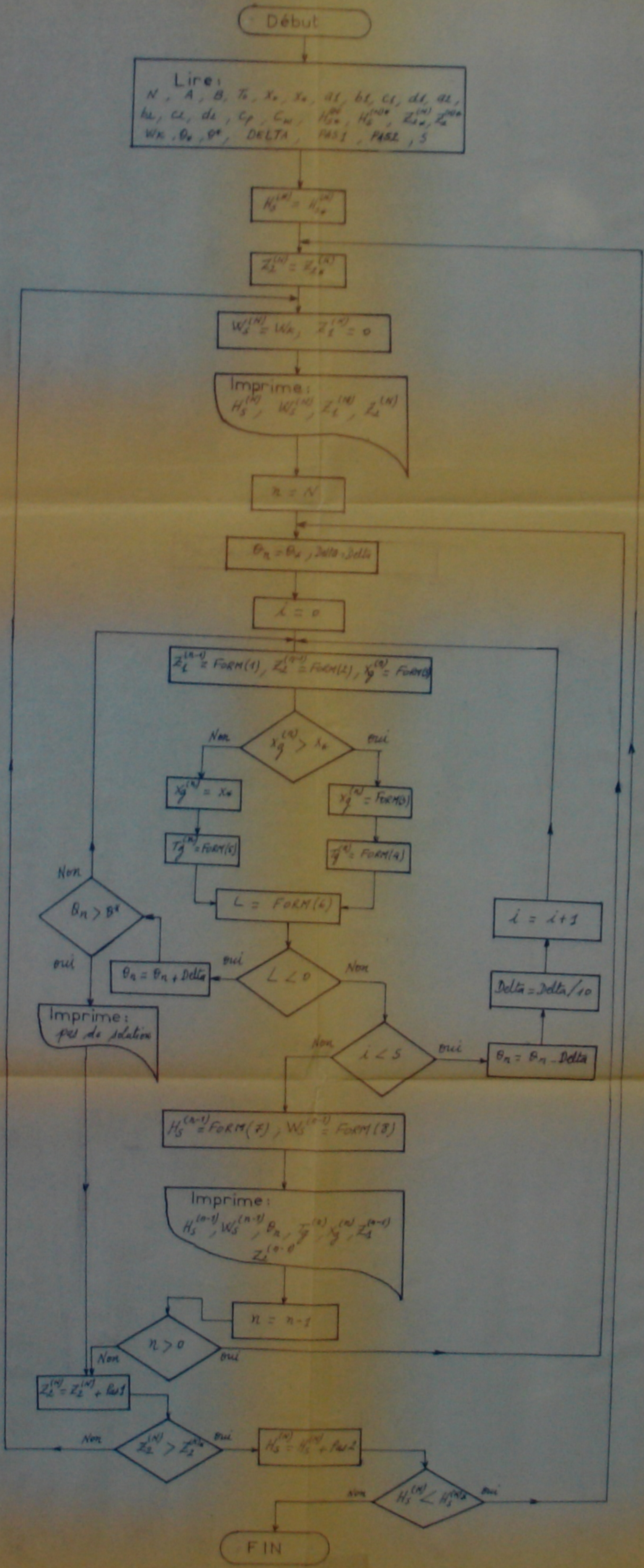
- Optimisation à débits variables (voir fig 15)

le programme est organisé sur la base de l'organigramme détaillé.

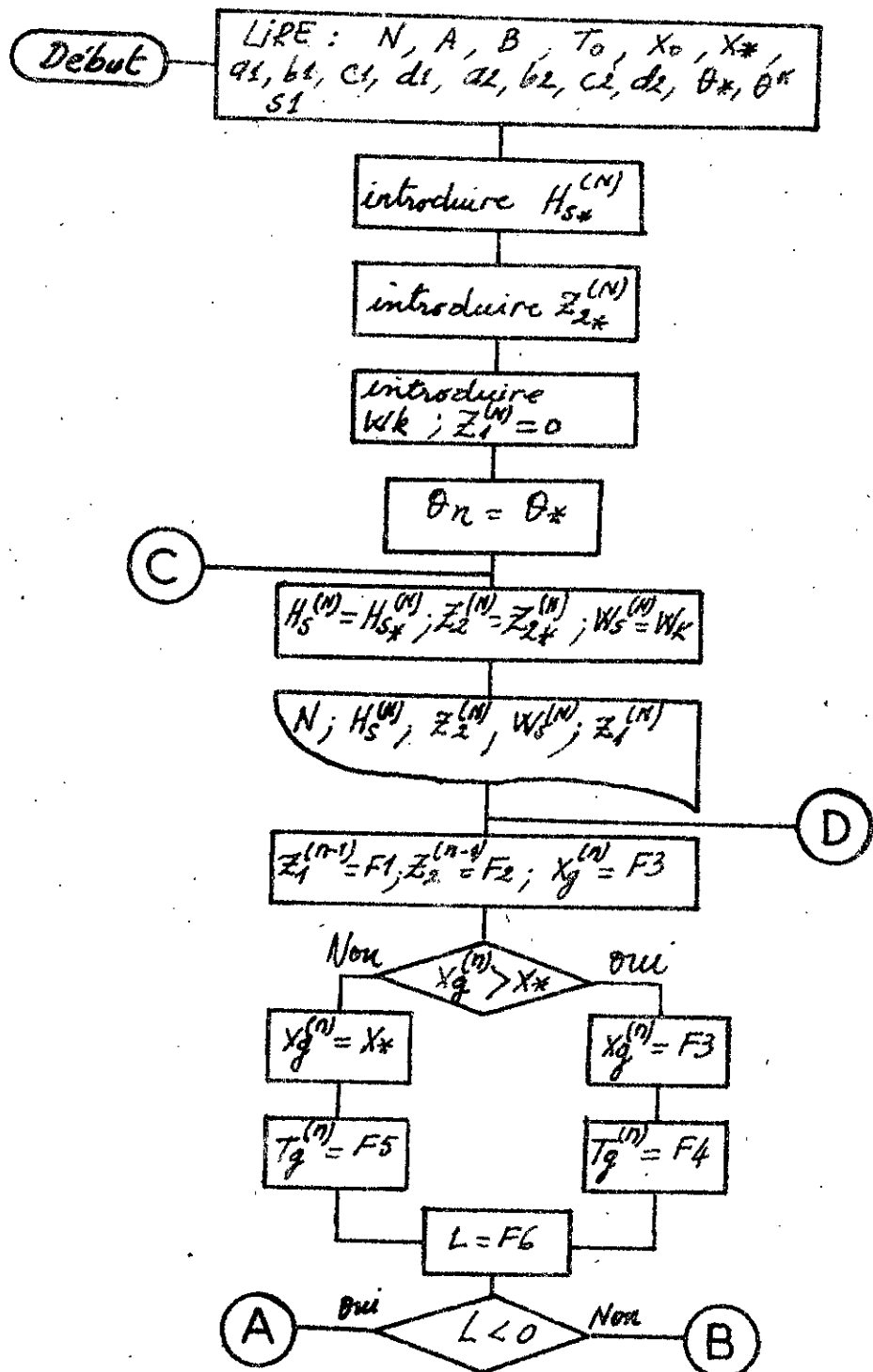
le langage origine est le "Basic".



ORGANIGRAMME GENERALE



# Organigramme d'optimisation à débit constant



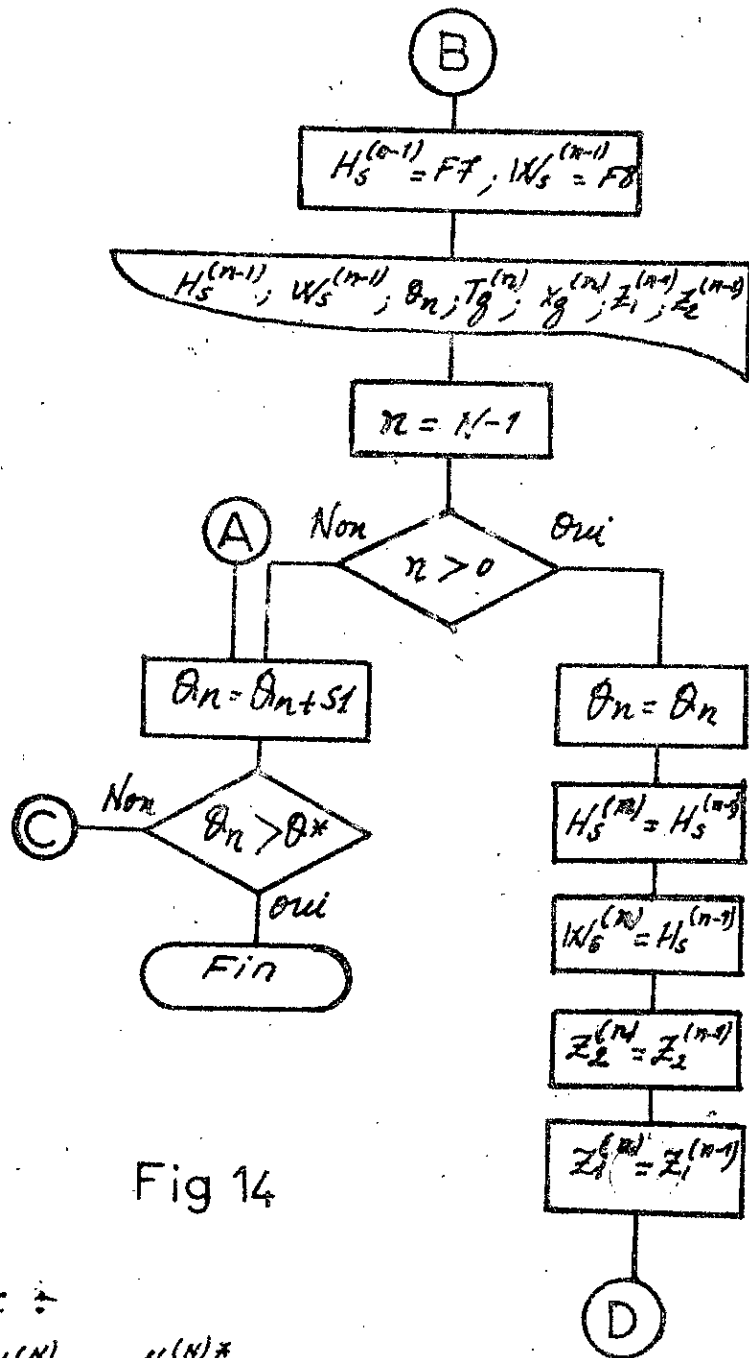


Fig 14

avec :

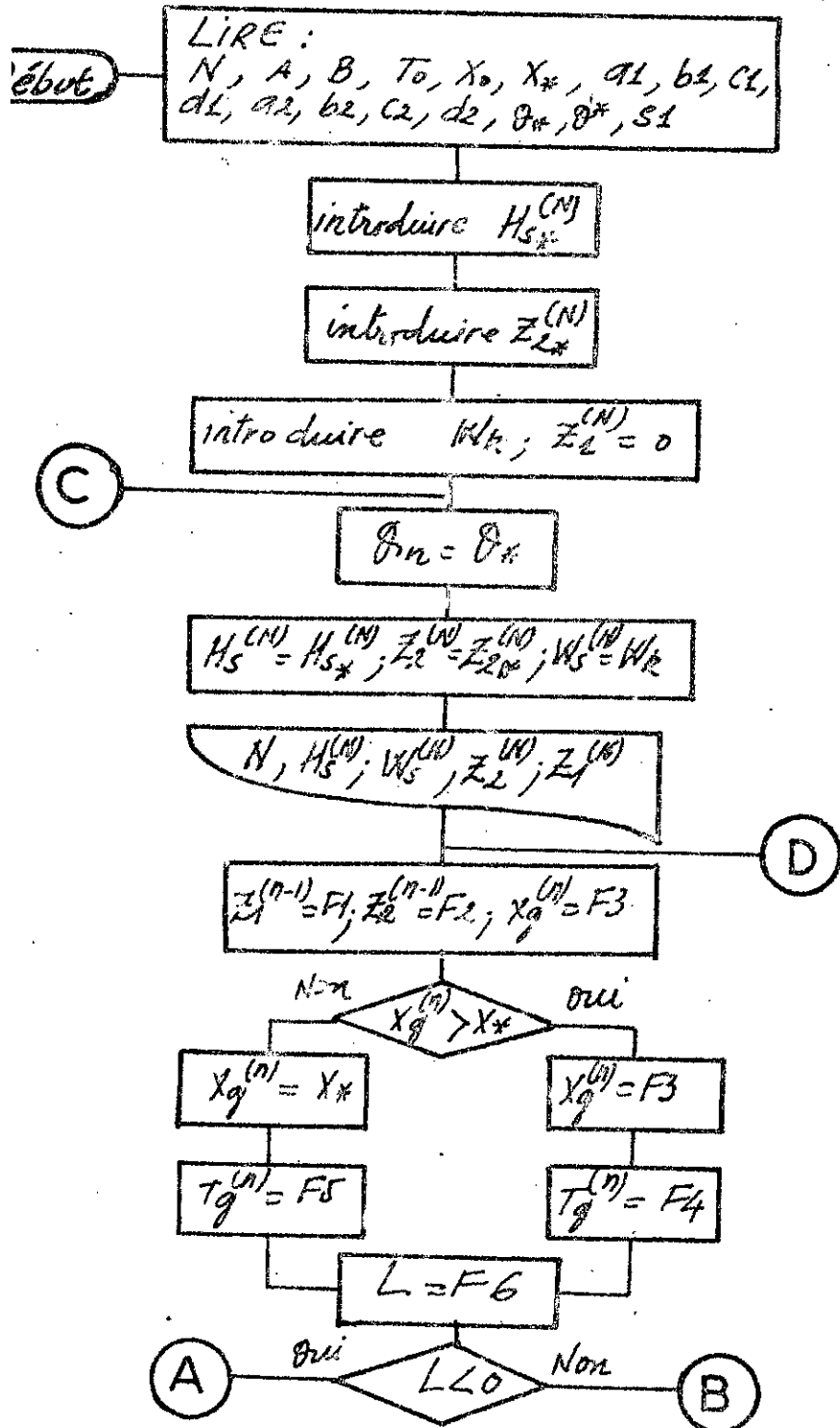
$$H_{s*}^{(N)} < H_s^{(N)} < H_s^{(N)*}$$

$$Z_{2*}^{(N)} < Z_2^{(N)} < Z_2^{(N)*}$$

$$\theta_* < \theta_n < \theta^*$$

S1 : Pas de débit constant

# Organigramme d'optimisation à des débits variables





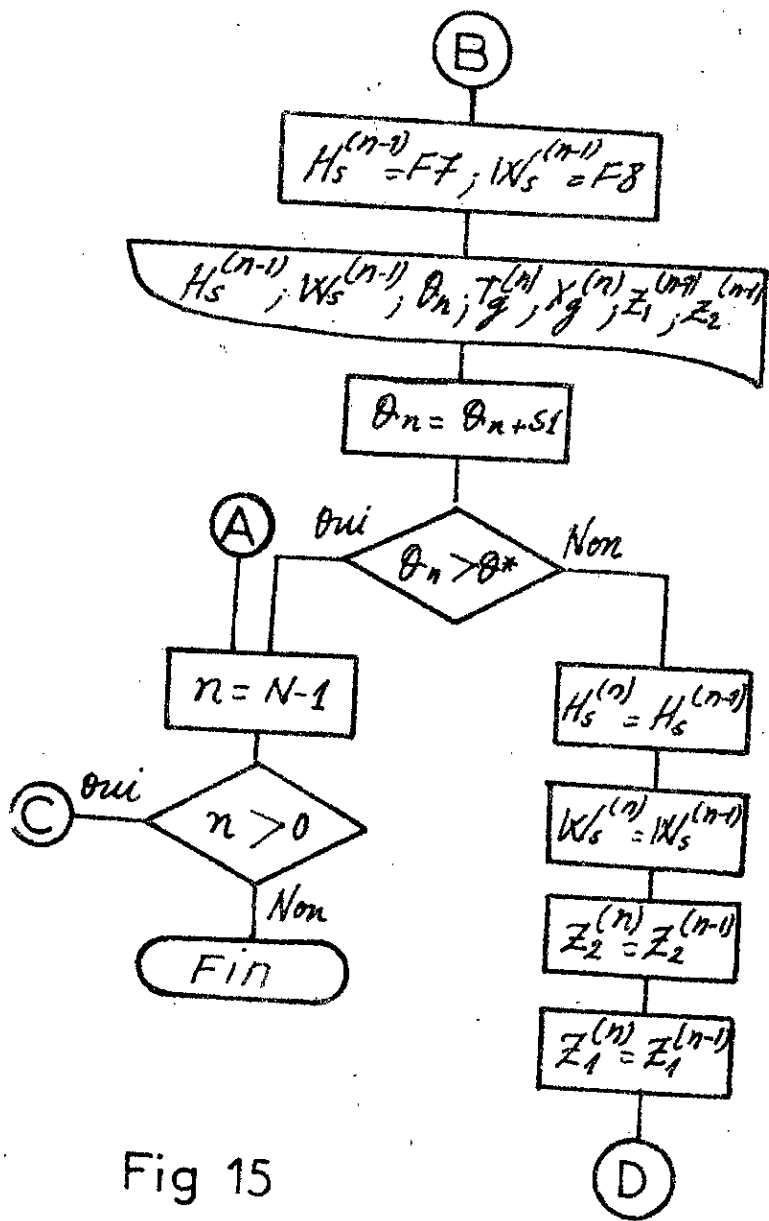


Fig 15

# Chap VII RESULTATS ET INTERPRETATIONS

## 1. Données de base

On considère un séchoir à couches fluidisées de trois étages ( $N=3$ ).

Produit ( Silicagel )

- les caractéristiques, des paramètres principaux d'entrée sont :

$H_s^\circ$ (KJ/Kg)	$X_s^\circ$ (Kg/Kg)	$T_s^\circ$ (°C)
-11,2	0,2	20

- les caractéristiques de sortie du séchoir du produit sont :

$$X_s^{(N)} = 0,1 \text{ (Kg/Kg)}$$

$H_s^{(N)}, T_s^{(N)}$  : des grandeurs libres.

L'air humide

- les caractéristiques de l'air humide rejeté à l'atmosphère libre à 20°C sont :

$T_0$ (K)	$X_0$ (Kg/Kg)	$C_p$ (KJ/KgK)	$C_w$ (KJ/KgK)	$X^*$ (Kg/Kg)
293,15	0,008	1,00	1,88	0,0001

Notre analyse d'optimisation est basé sur des résultats expérimentaux de la variable économique qui varie entre  $\lambda = 0,42 \div 4,20$  (KJ/Kg).

L'essai d'optimisation est basé sur trois valeurs de la variable économique et pour chacune d'elles on essaye de minimiser la fonction de but d'optimisation.

## 2. Résultats et discussions

### 2.1. Evolution de la température de l'air humide en fonction de la variable économique

D'après les résultats d'optimisation, on a établi les différentes évolutions de la température de l'air humide " $T_g^{(n)}$ " en fonction de la variable économique " $\lambda$ " et cela pour chaque étage du séchoir, on conclut que (voir fig 16) :

- Pour une même valeur de la variable économique ( $\lambda$ ), la température est décroissante du premier étage au dernier étage ( $T_g^{(1)} < T_g^{(2)} < T_g^{(n)}$ ).
- Avec une augmentation de ( $\lambda$ ) c'est-à-dire du prix unitaire de l'appareil, la température de l'air humide chauffant augmente aussi pour chaque étage.
- La différence de température entre  $T_g^{(1)}$  et  $T_g^{(3)}$  s'accroît progressivement avec une augmentation de la variable économique ( $\lambda$ ).

RESULTATS D'OPTIMISATION DU SECHOIR A COUCHES  
 LUIDISEES AVEC DES DEBITS CONSTANTS

\*\*\*\*\*

J(kJ/kg)      H(kJ/kg)      W(kg/kg)  
 .42            -9.8            .1

= 4.45

N	H(KJ/KG)	W(KG/KG)	Y	Z	T(K)	X(KG/KG)
3	-12.19942	.1204122	-3.137729E-02	36.30314	302.2802	.004
2	-13.7175	.1426114	-3.440924E-02	35.15842	303.1624	.004
1	-11.66477	.1662901	-3.443526E-02	34.27142	303.17	.004

J(kJ/kg)      H(kJ/kg)      W(kg/kg)  
 2.1            -9.2            .1

= 3

N	H(KJ/KG)	W(KG/KG)	Y	Z	T(K)	X(KG/KG)
3	-10.95895	.1262252	-7.003782E-02	64.98023	313.0958	.0001
2	-12.17338	.1553853	-6.093711E-02	62.98452	315.5334	.0001
1	-11.26953	.1653093	-6.269386E-02	61.56936	317.0272	.0001

J(kJ/kg)      H(kJ/kg)      W(kg/kg)  
 4.2            -4.3            .1

= 2.789

N	H(KJ/KG)	W(KG/KG)	Y	Z	T(K)	X(KG/KG)
3	-5.659695	.1308656	-.1042922	122.3501	323.2762	.0001
2	-7.270165	.1654589	-.1193194	113.6317	327.617	.0001
1	-11.03474	.2005568	-.1213099	113.3593	328.1319	.0001

RESULTAT D'OPTIMISATION DU SECHOIR A COUCHES  
FLUIDISEES AVEC DES DEBITS VARIABLES

-----oooo-----

J(KJ/KG)                      H(KJ/KG)                      W(KG/KG)  
.42                                      -9,8                                      .1

N	H(KJ/Kg)	W(Kg/Kg)	Y	Z	T(K)	X(Kg/kg)	G
3	-12.3223	0.121	-0.031	36.274	302.30	0.0040	4.55
2	-14.7119	0.159	-0.034	34.422	303.01	0.0040	7.70
1	-11.1973	0.202	-0.034	33.097	302.91	0.0040	7.96

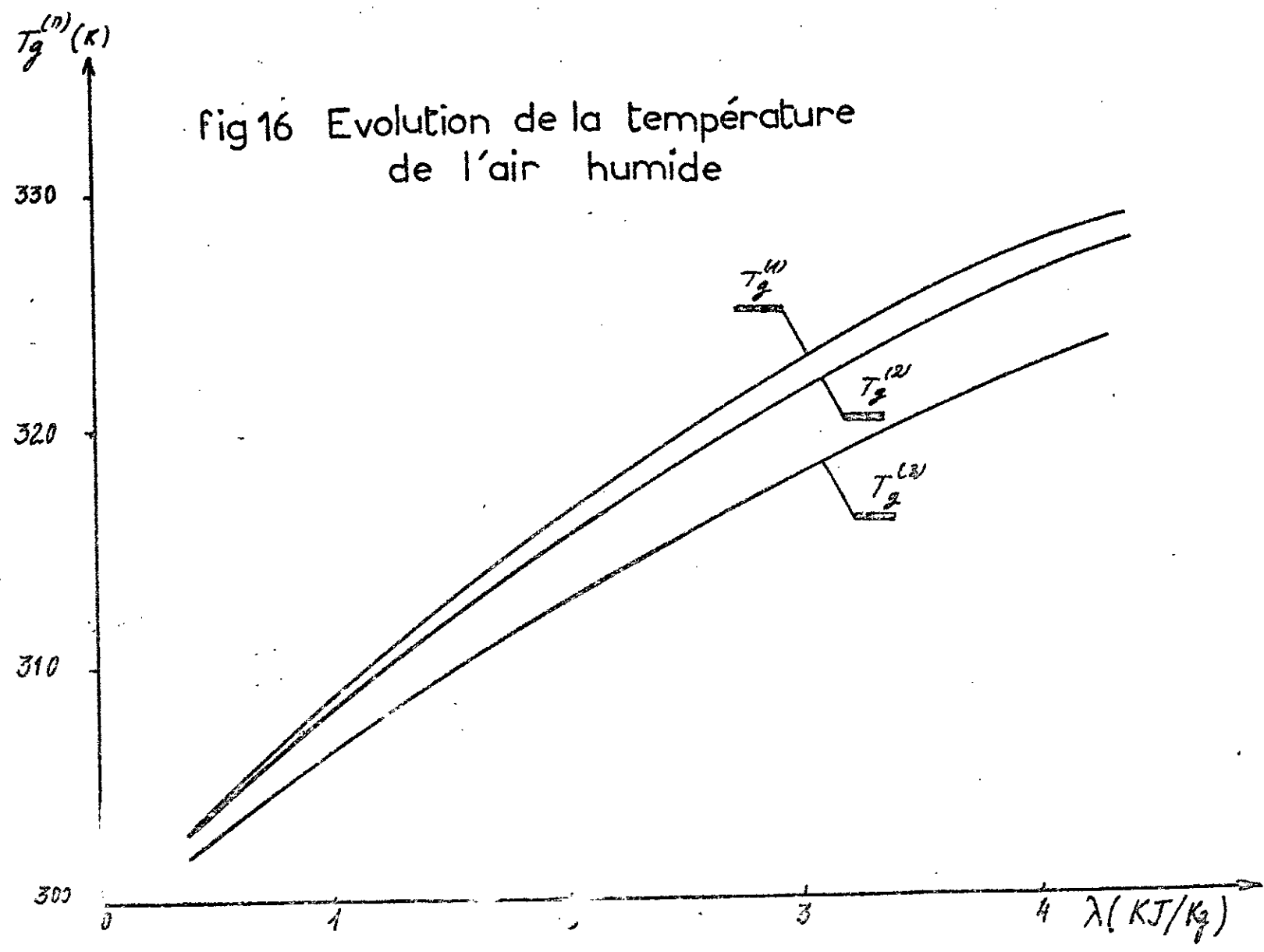
J(KJ/KG)                      H(KJ/KG)                      W(KG/KG)  
2.1                                      -9.2                                      .1

N	H(KJ/Kg)	W(Kg/kg)	Y	Z	T(K)	X(Kg/kg)	G
3	-10.9589	0.126	-0.070	84.980	313.40	0.0001	3.00
2	-12.3766	0.160	-0.081	82.701	316.54	0.0001	3.50
1	-11.1951	0.199	-0.082	81.014	316.95	0.0001	3,84

J(KJ/KG)                      H(KJ/KG)                      W(KG/KG)  
4.2                                      -4.3                                      .1

N	H(KJ/Kg)	W(Kg/kg)	Y	Z	T(K)	X(Kg/Kg)	G
3	-5.8597	0.131	-0.104	122.350	323.28	0.0001	2.79
2	-7.2813	0.166	-0.119	119.301	327.62	0.0001	2,81
1	-11.2006	0.202	-0.121	117.250	328.17	0.0001	2.92

fig 16 Evolution de la température de l'air humide



## 22 - Evolution du débit massique en fonction de la variable économique

Des différentes évolutions du débit massique en fonction de la variable économique (fig 17) on conclut que :

- Pour chaque valeur de  $(\lambda)$ , le plus grand débit masse est pour le 1<sup>er</sup> étage et le plus faible est pour le dernier étage ( $D_1 > D_2 > D_3$ ). Donc le débit masse pour chaque étage diminue en fonction de la variable économique " $\lambda$ ".
- Avec une augmentation de " $\lambda$ ", la différence entre  $D_1$  et  $D_3$  diminue rapidement.

On remarque que pour le 3<sup>ème</sup> étage, il existe une tendance pour un débit constant.

## 23 - Fonction de but d'optimisation

Pour cette analyse d'optimisation dont son but principale est de minimiser la fonction de but d'optimisation, on remarque  $F = F(\lambda)$  c'ad si  $\lambda$  augmente les valeurs optimales (minimales) augmentent aussi de la fonction de but d'optimisation.

$\theta_n$ 

## Evolution du débit massique

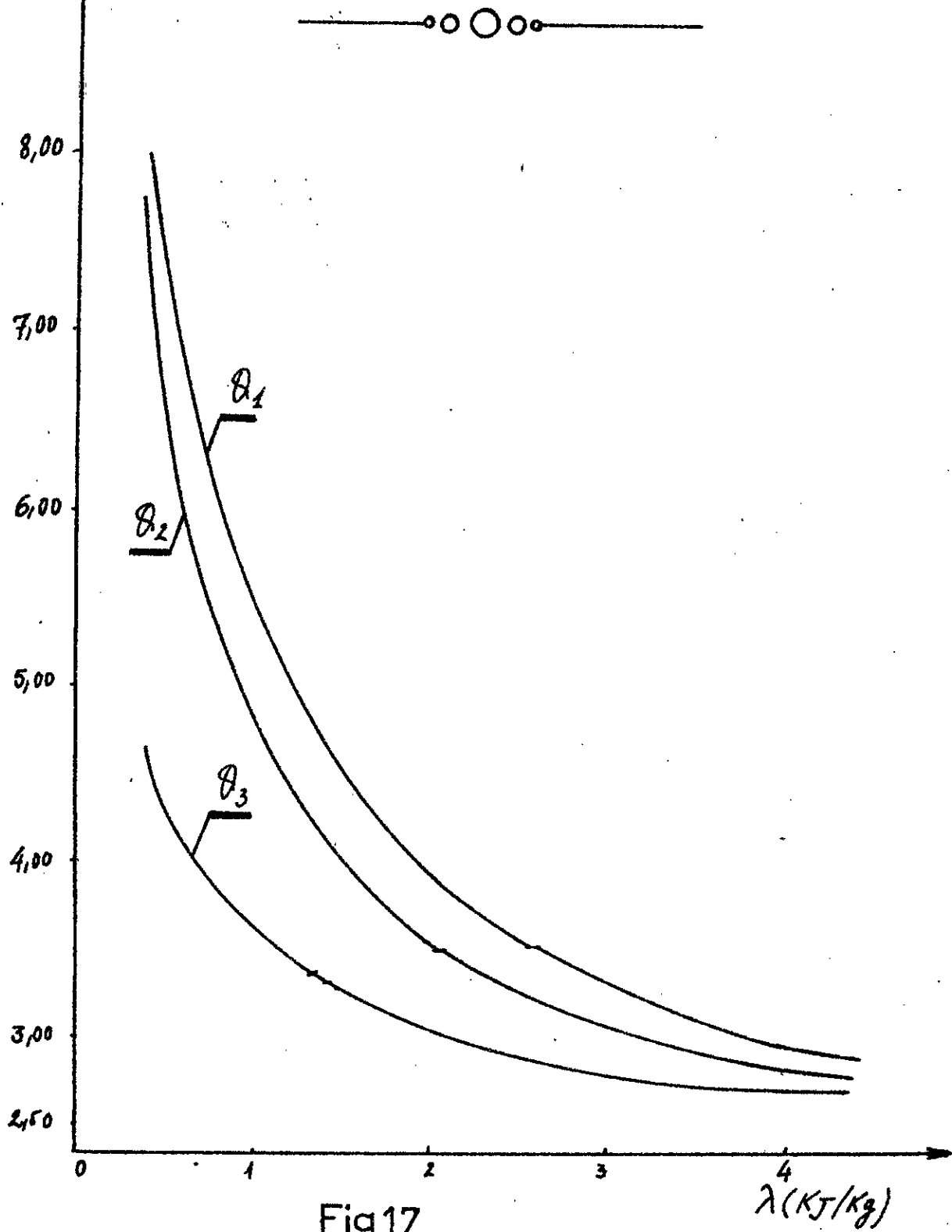


Fig17



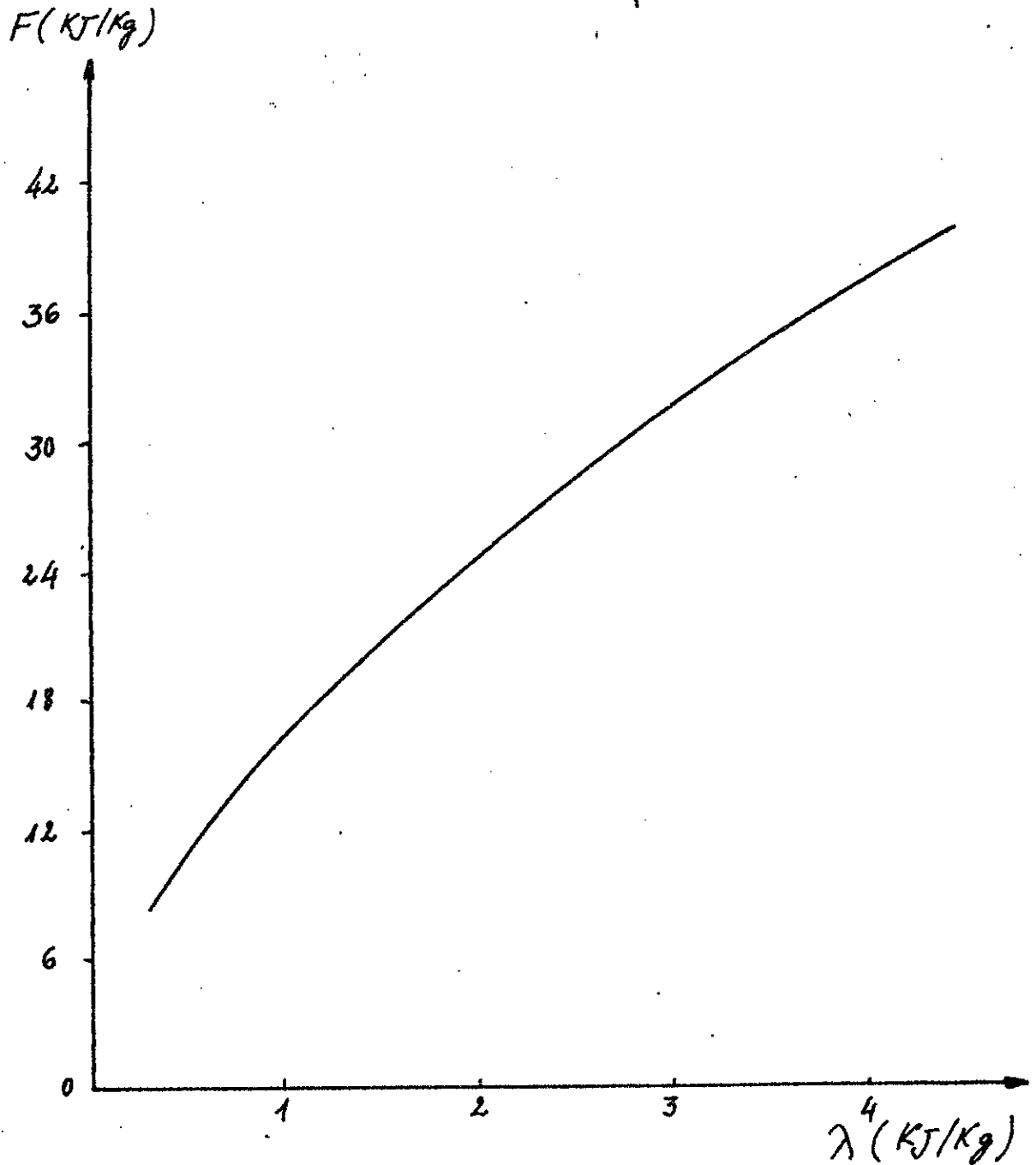
RESULTATS DE CALCUL DE LA FONCTION DE BUT  
 D'OPTIMISATION DU SECHOIR A COUCHES FLUIDISEES  
 \*\*\*\*\*

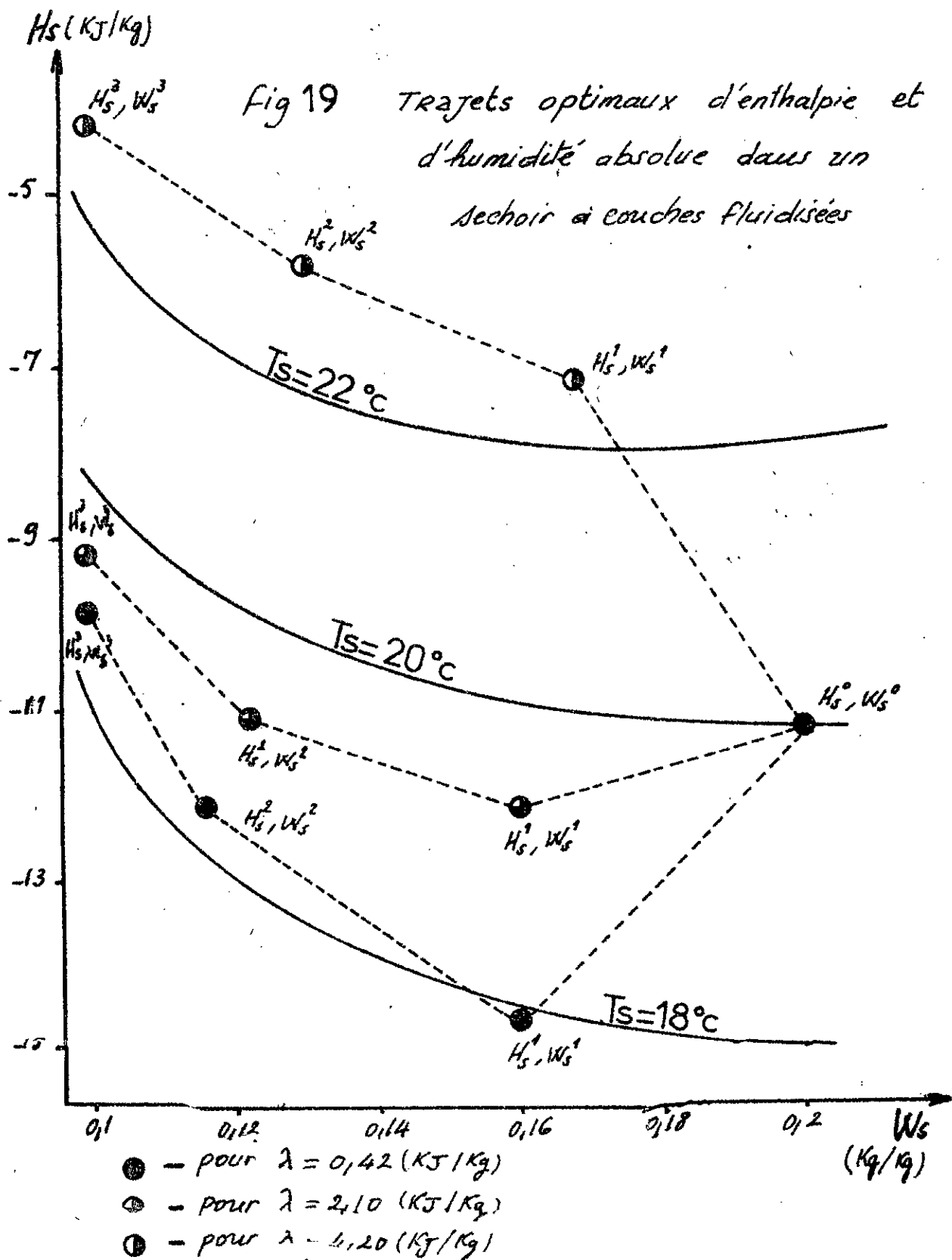
		J'(kJ/kg)	T0(k)	X0(kg/kg)	
		.42	295.15	.0087	
N	T(k)	X(kg/kg)	G	Fn(kJ/kg)	
3	302.30	0.0040	4.550	2.223	
2	303.01	0.0040	7.700	3.942	
1	302.91	0.0040	7.960	4.048	
					F(kJ/kg) = 10.213

		J'(kJ/kg)	T0(k)	X0(kg/kg)	
		2.1	293.15	.008	
N	T(k)	X(kg/kg)	G	Fn(kJ/kg)	
3	313.40	0.0001	3.000	6.644	
2	315.54	0.0001	3.500	8.213	
1	316.95	0.0001	3.840	9.600	
					F(kJ/kg) = 25.459

		J'(kJ/kg)	T0(k)	X0(kg/kg)	
		4.2	293.15	.008	
N	T(k)	X(kg/kg)	G	Fn(kJ/kg)	
3	323.28	0.0001	2.790	11.699	
2	327.62	0.0001	2.810	13.147	
1	328.17	0.0001	2.920	13.954	
					F(kJ/kg) = 38.700

fig18 Evolution de la fonction de but d'optimisation





## CONCLUSION

Cette étude montre que certaines paramètres peuvent posséder des valeurs optimales qui varient en général d'un séchoir à autre.

L'examen des hypothèses simplificatrices admises au départ et de l'ensemble des résultats théoriques suggère diverses orientations pour les recherches à venir.

- En prenant en considération que l'air chauffant ne soit pas évacué à l'atmosphère libre, mais recyclé pour être utilisé.
- En introduisant plus de termes à la fonction de but d'optimisation pour rendre le problème plus concret.
- Après le calcul d'optimisation, on fait une étude de conception et de construction, en tenant compte de la vitesse de fluidisation et ainsi d'autres paramètres tels les coefficients de transferts de chaleur et de masse.

Pour terminer, j'espère qu'une telle étude pourra être poursuivie pour d'éventuelles améliorations.

**ANNEXES'**

# Notations utilisées dans le Programme

- $H_1$  : l'enthalpie minimale à la sortie du séchoir
- $H$  : l'enthalpie optimale à la sortie du séchoir
- $W_1$  : l'humidité absolue minimale à la sortie du séchoir.
- $W$  : l'humidité optimale à la sortie du séchoir.
- $G_1$  : rapport des débits massiques minimal
- $G_2$  : rapport des débits massique maximal
- $Y$  : valeur des conditions finale  $Z_1^{(N)}$ .
- $Z$  : valeur des conditions finale  $Z_2^{(N)}$ .
- $N$  : Nombre d'étage.
- $n$  : numéro d'étage.
- $G$  : rapport des débits massiques optimal
- $X_1$  : l'humidité absolue de l'air minimale  $X_*$
- $T_0$  : température de l'air humide à l'extérieur
- $X_0$  : l'humidité de l'air humide à l'extérieur
- $K_1$  : chaleur massique de l'air à pression constante.
- $K_2$  : chaleur massique de la vapeur d'eau à pression constante.
- $F_1 = Z_1^{(n-1)}$
- $F_2 = Z_2^{(n-1)}$
- $F_3 = X_g^{(n)}$  : l'humidité absolue de l'air à l'entrée de l'étage  $n$ .
- $T$  : Température de l'air humide à l'entrée de l'étage  $n$ .

$I_1, V_1, I_2, V_2$  : sont respectivement  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ .

$L =$  Hamiltonien  $\mathcal{H}^{(n-1)}$ .

$J = \lambda$  : Variable économique.

$E_1$  : l'enthalpie de l'air humide à l'entrée de l'étage "n".

$E_2$  : l'enthalpie de l'air humide à la sortie de l'étage "n".

$x_2$  : l'humidité absolue de l'air humide à la sortie de l'étage "n".

$F_7$  : l'enthalpie du produit à l'entrée de l'étage "n".

$F_8$  : l'humidité absolue du produit à l'entrée de l'étage "n".

$F$  : Fonction de but d'optimisation.

```

10 REM ***** OPTIMISATION D'UN SECHOIR A' COUCHES FLUIDISEES ***
20 REM ***** DE PLUSIEURS ETAGES *****
30 /
40 /
50 REM _____ CONSTANTES _____
60 READ N , A , B , T0
70 READ A1 , B1 , C1 , D1
80 READ A2 , B2 , C2 , D2
90 READ K1 , K2 , X0 , X1
100 REM ***** CALCUL DES PARAMETRES DE CHAQUE *****
110 REM ***** ETAGE DU SECHOIR AVEC DES DEBITS CONSTANTS *****
120 /
130 DIM H(100), Z(100), W(100), Y(100), G(100), T(100), X(100)
140 INPUT "J(kJ/kg)=";J
150 INPUT "H1(kJ/kg)=";H1
160 INPUT "W1(kg/kg)=";W1
170 INPUT "Y1=";Y1
180 INPUT "Z1=";Z1
190 INPUT "G1=";G1
200 INPUT "G2=";G2
210 G=G1
220 H=H1
230 Z=Z1
240 W=W1
250 Y=Y1
260 PRINT
270 PRINT "G=";G
280 PRINT
290 PRINT TAB(3);"N";TAB(8);"H(KJ/KG)";TAB(20);"W(KG/KG)";TAB(33);
300 PRINT "Y";TAB(48);"Z";TAB(55);"T(K)";TAB(65);"X(KG/KG)";TAB(75)
310 E=.24*H+32.6*W/(9.400001E-02+W)
320 I1=2*E*(C1*W+D1)/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1)^3
330 V1=2*E*(C2*W+D2)/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2)^3
340 I2=2*E*(A1*E^2+C1*E-3.064*(C1*W+D1))/(9.400001E-02+W)^2)
350 I2=I2/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1)^3
360 V2=2*E*(A2*E^2+C2*E-3.064*(C2*W+D2))/(9.400001E-02+W)^2)
370 V2=V2/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2)^3
380 F1=(Y-G*(Y*V2+Z*V1))/(1+G*(I1-V2)+G^2*(I2*V1-I1*V2))
390 F2=(Y*G*I2+Z*(I1*G+1))/(1+G*(I1-V2)+G^2*(I2*V1-I1*V2))
400 F3=(B*X0+273.15*F1*K2-2502.7-F2-F1*K1*T0+F1^2*K1*K2/A)
410 F3=F3/(B-(F1*K2)^2/A)
420 IF F3 > X1 THEN 450
430 X=X1
440 GOTO 460
450 X=F3
460 T=T0-F1*(K1+X*K2)/A

```



```

470     E2=(E/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1))^2*4.19
480     L=.5*A*(T-T0)^2+.5*B*(X-X0)^2+J
490     L=L+F1*((K1+X*K2)*(T-273.15)+2502.7*X-E2)+Z*(X-X1)
500     IF L < 0 THEN 660
510     E1=(1+1.88*X)*(T-273.15)+2502.7*X
520     F7=H-(E1-E2)*G
530     X2=(E/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2))^2
540     F8=W-(X-X2)*G
550     PRINT
560     PRINT TAB(3);N;TAB(8);F7;TAB(19);F8;TAB(30);
570     PRINT F1;TAB(45);F2;TAB(55);T;TAB(65);X;TAB(75)
580     N=N-1
590     IF N <= 0 THEN 660
600     H=F7
610     W=F8
620     Y=F1
630     Z=F2
640     G=G
650     GOTO 310
660     N=3
670     G=G+.05
680     IF G <= G2 THEN 220
690     GOTO 1800
700     REM ***** CALCUL DES PARAMETRES DE CHAQUE ETAGE *****
710     REM ***** POUR DES DEBITS VARIABLES *****
720     /
730     INPUT "J(KJ/KG)=";J
740     INPUT "H1(KJ/KG)=";H1
750     INPUT "W1(KG/KG)=";W1
760     INPUT "Y1=";Y1
770     INPUT "Z1=";Z1
780     INPUT "G1=";G1
790     INPUT "G2=";G2
800     PRINT
810     PRINT "      "; "J(kJ/kg)";TAB(20);"H(N)";TAB(30);"W(N)"
820     PRINT
830     PRINT "      ";J;TAB(20);H1;TAB(30);W1
840     PRINT
850     PRINT "N";TAB(5);"H(kJ/kg)";TAB(15);"W(kJ/kg)";TAB(25);"Y";
860     PRINT TAB(35);"Z";TAB(45);"T(k)";TAB(55);"X(kg/kg)";TAB(65);"G"
870         G=G1
880         H=H1
890         Z=Z1
900         W=W1
910         Y=Y1

```

```

920 E=.24*H+32.6*W/(9.400001E-02+W)
930 I1=2*E*(C1*W+D1)/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1)^3
940 V1=2*E*(C2*W+D2)/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2)^3
950 I2=2*E*(A1*E^2+C1*E-3.064*(C1*W+D1))/(9.400001E-02+W)^2
960 I2=I2/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1)^3
970 V2=2*E*(A2*E^2+C2*E-3.064*(C2*W+D2))/(9.400001E-02+W)^2
980 V2=V2/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2)^3
990 F1=(Y-G*(Y*V2+Z*V1))/(1+G*(I1-V2)+G^2*(I2*V1-I1*V2))
1000 F2=(Y*G*I2+Z*(I1*G+1))/(1+G*(I1-V2)+G^2*(I2*V1-I1*V2))
1010 F3=(B*X0+273.15*F1*K2-2502.7-F2-F1*K1*T0+F1^2*K1*K2/A)
1020 F3=F3/(B-(F1*K2)^2/A)
1030 IF F3 > X1 THEN 1060
1040 X=X1
1050 GOTO 1070
1060 X=F3
1070 T=T0-F1*(K1+X*K2)/A
1080 E2=(E/((A1*W-B1)*E+C1*W+D1))^2*4.19
1090 L=.5*A*(T-T0)^2+.5*B*(X-X0)^2+J
1100 L=L+F1*((K1+X*K2)*(T-273.15)+2502.7*X-E2)+F2*(X-X1)
1110 IF L < 0 THEN 1240
1120 E1=(1+X*1.88)*(T-273.15)+2502.7*X
1130 X2=(E/((A2*W-B2)*E+C2*W+D2))^2
1140 F7=H-(E1-E2)*G
1150 F8=W-(X-X2)*G
1160 PRINT N;
1170 PRINT TAB(5);USING "###.###";F7;
1180 PRINT TAB(15);USING "#.###";F8;
1190 PRINT TAB(25);USING "##.###";F1;
1200 PRINT TAB(35);USING "###.###";F2;
1210 PRINT TAB(45);USING "###.##";T;
1220 PRINT TAB(55);USING "#.###";X;
1230 PRINT TAB(65);USING "#.##";G
1240 G=G+.05
1250 IF G < G2 THEN 880
1260 N=N-1
1270 IF N <=0 THEN 1800
1280 INPUT "H1=";H1
1290 INPUT "W1=";W1
1300 INPUT "Y1=";Y1
1310 INPUT "Z1=";Z1
1320 INPUT "G1=";G1
1330 INPUT "G2=";G2
1340 GOTO 870

```

```

1350 REM ***** CALCUL DE LA FONCTION DE BUT D'OPTIMISATION *****
1360 REM ***** DU SECHOIR A' COUCHE FLUIDISEES *****
1370 /
1380 /
1390 INPUT "J(kJ/kg)=";J
1400 INPUT "T(k)=";T
1410 INPUT "X(kg/kg)=";X
1420 INPUT "G=";G
1430 PRINT
1440 PRINT " " "J(kJ/kg)";TAB(30);"T0(k)";
1450 PRINT TAB(42);"X0(kg/kg)"
1460 PRINT " " ";J;TAB(30);T0;TAB(42);X0
1470 PRINT
1480 PRINT " N";TAB(5);"T(k)";TAB(15);"X(kg/kg)";TAB(25);
1490 PRINT " G";TAB(40);"F(kJ/kg)"
1500 J1=.5*(A*(T-T0)^2+B*(X-X0)^2+J)*G
1510 PRINT N;
1520 PRINT TAB(5);USING"###.##";T;
1530 PRINT TAB(15);USING"#.####";X;
1540 PRINT TAB(25);USING"#.###";G;
1550 PRINT TAB(40);USING"##.###";J1
1560 N=N-1
1570 IF N <= 0 THEN 1800
1580 INPUT " T(K)=";T
1590 INPUT " X(Kg/Kg)=";X
1600 INPUT "G=";G
1610 GOTO 1800
1620 REM ***** TRACES REPRESENTATIFS *****
1630 PRINT
1640 PRINT "Trace' De La Fonction De But D'optimisation ,
1650 PRINT "F(kJ/kg); en Fonction De J(kJ/kg) "
1660 PRINT
1670 PRINT "Trace' De La Temperature D'entree D'air Chaud;
1680 PRINT " en Fonction De J(kJ/kg) "
1690 PRINT
1700 PRINT "Trace' D'enthalpie H(kJ/kg) ,en Fonction ";
1710 PRINT "De L'humidite' W(kg/kg) Dans Un Diagramme Isothermique"
1720 PRINT
1730 PRINT "Trace' Du Debits G ;en Fonction De J(kJ/kg) "
1740 REM ***** VALEURS DES CONSTANTS *****
1750 /
1760 DATA 3,3.4625E-03,16710,293.15
1770 DATA 7.1114E-02,0.13913,16.448,5.0111
1780 DATA 5.2355,5.6037,457.28,183.65
1790 DATA 1,1.88,0.008,0.0001
1800 END

```

# BIBLIOGRAPHIE



- [1] Technique de séchage  
Cours du centre de perfectionnement des industries  
chimiques ENSIC - NANCY - France (1980).
- [2] F. Kneute  
le séchage Eyrolles (1959)
- [3] GOENEGA  
Séchage des solides et des liquides  
Technique de l'ingénieur J2710 - J28310 - K420
- [4] D. KUNZI - D. LEVENSPIEL  
Fluidization Engineering  
New York, J. Wiley, 1969.
- [5] M. Leva  
Fluidization New York, Mc Graw-Hill (1959)
- [6] V. Vanecek, M. Markvart et R. Drbohlav  
Fluidized Bed Drying  
Leonard Hill London 1966
- [7] H. DASCALESCU  
le séchage et ses applications industrielles  
Dunod Paris 1969
- [8] Thèse de Magister en génie chimique  
Etude cinétique du séchage - Conception d'un séchoir à lit  
fluidisé (Bentahar) Janvier 1983

[9] O.A. Hougen, P.W. Dodgen

The Drying of gases.

J. Edwards, Michigan, 1947.

[10] J. SZARGUT, R. Petela

Egzergia WNT, Warszawa, 1965.

[11] S. Sieniutycz

Metody optymalizacji procesów suszenia  
fluidyzacyjnego w ujęciu termodynamicznym, Prace  
Inst. Inż. Chem. P.W. 2(2), 71 (1973).

