

Bibliothèque

201

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET :

CINETIQUE DE SECHAGE

DE LA PATE A PAPIER

DE L'UNITE SONIC DE

MOSTAGANEM

Promoteur

Mr AMANOWICZ

Etudiant

Mouloud BELKESSAM

ENR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET : CINETIQUE DE SECHAGE

DE LA PATE A PAPIER

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
DE L'UNITE SONIC DE
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
MOSTAGANEM
BIBLIOTHÈQUE

Promoteur

Mr AMANOWICZ

Etudiant

Mouloud BELKESSAM

A mes parents

A mon frère et mes soeurs

A mes cousins

A tous mes amis

Je dédie ce modeste Travail.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sinceres remerciements à Mr AMANOWICZ
qui a proposé et dirigé ce travail.

Je tiens à remercier également :
M^{elle} ALIA pour l'amabilité avec laquelle elle a bien voulu assurer la
presidence du Jury.
Mr GROCHOWSKI , M^{elle} BENTAHAR pour avoir accepté d'en faire partie,
et tous les Professeurs et Assistants qui ont contribué à ma formation .

MEMBRES DU JURY
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

President : M^{elle} K. ALIA Maitre Assistante Chef du Departement
du Genie Chimique.

Examineurs : Mr GROCHOWSKI Maitre de conference à l'E.N.P.A.
M^{elle} BENTAHAR Assistante à l'E.N.P.A.
Mr AMANOWICZ Maitre de conference à l'E.N.P.A.

— T A B L E D E // //) /) A T I E R E —

	PAGE
INTRODUCTION.....	1
 <u>Chapitre I</u> : L'AIR HUMIDE	
I.1 Généralités.....	2
I.2 Définitions.....	2
I.3 Détermination des caractéristiques de l'air humide.....	4
I.4 Chaleur dans l'air humide.....	7
I.5 Diagramme de l'air humide.....	8
I.6 Mélange de variétés d'air humide.....	10
 <u>Chapitre II</u> : SECHAGE DES SOLIDES	
II.1. Généralités.....	12
II.2. Théorie et concepts fondamentaux.....	16
II.3. Période à taux constant.....	21
II.4. Période à taux décroissant.....	23
II.5. Temps de séchage.....	25
II.6. Remarque.....	27
II.7. Influence des facteurs externes et internes sur la vitesse de séchage.....	27
II.8. Comportement au séchage de certains matériaux.....	28
II.9. Dispositions en vue d'accélérer le transfert de chaleur de matière pour l'évaporation superficielle.....	30
II.10. Moyens à mettre en œuvre pour accélérer le séchage pendant la seconde période de séchage..	30
 <u>Chapitre III</u> : LES SECHOIRS	
III.1. Définition circuit aérodynamiques caractéristiques des séchoirs.....	31
III.2. Classification des séchoirs.....	34
III.3. Choix du séchoir devant traiter un corps déterminé.....	35
III.4. Calcul de la dimension de l'enceinte de séchage d'un séchoir continu.....	35
III.5. Base de calcul d'un séchoir.....	36

Chapitre IV : ETUDE EXPERIMENTALES.

IV.1. Simulation du problème.....	42
IV.2. Appareillages et mesures.....	42
IV.3. Manipulations.....	45
IV.4. (Résultats et interprétations.....	72

Chapitre V : SUGGESTIONS

V.1. Sechoirs à canaux avec cellules de séchage.	74
V.2. Sechoirs à canaux à une seule étape.....	74

I N T R O D U C T I O N

Du point de vue de l'economie et de l'exploitation, un produit ne doit être traité qu'en fonction des caractéristiques exigées. Le choix d'une méthode de séchage, doit tenir compte de la nature de la substance, de son état et éventuellement de sa préparation.

C'est ainsi que la pâte à papier façonnée en bande épaisse peut circuler librement sous l'effet de sa propre tension dans un sechoir à cannaux. Des procédés destinés à économiser la consommation de chaleur et d'accroître la productivité des installations déjà existantes sont recherchés et expérimentés.

Des conditions de séchage appropriées, répondent en grande partie à ces objectifs, pour minimiser les pertes de la production, lors d'un séchage rapide ou énergique.

Pour cela, une étude cinétique a fait l'objet de notre travail : elle nécessite la connaissance des bases théoriques et des essais de séchage.

I L'AIR HUMIDE :

I. 1. Généralités :

L'air atmosphérique dans lequel nous vivons renferme une proportion de vapeur d'eau. L'air parfaitement sec, exempt de vapeur d'eau, est une variété idéale par rapport à l'air courant qui est dit air humide.

Pour le cas du séchage avec l'air, on assimile l'air humide à un mélange de gaz parfaits, la loi de Dalton donne :

$$P = p_a + p_v \quad (1)$$

Si P est la pression totale de l'air humide, p_a et p_v designant respectivement les pressions partielles de l'air et de la vapeur d'eau.

I. 2. Definitions.

Toutes les variétés d'air humide, à une pression et une température donnés, se situent entre deux variétés extrêmes : l'air sec et l'air saturé qui renferme la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il lui est possible de renfermer dans les conditions de température et de pression ou il se trouve.

I.2.1. Degré hygrometrique.

La vapeur d'eau étant assimilable à un gaz parfait, le rapport des masses est égal au rapport des pressions. On peut écrire :

$$e = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (2)$$

p_v et p_{vs} designant respectivement la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide considéré et la pression de la vapeur saturante sèche à la même température (max). Ce rapport (e) est appelé humidité relative ou degré hygrométrique qui s'exprime souvent en pourcentage : m_v masse de vapeur d'eau contenue dans un certain volume V de l'air humide considéré et m_{vs} la masse de vapeur d'eau que contiendrait ce même volume V d'air humide à la température s'il était saturé.

Pour un air saturé on a : $P = p_{vs} \implies e = 1$

Pour un air quelconque on a : $P < p_{vs} \implies e < 1$

Pour un air sec on aurait : $p_v = 0 \implies e = 0$

Le degré hygrométrique (e) est donc toujours compris entre 0 et 1, ou entre 0 et 100 %.

I.2.2. Humidité absolue.

On appelle humidité absolue ou teneur en vapeur d'eau le rapport x entre la masse m_v de vapeur d'eau et la masse m_a d'air sec contenu dans un même volume V d'air humide.

Ainsi : $x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\text{kg d'eau dans l'air}}{\text{kg d'air sec}}$

I.2.3. Influence de la pression et de la température

L'application des lois de RAOULT et de DALTON donnent.

Pour x kg d'eau dans 1 kg d'air sec on a :

$$P_a V = R \theta \cdot \frac{1}{M_a} \quad (4)$$

$$P_v V = R \theta \cdot \frac{x}{M_v} \quad (5)$$

avec R constante des gaz parfaits (1 atm/k mole)

M_a g masse moléculaire de l'air

M_v g " " de la vapeur d'eau

en faisant le rapport de (4) sur (5)

$$\frac{P_a}{P_v} = \frac{M_v}{x M_a} \quad \text{d'ou}$$

$x = \frac{18}{29} \frac{P_v}{P_a}$ en remplaçant P_v et P_a en fonction de P et de e donné par les relations (1) et (2), on obtient l'expression suivante :

$$x = 0,622 \frac{e P_s}{P - e P_s} \quad (7)$$

pour l'air saturé on a :

$$x = x_s = 0,622 \frac{P_s}{P - P_s} \quad (8)$$

x_s étant donc la teneur en vapeur d'eau à la saturation, P_s pression de saturation à la température considéré.

Pour une pression totale constante, x_s ne varie qu'avec le température.

I.2.4. Degré de Saturation

Une troisième caractéristique hygrométrique de l'air humide est le degré de saturation donné par le rapport suivant.

$$e_s = \frac{x}{x_s} = e \frac{P - P_s}{P - e P_s}$$

Pour un air parfaitement sec $e_s = 0$

Remarques.

Si pour un air humide à la température θ et à la pression P , on connaît l'un des trois paramètres e , x ou e_s , on peut facilement à l'aide des relations précédentes, déterminer les deux autres : pour x donné, on a :

$$e = \frac{x}{x + 0,622} \cdot \frac{x_s + 0,622}{x_s} \quad (10)$$

$$e_s = x \frac{P - P_s}{0,622 P_s} \quad (11)$$

I.2.5. Point de rosée :

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau, contenue dans l'air humide, commence à se condenser à pression constante pour $x = x_s$, l'air est saturé, la température à laquelle la saturation est atteinte porte le nom de point de rosée.

I.3. Détermination des caractéristiques de l'air humide, mesure de l'humidité :

On utilise, pour déterminer l'état hygrométrique de l'air, plusieurs types d'appareils, parmi lesquels les plus employés sont :

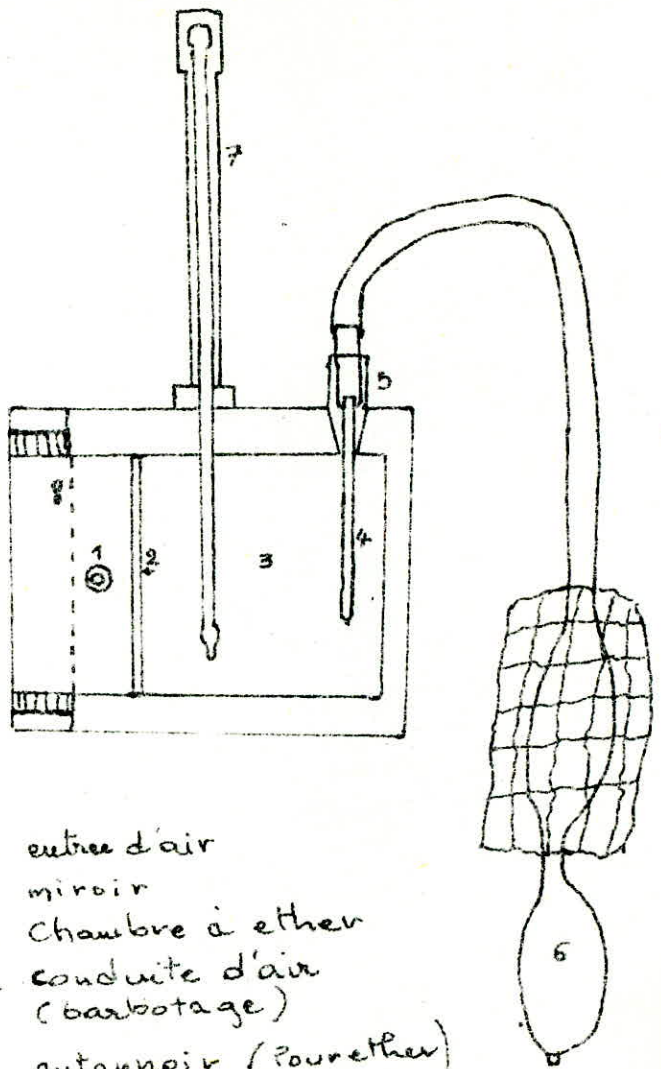
- L'hygromètre à cheveu relativement pour précis.
- L'hygromètre à condensation.
- Le psychromètre à deux thermomètres.

I.3.1. L'hygromètre à condensation : (fig. 1)

Offrant une plus grande précision que l'hygromètre à cheveu, il se compose d'une boîte métallique dont la face avant est polie et qui contient de l'ether (très volatil), dont on provoque l'évaporation rapide en y faisant barboter de l'air. Il résulte un refroidissement intense. La paroi polie ayant atteint la température correspondant à l'état de saturation de l'air environnant la vapeur d'eau se condense, il y a apparition de brouillard sur la plaque. La température de cette paroi est alors celle θ_R du point de rosée donnée par lecture du thermomètre plongé dans l'ether de la boîte; afin d'augmenter la précision on prend pour θ_R la moyenne arithmétique des températures auxquelles la buée apparait puis disparaît après le barbotage de l'air.

Connaissant θ_R , les tables de la vapeur d'eau donnent p_v , les mêmes tables fournissent la valeur de la pression P_{vs} qu'aurait la vapeur d'eau si elle était saturante à θ température ambiante.

On déduit alors : $e = \frac{P_v}{P_{vs}}$ (12)



- 1 - entrée d'air
- 2 - miroir
- 3 - Chambre à éther
- 4 - conduite d'air (barbotage)
- 5 - entonnoir (pour éther)
- 6 - Poire
- 7 - thermomètre
- 8 - verre (glace)

fig. 1. Schéma de l'hygromètre.

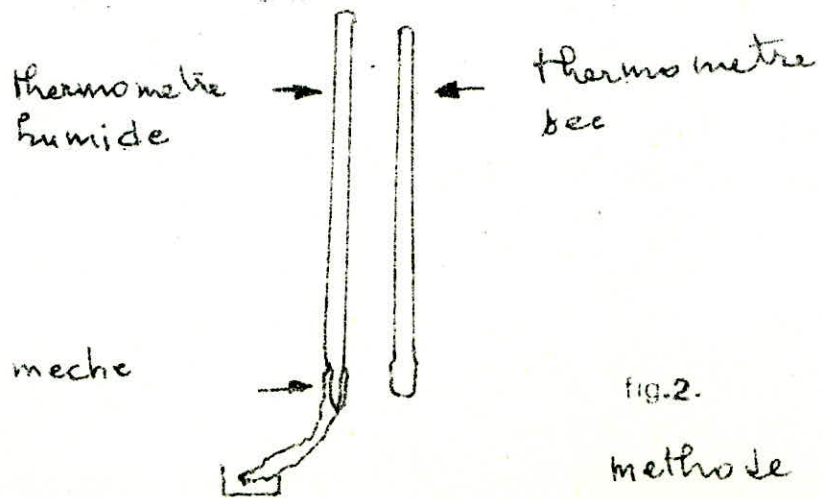


fig. 2.

méthode
psychrométrique.

Le raisonnement est le suivant : En refroidissant à pression constante, une masse d'air humide à une température θ , la masse d'eau qu'elle contient reste la même. De même que le rapport $\frac{P_v}{P}$: P_v pression partielle de vapeur et P celle de l'air.

A la température de rosée θ_R , à l'état de saturation la pression maximale de vapeur d'eau à θ_R n'est autre que P_v dans l'état initial à θ .

I.3.2. Le psychromètre à deux thermomètres. (fig 2)

Le psychromètre se compose de deux thermomètres dont l'un a son bulbe maintenu sec et l'autre dont le bulbe est maintenu humide grâce à une mèche imbibée d'eau.

- . Le thermomètre sec indique la température réelle θ de l'air humide considéré.
- . La vaporisation de l'eau contenu dans la mèche entraîne un abaissement de température de celle-ci : l'air en écoulement transfère donc par convection une partie de sa chaleur à la mèche.
- . Au bout d'un certain temps, un équilibre dynamique s'établit entre la chaleur gagnée et la chaleur perdue par le réservoir du thermomètre humide, la température indiquée, se stabilise à une valeur θ_h dite température de thermomètre humide.

La quantité d'eau qui s'évapore à la surface du bulbe humide est celle qui est nécessaire saturer l'air qui circule le long de cette surface; Elle est proportionnelle à la différence $(x_s - x)$ des humidités absolues de l'air saturé à θ_h et l'air étudié à θ avec $\theta_h < \theta$.

Il est possible de déduire les caractéristiques de l'air considéré, en connaissant simultanément les valeurs de θ et θ_h .

Soient :

- . m ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) la masse d'eau évaporée sur la surface du bulbe du thermomètre humide.
- . L_v (Kcal/kg) la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C .
- . C_{pa} (Kcal/kgdeg) la chaleur massique de l'air à pression constante (supposée constante).
- . C_{pv} (Kcal/kgdeg) la chaleur massique de la vapeur d'eau à pression constante (supposée constante)

La chaleur sensible de l'air humide, qui est évidemment égale à la somme des chaleurs sensibles de l'air sec et de la vapeur d'eau, a donc pour valeur.

$$(C_{pa} + x x_{pv}) \text{ Kcal/kg (d'air sec) deg.}$$

Raisonnement :

Un air humide non saturé renferme x kg d'eau par kg d'air sec, un air saturé en renferme x_s par kg d'air sec.

Donc par kg d'air sec, l'air humide considéré absorbe $(x_s - x)$ kg d'eau pour passer à l'état saturé.

La masse totale d'eau évaporée étant m kg par mètre Carré et par heure, il a donc circulé au contact du bulbe humide $m/(x_s - x)$ kg d'air sec par mètre carré et par heure et la chaleur abandonnée, dans le refroidissement de θ à θ_h est :

$$\frac{m}{x_s - x} (C_{p_a} + x_{pv}) (\theta - \theta_h) \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \quad (13)$$

Cette quantité est égale à celle qui a été absorbée par la vaporisation de m kg d'eau par mètre carré et par heure, à savoir mL_v , donc :

$$\frac{m}{x_s - x} (C_{p_a} + x_{pv}) (\theta - \theta_h) = mL_v \quad (13.1)$$

on tire x de l'expression (13.1)

$$x = \frac{L_v x_s - C_{p_a} (\theta - \theta_h)}{L_v + C_{pv} (\theta - \theta_h)} \quad (14)$$

Pour P pression atmosphérique du moment

θ thermomètre sec

θ thermomètre humide.

On tire p_s des tables pour θ et on déduit x_s par la formule (8)

Pour θ on tire de même L_v des tables et on calcul x par l'expression (14), connaissant x on peut facilement déduire les autres caractéristiques de l'air e et θ_R .

I. 4 Chaleur dans l'air humide

La chaleur totale de l'unité d'air humide à 0°C est égale à la somme des chaleurs Q_a du kilogramme d'air sec et Q_v de la masse x de vapeur d'eau. Pour l'air sec, on considère sa chaleur massique constante c_p et égale à $0,24$ kcal/kg $^\circ\text{C}$

$$Q_a = 0,24 \theta \text{ Kcal/kg.}$$

$$Q_v = 595 + 0,46 \theta \text{ Kcal/kg de vapeur.} \quad (15)$$

La chaleur totale serait :

$$Q = 0,24 \theta + (595 + 0,46\theta) x \text{ kcal.} \quad (16)$$

Si les évolutions s'effectuent à pression sensiblement constante; ce qui est le cas dans les calculs de conditionnement et de séchage, les chaleurs totales Q se confondent avec les enthalpies H de sorte sur l'expression précédente représente également la formule donnant l'enthalpie de l'unité d'air humide.

Remarque : Dans le cas le plus général, l'enthalpie d'un air humide s'exprimera par la somme.

$$h : h_{as} + h_v + h + h_{sol}$$

h_{as} , h_u , h et h_{sol} désignant respectivement les enthalpies de l'air sec, de la vapeur, de l'eau liquide et de la glace.

$$\begin{aligned} h_{as} &= 0,24 \theta \\ h_v &= 595 + 0,46 \theta \\ h &= \theta \\ h_{sol} &= 0,5 \theta - 80 \end{aligned}$$

Si x_v , x et x_{sol} sont les masses respectives de ces divers variétés continues dans l'air humide par Kilogramme d'air sec, l'expression de l'enthalpie s'écrira :

$$h = 0,24 \theta + x_v (595 + 0,46 \theta) + x \theta + x_{sol} (0,5 \theta - 80) \text{ Kcal/kg (1g)}$$

Si l'air ne remferme de l'eau que sous forme de vapeur

$$\begin{aligned} \text{On a } x &= 0 \\ x_{sol} &= 0 \end{aligned}$$

de sorte que l'expression précédente se réduit

$$h = 0,24 \theta + x_v (595 + 0,46 \theta) \text{ kcal/kg air sec.}$$

Ces transformations précédentes sont simplifiées dans la pratique par l'utilisation d'abaques ou de diagrammes spécialement établis.

I. 5. Diagrammes de l'air humide. fig. (3.45)

Les problèmes de séchage se traitent soit par le calcul, soit à l'aide de diagrammes. Il existe plusieurs types de diagrammes de l'air humide, qui diffèrent selon les combinaisons de variables indépendantes choisies.

Parmi les diagrammes utilisés, tous établis pour une pression totale constante de l'atmosphère, nous citerons principalement les trois suivants.

I.5.1 - Le diagramme de CARRIER. fig (3)

On porte en coordonnées rectangulaires l'humidité absolue x en ordonnée reliée à la température θ en abscisse.

Diagrammes de l'air humide

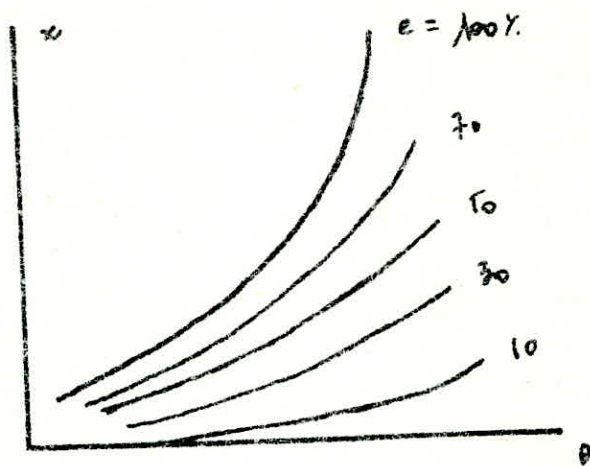


fig.3

Carrier

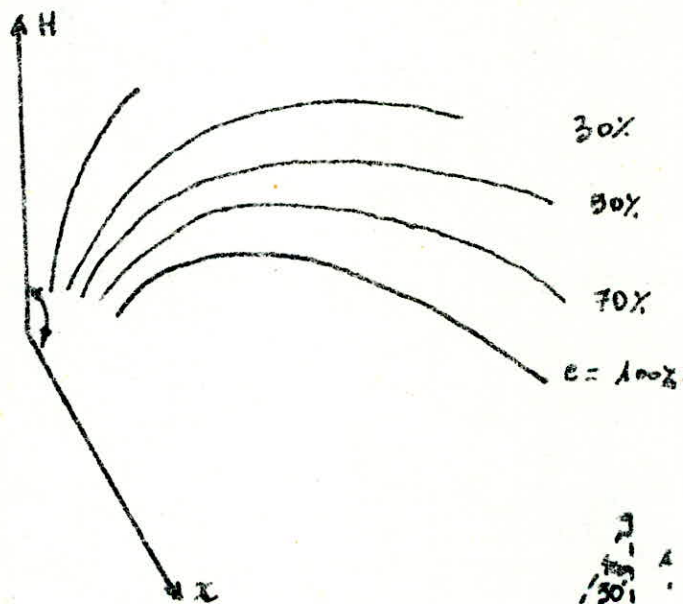


fig.4.

Mollier - Rangine

Veron - Casari

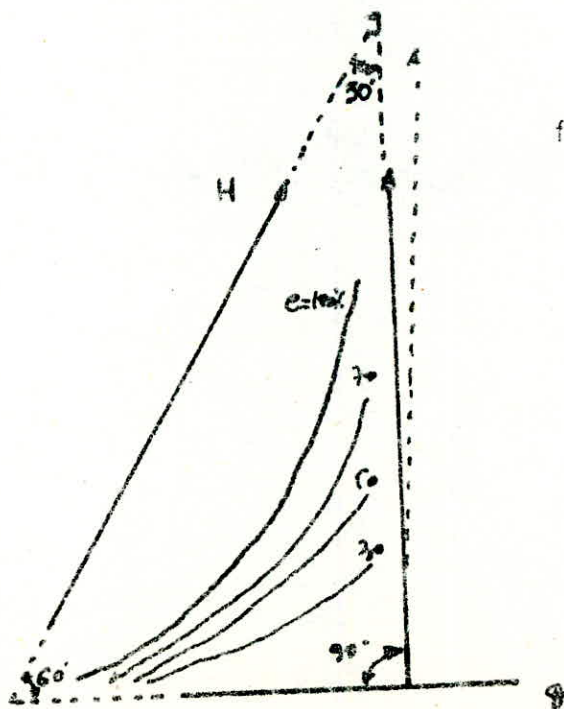


fig.5.

I. 5. 2 - Le Diagramme de Mollier - Ramzine . fig. (4)

C'est un diagramme h, x , reliant l'enthalpie de l'air humide à la masse d'eau qu'il contient par kilogramme d'air sec. On porte h en ordonnée et x en abscisse, les axes de coordonnées faisant un angle obtus de 150° . (établissement par Société Française VENTIL.

I.5.3. Le diagramme de Véron - Casari fig 5

Ne diffère du diagramme de Mollier - Ramzine que par le fait que l'angle des axes de coordonnées est aigu. Il est tracé en coordonnées (x, h) faisant un angle de 30° .

Cette angle est de 40° dans un diagramme analogue établi récemment par l'ASHAE (American society of heating and air conditioning Engineers)

I.6 Mélange de variétés d'air humide.

On mélange à pression constante, et sans échange de chaleur avec l'extérieur une masse m_1 d'air d'humidité absolue x_1 et à une température θ_1 avec une masse m_2 d'air d'humidité x_2 et à une température θ_2 les masses d'air sec contenus dans les deux variétés d'air sont respectivement :

$$m_{a_1} = \frac{m_1}{1 + x_1} \quad \text{et} \quad m_{a_2} = \frac{m_2}{1 + x_2} \quad (17)$$

et les masses d'eau $ma_1 x_1$ et $ma_2 x_2$.

Les caractéristiques du mélange noté avec un indice m sont calculés de la façon suivante :

La considération des masses d'air sec et d'eau se traduit par les deux relations

$$ma_m = ma_1 + ma_2 \quad (18)$$

$$ma_m x_m = ma_1 x_1 + ma_2 x_2$$

De ce système d'équation on tire immédiatement :

$$x_m = \frac{ma_1 x_1 + ma_2 x_2}{ma_1 + ma_2} \quad (19)$$

d'autre part le mélange s'effectuant de façon adiabatique l'équation calorimétrique s'exprime par :

$$ma_m h_m = ma_1 h_1 + ma_2 h_2$$

$$\text{d'où } h_m = \frac{ma_1 h_1 + ma_2 h_2}{ma_1 + ma_2} \quad (20)$$

des relations précédentes on tire :

$$\frac{ma_1}{ma_2} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1} = \frac{h_2 - h_m}{h_m - h_1} \quad (21)$$

donc connaissant les caractéristiques des deux variétés d'air, on peut déterminer x_m et h_m et on en déduit la température θ_m de mélange en résolvant par rapport à t_m l'équation :

$$h_m = 0,24 \theta_m + x_m (595 + 0,46 \theta_m) \quad (22)$$

ce qui donne

$$\theta_m = \frac{h_m - 595 x_m}{0,24 + 0,46 x_m} \quad (23)$$

Ces expressions s'interprètent très facilement sur les diagrammes. Soient, sur le diagramme (h, x) , 1 et 2 les points représentatifs des états des deux variétés d'air à mélanger.

Considérons la droite 1 - 2 qui relie ces deux points (fig. 6)

La relation $\frac{ma_1}{ma_2} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1}$ montre que le point représentatif du mélange se trouve sur la droite 1 - 2 et qu'il partage le segment 1 - 2 dans le rapport :

$$\frac{\overline{M 2}}{\overline{1 M}} = \frac{x_2 - x_m}{x_m - x_1} = \frac{ma_1}{ma_2} \quad (24)$$

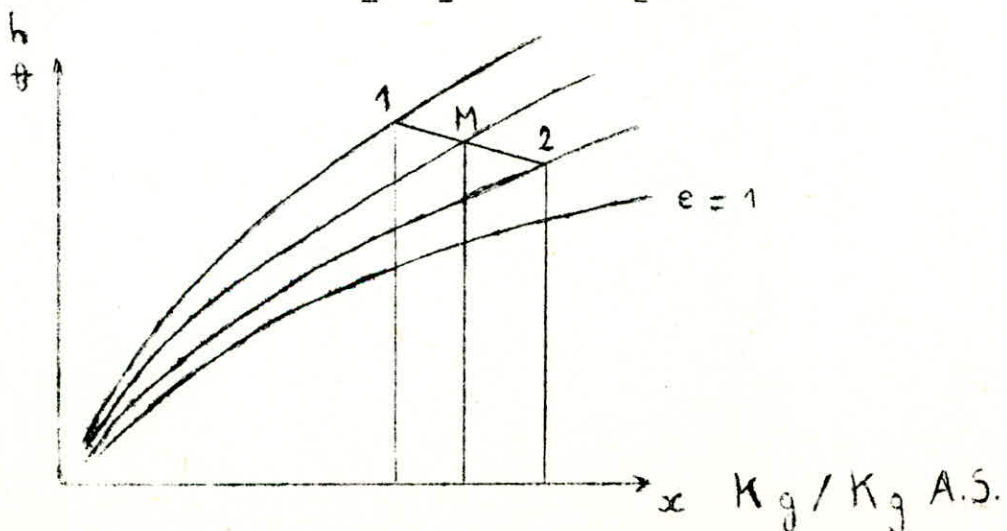


Fig. 6

II SECHAGE DE SOLIDES

II. 1. Généralités :

II. 1. 1. Thérminologie, définitions

- Séchage .

On comprend par séchage, l'action par laquelle on élimine totalement ou partiellement l'humidité absorbée dans les pores et les capillaires des substances solides, par évaporation.

- Humidité. En général c'est l'eau ou tout autre liquide contenu dans les corps solides.

- Corps humide. C'est tout corps solide ou liquide contenant de l'humidité; les mélanges hétérogènes dans lesquels un liquide constitue l'élément principal et que l'on désigne sous le nom de suspension, d'émulsions ou de dispersions, sont également appelés des corps humides.

- Corps séché. Corps sortant d'un séchoir à teneur finale en humidité x_f .

- Corps siccité. Corps débarrassé de toute trace d'humidité $x_f = 0$.

- Teneur en humidité x : c'est la quantité d'eau en (kg) rapportée à 1kg de matériau sec.

$$x = \frac{m_h - m_s}{m_s} = \frac{m_e}{m_s} \quad (1)$$

m_h . masse du produit humide (kg)
 m_s . " " " à siccité (kg)
 m_e . " d'eau (kg)

x , teneur en humidité ramené à la masse du corps sec est reliée à l'humidité X rapportée à la masse humide du produit, par les relations suivantes.

$$x = \frac{X}{100 - X} \cdot 100 \%$$

$$x = \frac{X}{1 - X} \quad (2)$$

$$X = \frac{x}{100 + x} \cdot 100 \% \quad (2')$$

- Humidité d'équilibre . C'est la teneur d'humidité limite atteinte lors du séchage. Elle varie en fonction de l'humidité relative de l'air, des conditions opératoires et de la nature du produit à sécher, voir courbes (fig. 7.8).

- Courbes d'équilibres.

Ces courbes nous permettent de suivre l'évolution de la teneur en humidité x du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air e . (fig 7.8.9)

Les courbes sont tracés en fonction de la teneur en humidité à l'équilibre, pour une température donnée. Elle servent à établir le point final du processus dans des conditions constantes. On en déduit, de même, les conditions de séchage dans un séchoir.

Ces courbes d'équilibres peuvent être mise en évidence par la théorie d'adsorption qui se rapprochent de celle de LANGMUIR, elles peuvent être calculées à l'aide d'une équation de B.E.T. LIKOV donne une relation empirique très simple qui ne demande que la détermination de deux constantes a et b

$$x_{eq} = a \frac{e}{b - e} \quad (3)$$

Dans le tableau suivant, LIKOV donne les valeurs d'équilibre de l'humidité de la cellulose en fonction de l'humidité relative de l'air en %.

e	10	20	30	40	50	60	70	80	90
x_e	3,0	4,4	6,0	7,6	9,3	11,3	13,9	17,5	22,0

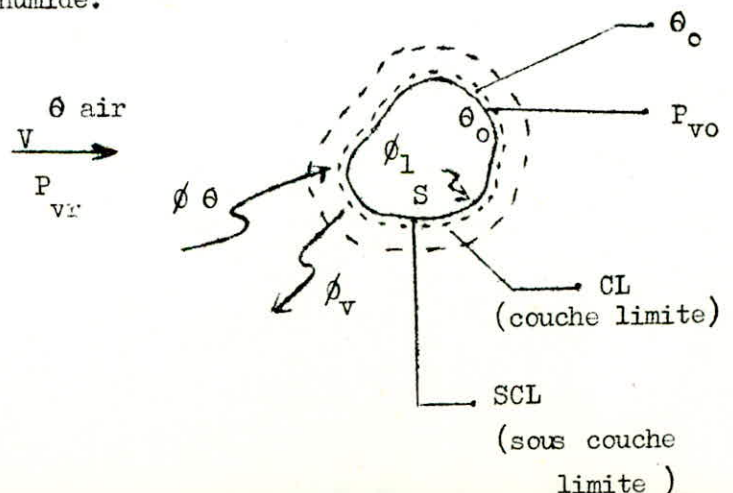
En traçant x_e en fonction de e on obtient la courbe (b) sur la figure N° 9.

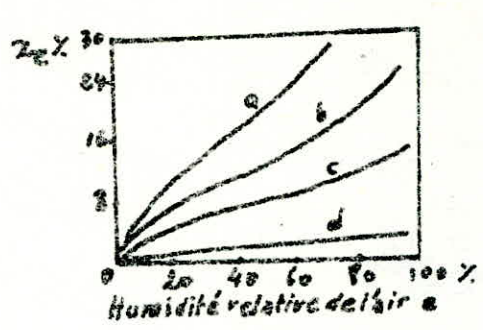
II. 1. 2. Considérations générales sur le séchage.

Soit un corps humide placé dans un séchoir, la surface S est entourée d'une mince couche d'air immobile maintenue à une température et une pression de la surface du corps humide.

soient :

- $\phi \theta$: flux de chaleur
- ϕ_v : " de vapeur
- ϕ_l : " de liquide.





- a - Feuilles de tabac
- b - Tissu en laine
- c - Colle
- d - Kaolin

fig. 7. Courbe d'équilibre de divers matières à 25°C

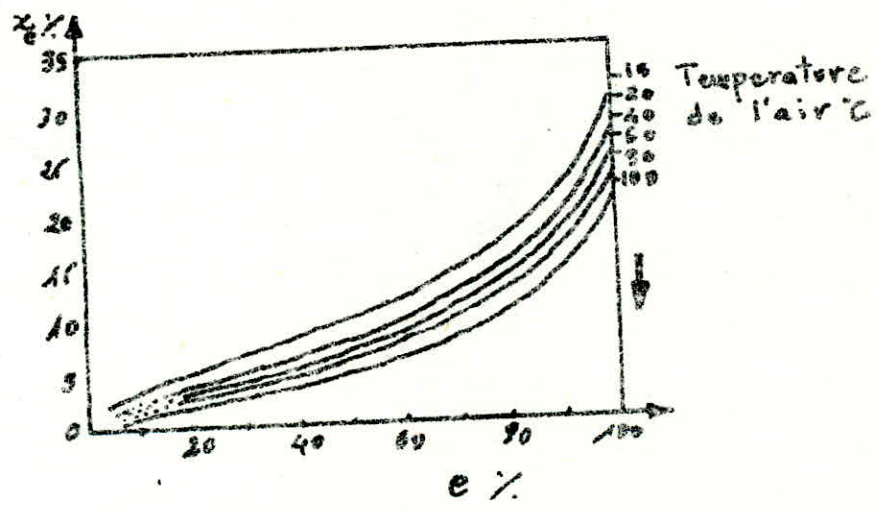
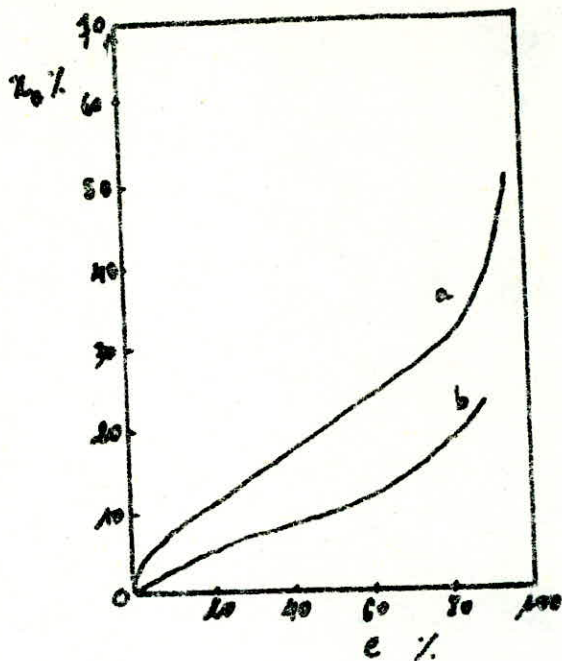


fig. 8. courbes d'équilibre z_e , e du bois à différentes températures (d'après I. Kov)



a - courbe d'équilibre (x_e, e) de l'hemicellulose extraite de l'Eucalyptus

b - Courbe d'équilibre x_e, e de la Cellulose d'après les valeurs recueillies par l'ICOR

FIG. 9.

Pour que le séchage puisse s'effectuer, il faut qu'à tout moment la tension de vapeur P_{vo} régnant dans la sous-couche limite soit supérieure à celle de l'air ambiant P_{vair} .

Il y a alors diffusion de vapeur, de la surface du corps humide vers l'atmosphère. La sous couche limite s'alimente constamment en molécules de vapeur qui sont passées de la phase liquide à la phase gazeuse en élevant de la chaleur au corps. Il y a donc autour de la surface S une double diffusion d'eau.

- diffusion à l'état liquide de l'intérieur vers la surface.
- diffusion à l'état gazeux de la surface vers l'extérieur.

Cette diffusion s'accompagne d'une diffusion de chaleur venant de l'extérieur du à l'existence du gradient de température entre l'air et le solide. Ce transfert est décrit par la loi de FOURIER.

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = a_s \nabla^2 \theta_s \quad (4)$$

avec a_s comme diffusivité thermique du solide.

Par analogie, le transfert de matière est décrit par la seconde loi de FICK.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \nabla^2 x \quad (5)$$

D coefficient de diffusion de l'humidité

$\nabla^2 x$: représente le laplacien $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial a^2} + \frac{\partial^2}{\partial b^2} + \frac{\partial^2}{\partial c^2}$

(en coordonnées trirectangulaires)

II.2 Théorie et concepts fondamentaux

II. 2. 1. Facteurs internes et externes.

L'influence du séchage d'un solide peut être due aux mécanismes internes du mouvement de l'humidité, et de l'effet des facteurs externes (température, humidité air, vitesse de l'air ...)

II. 2. 1. 1. Mécanismes internes du mouvement de l'humidité :

Le mouvement du liquide à l'intérieure de la substance, peut se faire par divers mécanismes dépendant de la structure du solide.

Les mécanismes possibles sont les suivants :

- diffusion dans des solides
- capillarité dans les solides granuleux et poreux.

- mouvement du au gradient de pression
- mouvement causé par gravité
- mouvement causé par la phase condensé (vapeur)

En général, un seul mecanisme predomine pour un temps donne de sechage d'un solide, mais l'on peut distinguer different mecanismes dans different temps de séchage.

Le mécanisme particulier controlant la cinétique de séchage d'un solide peut être determiné par l'etude du gradient d'humidité interne.

On peut expérimentalement connaître sa nature : .HOUGEN, MAC COULEY, et MARSHALL (PERRY), ont déterminé pour les cas de diffusion et capillarité deux courbes caracteristiques des modes de mouvement de l'humidité. Ces courbes indique que le mouvement par capillarité est caracterisé par une courbe (fig. 10) presentant un point d'inflexion, quand au mouvement par diffusion est représenté par une courbe regulière, prevus par les equations de diffusion (fig 11). Dans ces courbes, l'effet de l'humidité sur le coefficient de diffusion qui depend toujours de l'humidité, Les equations de diffusion suppose que le coefficient de diffusion constant ^{est} pour une approximation dans ces cas.

Ainsi les auteurs chassent les solides suivant deux modes de mouvement de l'humidité.

- par capillarité
- par diffusion.

2. 1.1.1. Mouvement par capillarité : L'humidité contenue dans les interstices du solides, comme liquide superficiel, on comme humidité libre dans les cavités se propageant ^{par} gravité et par capillarité stipule que des chemins de passage pour (canaux capillaire) ~~de~~ courant continue sont present. Dans le sechage, le courant liquide resultant par capillarité, s'applique à toute humidité au dessus du point de saturation de la fibre, dans le cas des textiles, papier et mit, et pour toute humidité au dessus de l'humidité d'equilibre au point de saturation dans le cas des poudres fines et solides granuleux, comme par exemple les argiles et sable.

II.2 . II.2 Diffusion

Diffusion de la vapeur : L'humidité peut se mavoir par diffusion de la vapeur à travers le solide, stipulant qu'une gradient de temperature est etabli par chauffage, Creant ainsi un gradient de pression de vapeur.

- Diffusion du liquide : Le mouvement du liquide par diffusion dans les solides est restreint à l'humidité d'equilibre contenue au dessous du point de saturation de l'air et pour les systemes ou l'humidité et le solide sont ~~mutuellement~~ ~~déssout~~.

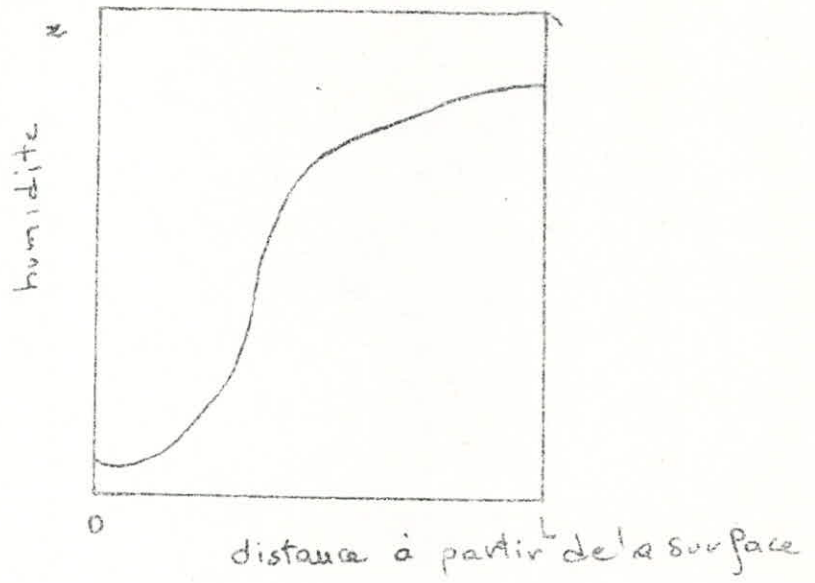


FIG. 10. a - mouvement par capillarité

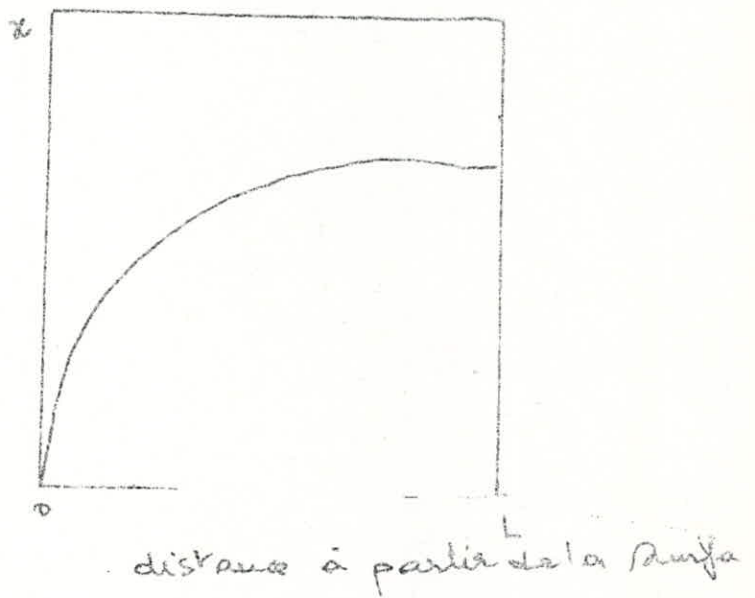


FIG. 11. b - mouvement par diffusion.

Le premier cas s'applique au dernier stade dans le séchage des argiles, amidon, farine, textiles papier et bois. Le second cas concerne le séchage des savons, celle, gélatine et pâtes.

II. 2. 1. 2. Facteurs externes

L'étude du séchage est basée sur l'effet des facteurs externes, est en général la méthode la plus commune, utilisée pour la recherche des caractéristiques de séchage pour les solides. Ceci parce que, les résultats obtenus sont souvent directement applicables pour les calculs de sechoirs. Les principaux facteurs externes entrant dans une étude de séchage sont la température, l'humidité, la vitesse de l'air, l'état du solide, une éventuelle agitation du solide, le mode de support ou de transport du solide et le contact entre surfaces chaudes et corps humide; toutes ces variables n'entrent pas nécessairement dans un même problème.

II. 2.2 Cinétique de séchage :

Le séchage, transfert simultané de matière et de chaleur est souvent caractérisé par des courbes de séchage. Elles décrivent l'évolution de l'opération en fonction du temps; soit dans des conditions constantes pour un produit au repos soumis à un passage de fluide; soit dans des conditions variables pour un produit au repos ou mobile soumis à un passage de fluide (cas industriel).

Pour une température, une vitesse et humidité fixés de l'air s'écoulant sur un échantillon de la substance étudiée, après pesée du produit à sécher à des intervalles de temps déterminés, on trace la courbe qui donne la teneur en humidité de ce produit en fonction du temps (figure 12 a).

En différenciant cette courbe, on obtient la modification de l'humidité du produit en fonction du temps (fig b).

Cette modification rapportée à l'unité de surface est appelée vitesse de séchage.

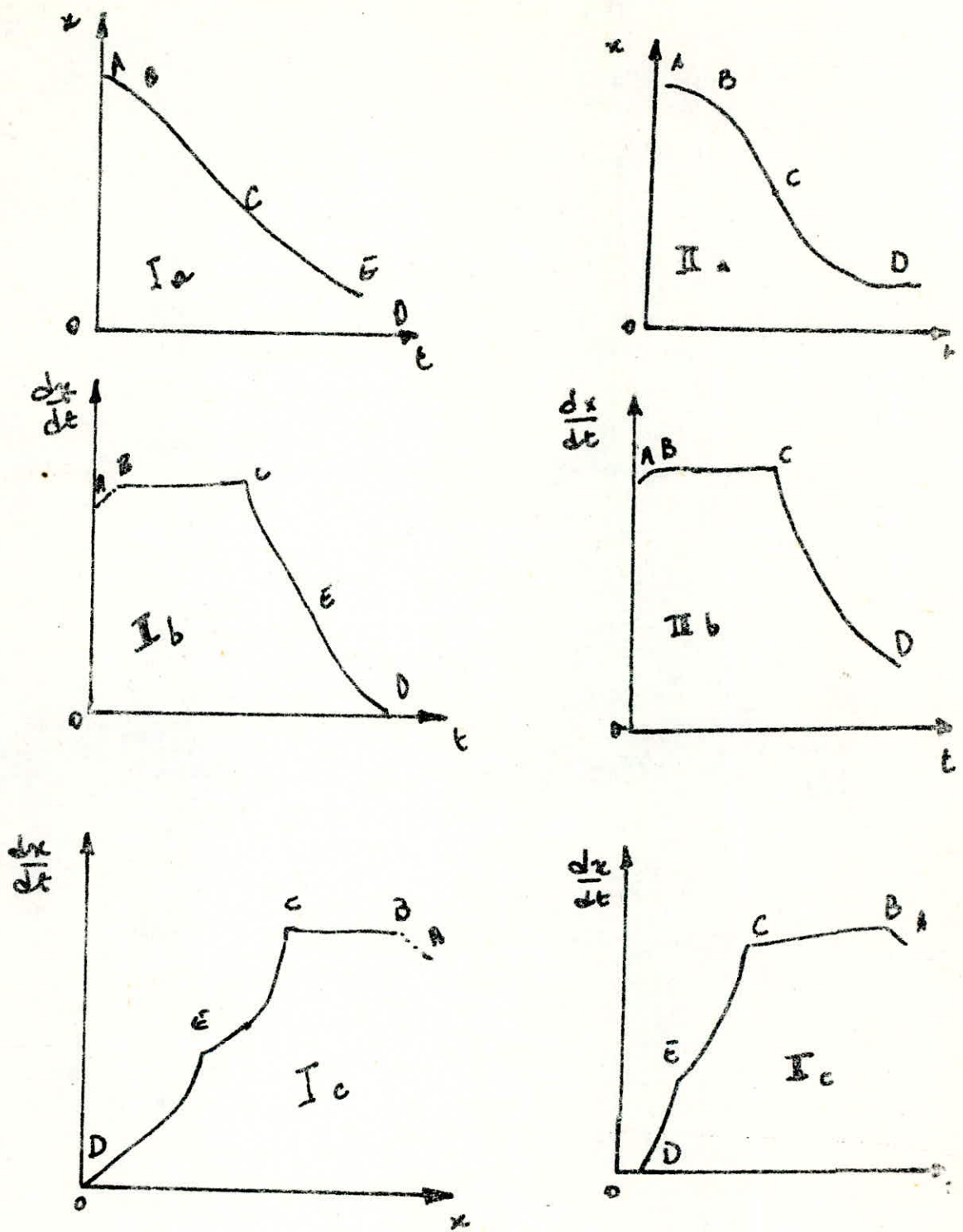
En portant $-\frac{dx}{dt}$ en fonction de x on obtient la courbe (c)

Les courbes (b) et (c) montrent que le phénomène de séchage se divise en deux périodes caractéristiques

- l'une à vitesse de séchage constante.
- l'autre où cette vitesse présente un ralentissement.
- les courbes I a, b, c correspondent au séchage de solides non poreux.
- les courbes II a, b, c correspondent au séchage de matériaux plus ou moins poreux.

(a) Les sections B C (cas. I et II) représentent les premières périodes de séchage à taux constant.

(b) - les portions B C (I) sont dite deuxième période de séchage à taux décroissant dans le cas de corps non poreux.



Courbes de sechage

FIG. 12.

- Les portions C E et E D qui sont la 2^e et 3^e période de séchage représentent respectivement la 1^{er} et 2^e périodes à taux décroissant de solides poreux qui en globent en Général la deuxième périodes de sechage à taux décroissant.

On remarque que la période à taux décroissant commence quand l'humidité critique x_c est atteinte au point c sur les figures I et II.

II. 3 Période à taux constant.

Dans cette période, l'humidité gagne si rapidement la surface que la pellicule d'eau 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 liquide (évaporation superficielle).

C'est le transfert de matière de la surface de solide vers l'atmosphère (courant gazeux) qui contrôle la cinétique du séchage. La loi de la diffusion de la vapeur d'une surface liquide à travers un film stationnaire, vers un courant gazeux est décrite par la relation suivante.

La vitesse, la température et l'humidité de courant d'air restant constantes on a :

$$\frac{dx}{dt} = K S (p_{vo} - p_{vair}) \quad (6)$$

$\frac{dx}{dt}$: vitesse de sechage

k : coefficient de transfert de matière

s : surface d'échange

P_{vo} : pression de vapeur d'eau à la surface du solide

P_{vair} : pression partielle de vapeur d'eau dans le courant d'air

En se basant sur la similitude existant entre l'échange de la chaleur et celui de la matière, on peut exprimer la vitesse de surcharge comme suit.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{h S (\theta - \theta_s)}{\lambda}$$

h coefficient de transfert de chaleur (convection)

S surface d'échange

λ chaleur latente de vaporisation de l'eau à θ_s

$\theta - \theta_s$: θ température de l'air

θ_s température de la surface d'évaporation (température du solide).

Il est évident pour les équations 6 et 6', que la vitesse de séchage à condition constante dépend de trois facteurs.

- Le coefficient de transfert de chaleurs ou de masse
- La surface exposée au milieu séchant
- La différence de température ou d'humidité, entre le courant d'air et la surface humide de solide.

Ces trois facteurs sont des variables externes.

Le mécanisme interne du courant liquide n'affecte en rien les expressions précédentes 6 et 6', car comme on l'a déjà cité, c'est une évaporation superficielle influencée par des facteurs externes.

Dans des phénomènes de convection, le coefficient de transfert de chaleur dépend de la géométrie du système de la vitesse du gaz et de ses propriétés et de la nature du système.

Pour un écoulement laminaire le long d'une plaque lisse, on obtient d'après POHLHAUSEN.

$$Nu_1 = \frac{h l}{\lambda} = 0,332 Re_1^{1/2} Pr^{1/3} \quad (7)$$

l : longueur de la plaque depuis le début de la plaque

h : coefficient local de transmission de chaleur.

Pour le cas du calcul du coefficient moyen de transmission de chaleur, après transformation on obtient.

$$Nu_m = \frac{h_m l}{\lambda} = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (8)$$

Pour un écoulement turbulent et toujours pour une surface lisse, JURGES donne.

$$Nu_m = 0,057 Re_1^{0,78} Pr^{0,78} \quad (9)$$

$$Re_1 = \frac{ul}{\nu} > 500\ 000 \quad Pr = 0,71 \text{ pour l'air} \quad (10)$$

Les valeurs de matière sont évaluées, pour des températures moyennes :

$$\theta_m = \frac{1}{2} \left(\theta_0 + \frac{\theta_{air1} + \theta_{air2}}{2} \right) \quad (11)$$

θ_{air1} et θ_{air2} : respectivement, températures au début et à après passage le long de la plaque.

θ_0 : température de la plaque

l'égalité reste valable pour des plaques lisses.

Dans le cas de surfaces plus ou moins rugueuse, on doit prendre pour une valeur superieur de 5 %.

on a alors:

$$Nu_m = 0,06 Re_1^{0,78} Pr^{0,78} \quad (12)$$

Remarque : l'utilisation du coefficient de transfert de chaleur est préférable dans l'estimation de la vitesse de séchage, car elle n'entraîne pas une très grande erreur relativement à celle donner par le coefficient de transfert de matière.

II. 4 Periode à taux de croissant (deuxième periode de séchage)

Au dernier stade de l'évaporation superficielle, quand l'humidité critique est atteinte (au point c sur les courbes de séchage) la seconde de sechage commence.

La résistance au transfert de matière entre la surface et l'air ambiant est négligeable par rapport à la résistance intérieure, qui rend plus difficile le transport de l'humidité à l'intérieur de la substance. Les forces motrices principales qui se superposent dans ce transport sont les forces capillaires et les forces de diffusion, donc c'est les propriétés de la matière à sécher qui contrôle dans ce cas la vitesse de sechage.

Selon la predominance d'une propriétés par rapport à l'autre, on note deux theories sur le mouvement de l'humidité à l'interieur du solide.

- 1) - diffusion moléculaire
- 2) - theorie capillaire.

II. 4.1. Diffusion moléculaire.

Quand c'est la diffusion moléculaire qui controle la seconde période de séchage, l'equation de FOURIER sur le transfert sz chaleur peut être utiliser pour décrire le mouvement de l'humidité. SHERWOOD a résolu l'équation de diffusion dans des conditions constantes; il obtient:

$$\frac{x - x_e}{x_c - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \left(\exp(-n_1 t) + \frac{1}{9} \exp(-9nt) + \frac{1}{25} \exp(-25 nt) + \dots \right) \quad (13)$$

$$\text{où : } n = \frac{D_1 \pi^2}{4 d^2}$$

- D_1 - coefficient de diffusion de l'humidité à l'interieur du solide.
- x , x_c , x_e - respectivement (humidité au temps t , humidité critique, humidité d'équilibre).
- d - épaisseur totale de la plaque (si le séchage se fait sur une face)
(elle sera de moitié pour un séchage bilatéral)
- t - temps (du debut de la seconde période)

Cette équation (N° 13) suppose D_1 et constant, or D_1 le reste rarement, mais varie avec l'humidité et de la température.

On peut négliger les termes secondaires de l'équation (13) pour un temps de séchage long. On obtient:

$$E = \frac{x - x_e}{x_c - x_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-nt) \quad (14)$$

En dérivant cette équation (14) on obtient après transformation l'expression de la vitesse de séchage.

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\pi^2 D_1}{4d^2} (x - x_e) \quad (15)$$

$\frac{dx}{dt}$ vitesse de séchage

En portant sur une échelle semi-logarithmique E en fonction de $\frac{D_1 t}{d^2}$, on obtient la courbe A sur la figure N° (13) pour des valeurs de E < 0,6.

II. 4. 2. Theorie Capillaire :

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

$$\frac{dx}{dt} = - k_1 (x - x_e) \quad (16)$$

avec k_1 qui est fonction de la vitesse de séchage à taux constant.

$$k_1 = \frac{- \left(\frac{dx}{dt} \right)_c}{x_c - x_e} \quad (16')$$

$\left(\frac{dx}{dt} \right)_c$ est donnée par l'équation à taux constant.

d'où

$$k_1 = - \frac{h (\theta - \theta_s)}{\rho_s \lambda d (x_c - x_e)} \quad (16'')$$

d'où l'équation de séchage.

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_d = - \frac{h (\theta - \theta_s) (x - x_e)}{\rho_s \lambda d (x_c - x_e)} \quad (17)$$

II. 5. Temps de sechage.

La durée totale de séchage est la somme de la durée de séchage à taux constant et de celle de la seconde période.

II. 5. 1. Temps de la première période.

Elle est obtenue à partir de l'équation de transfert de chaleur initial (6 ou 6')

$$t_c = \frac{x_0 - x_c}{(dx/dt)_c} \quad (18)$$

$$t_c = \frac{(x_0 - x_c) \rho_s \lambda d}{h (\theta - \theta_s)_m} \quad (18')$$

où x_0 est la teneur en humidité initiale.

$$(\theta - \theta_s)_m = \frac{(\theta_1 - \theta_s) - (\theta_2 - \theta_s)}{\ln (\theta_1 - \theta_s) / (\theta_2 - \theta_s)} \quad (19)$$

- θ_1 - température d'entrée d'air
- θ_2 - " de sortie "
- θ_s - " du solide
- d - épaisseur du solide
- λ - chaleur latente de vaporisation à θ_s
- ρ_s - densité volumique du solide sec.

II. 5. 2 Temps de la seconde période

Le temps de séchage pour chaque cas peut être obtenu par intégration des équations donnant la vitesse de séchage.

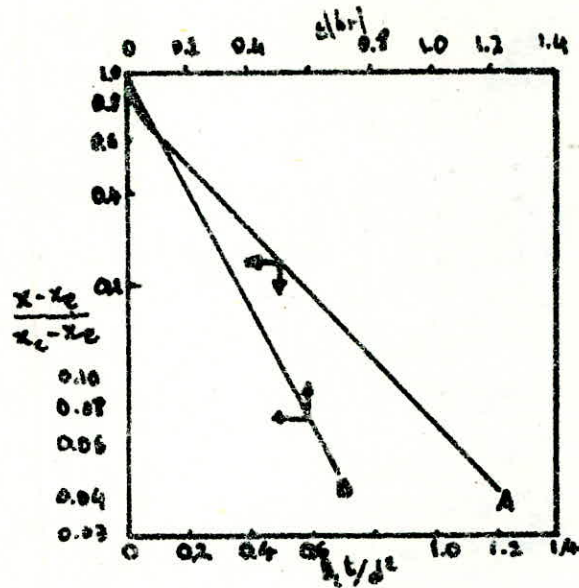
II. 5.2.1 Théorie capillaire.

$$t_d = \frac{\rho_s d \lambda (x_c - x_e)}{h (\theta - \theta_s)} \ln (x_c - x_e) / (x - x_e) \quad (20)$$

II. 5.2.2 Diffusion moléculaire

$$t_d = \frac{4 d^2}{D \pi^2} \ln (x_c - x_e) / (x - x_e) \quad (21)$$

d'où la durée totale : $t_d + t_c$ (22)



A - courbe E: $\frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-0,25 E \frac{\pi^2}{d^2}}$ (théor.)

B - courbe E: $\frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = e^{-bE}$ (expériment.)

pour $E < 0,6$

FIG. 13.

II. 6 Remarque

Pour la détermination expérimentale du mode de mouvement de l'humidité à l'intérieur du solide, on doit tracer la courbe $(x - x_e)/(x_c - x_e)$ en fonction du temps sur une échelle semi - logarithmique. Si on obtient une droite comme la courbe (B) de la figure (13) et que la pente obtenue est égale à k_1 calculé de l'équation (16 - 16') le mouvement se fait par capillarité. Si non l'écoulement de l'humidité se fait par diffusion moléculaire et la pente de la droite serait égale à

$$\text{pente} = (\overline{\gamma}^2 D_e) / (4 d^2) \quad (23)$$

II. 7 Influence du facteurs externes et interne sur la vitesse de séchage.

II. 7.1 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 ou de chaleur, dans le cas de l'évaporation superficielle. Au moyen des équations de transfert de chaleur et de matière, on peut toujours relier les deux coefficients de transfert entre eux. d'Après les recherches de SHEPHERD auteur d'un diagramme donnant la vitesse de séchage avec le mélange air - eau avec les températures du corps humide et de l'air, supposent que le coefficient de transfert de matière augmente comme la 0,8^{eme} puissance de la vitesse de l'air.

Donc, la vitesse de séchage est d'autant plus grande que la vitesse de l'air est importante.

Par contre, elle n'a aucune influence sur la vitesse de séchage à taux décroissant.

II. 7. 2. Influence de l'humidité de l'air.

D'après la relation (6), la vitesse de séchage est directement proportionnelle au gradient de pression de vapeur de la surface du solide et de l'air, qui est liée au gradient de température.

Pour une tension de vapeur donné P_{vo} (du solide), la vitesse du sechage est d'autant plus grande que la tension de vapeur de l'air de séchage sera plus faible.

On remarque qu'une diminution de cette dernière entraîne une augmentation de la consommation thermique qui est directement proportionnelle au gradient de pression de vapeur.

II. 7. 3. Influence du gradient de température

Dans le cas ou le séchage se fait par convection, le séchage est accélérée par une augmentation de la température de l'air: puisque en augmentant θ_{air} , le gradient $\theta_{air} - \theta_s$ croit, ainsi la vitesse de séchage se trouve accélérée. Mais souvent ou est limité dans cette voie par les risques de cassure par tensions internes du corps humide.

On choisira cependant, la température la plus élevée possible que le corps puisse supporter pour faciliter aussi la diffusion liquide. puisque coefficient de diffusion augmente avec la température suivant la loi :

$$D = A \theta \exp (- B / R\theta) \quad (24)$$

où : A et B sont constantes positives.

II. 7. 4. Influence de la géométrie du solide

Dans le cas de la diffusion le rapport E de l'équation (14) est fonction de :

- $E = (x - x_e) / (x_c - x_e) = f (D_1 t / d^2) \quad (25)$ pour une plaque

Plane dont les bords sont scellés de dimensions : épaisseur 2d.

- Diffusion dont les bords latéraux de la plaque sont fermés de dimensions épaisseur 2d . longueur 2a

$$E = f \left(\frac{D_1 t}{d^2} \right) f \left(\frac{D_1 t}{a^2} \right) = E_d E_a \quad (26)$$

- Diffusion pour une plaque parallélepédique diffusant des 6 faces; dimensions épaisseur 2d . longueur 2a . largeur 2b.

$$E = f \left(\frac{Dt}{d^2} \right) f \left(\frac{Dt}{a^2} \right) f \left(\frac{Dt}{b^2} \right) = E_d E_a E_b \quad (27)$$

Voir fig. (14)

- Diffusion pour une sphère de rayon a.

$$E = g \left(\frac{Dt}{a^2} \right) = E_s \quad (28)$$

- Diffusion pour un cylindre dans les bases sont fermés rayon de base a.

$$E = g' \left(\frac{D t}{a^2} \right) = E_R \quad (29)$$

- Diffusion pour un cylindre complet rayon de base a et de longueur 2c.

$$E = f \left(\frac{Dt}{a^2} \right) g' \left(\frac{Dt}{d^2} \right) = E_a E_R \quad (30)$$

les fonctions $g \left(\frac{Dt}{d^2} \right)$ et $g' \left(\frac{Dt}{d^2} \right)$ sont représentées dans la figure (14)

II. 8 Comportement au séchage de certains matériaux

Les matériaux soumis au s...

se déforment à cause des

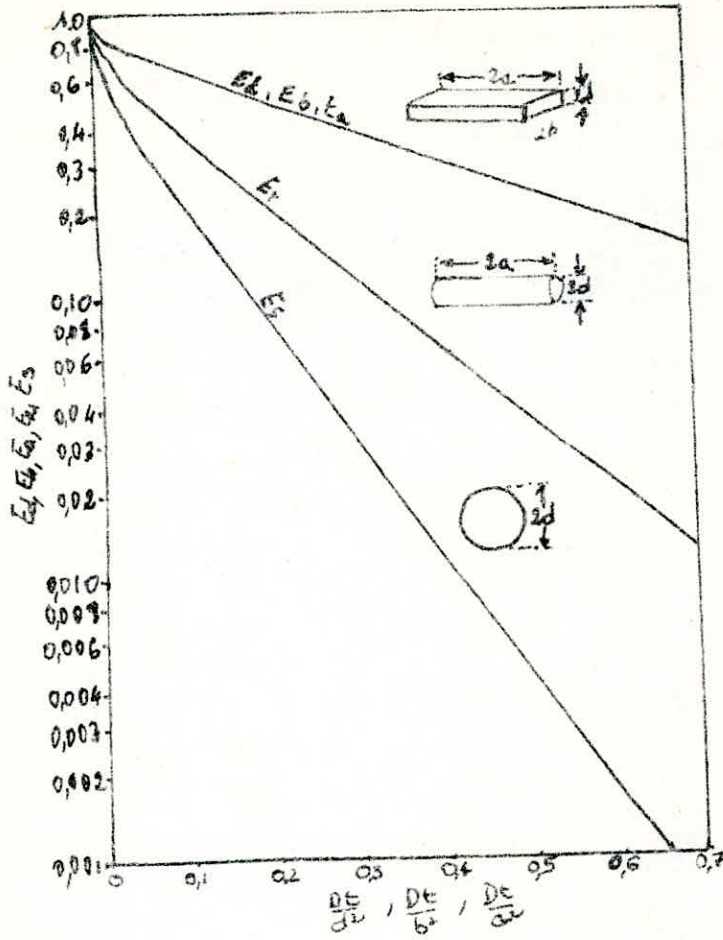


FIG. 14.

variations des tensions internes au passage d'un degré d'humidité à l'autre ou par l'apparition de tensions nouvelles dues à des phases antérieures au séchage.

On distingue ces déformations selon les catégories suivantes :

- contraction linéaire, de surface ou de volume
- formation de crevasses dues à la distribution non uniforme de l'humidité dans le matériaux.
- Changements structurels sous l'effet de la température.

La vitesse de sechage est considérablement influencée par l'apparition de fissures ou par la réduction des surfaces par contractions.

II. 9. Dispositions en vue d'accélérer le transfert de chaleur et de matière pour l'évaporation superficielle.

Le mode d'écoulement de l'air est primordial. Le coefficient de transfert de matière varie, pour une écoulement autre que parallèle. Si l'on tourne la plaque avec une inclinaison d'incidence par rapport à l'écoulement w , le coefficient de transfert de matière augmente et atteint le maximum pour $w = 90^\circ$.

L'épaisseur de la couche limite laminaire peut être réduite par des dispositifs appropriés qui augmente la turbulence de l'air.

- Exemple :
- Plaques perforées disposées à faible distance de la surface du produit.
 - Obstacles à l'écoulement...

II. 10 Moyens à mettre en oeuvre pour accélérer le sechage pendant la seconde periode de sechage.

Dans cette période la vitesse de l'air n'a aucune influence sur la vitesse de sechage. Seule compte le gradient de temperature ou de pression.

Dans tout les cas de sechage par convection une augmentation de température de l'air permet d'accélérer le sechage, mais souvent on est vite limité dans cette voie par les risques de cassures par tensions internes du corps humide.

III LES SECHOIRS :

III. 1. 1. Définition d'un séchoir :

Les moyens à mettre en oeuvre pour réaliser l'opération de séchage peuvent-être très variés.

En général, un séchoir est constitué essentiellement :

- d'une enceinte de séchage
- d'un circuit aéraulique
- d'appareils de manutention du corps humide

III 1. 2. Les différents types de séchoirs schéma (15)

III 1.2.1. Enceintes de séchage :

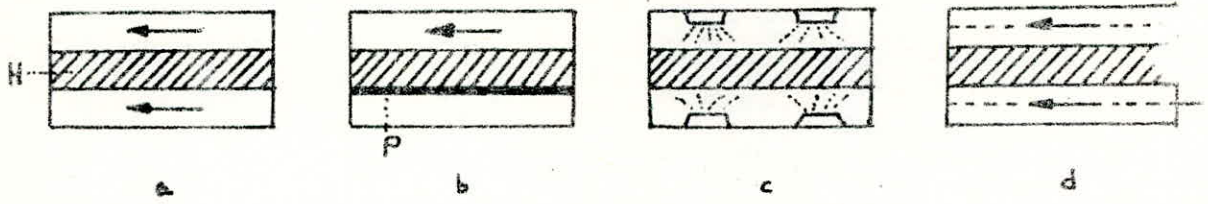
Un corps humide placé dans un séchoir, doit être chauffé (apport de chaleur) pour évaporer l'eau et il faudra évacuer la vapeur produite . Ces deux opérations concomitantes, s'effectuent dans l'enceinte de séchage . La manière dont la chaleur est transmise constitue un premier élément de classification des enceintes à convection, à conduction, à rayonnement .

III 1.2.2. Circuit aéraulique associé

L'évacuation de la vapeur nécessite un circuit aéraulique; départ d'air humide combiné avec une entrée d'air sec. Lorsque la chaleur est cédée par un mode de transmission autre que par convection, le circuit aéraulique associé le plus simple est le circuit ouvert et il est souvent combiné avec un réchauffage de l'air. Lorsque le chauffage est réalisé par convection le circuit aéraulique est plus complexe et comporte plusieurs variantes (voir schéma 15) nous les étudierons en détail ultérieurement .

III 1. 3. Données d'établissement et caractéristiques de d'un séchoir :

L'utilisateur d'un séchoir doit en premier lieu préciser l'emploi général qu'il désire faire de son appareil et indiquer dans le détail les opération de séchage qu'il entend y réaliser:



H. corps humide
 P. Plaque chauffante

Schemas des enceintes de Sechage par :

- a. Convection
- b. Conduction
- c. Rayonnement
- d. Pertes dielectriques

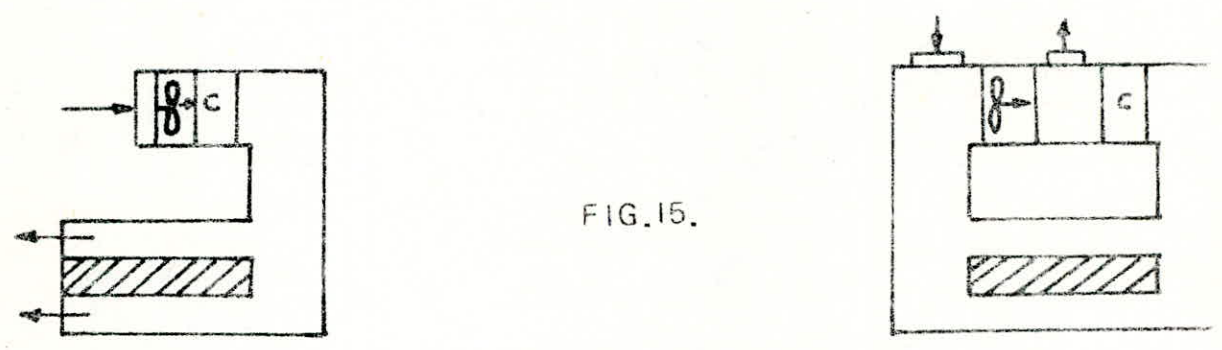


FIG. 15.

Schemas aeramiques



Different types de Sechoirs

- e Convection circuit ouvert
- f Convection circuit de recyclage
- i Rayonnement circuit ouvert
- j Pertes dielectriques, circuit ouvert chauffe

ce sont les données d'établissement.

Connaissant les données d'établissement le constructeur du séchoir garantit les caractéristiques de fonctionnement.

III. 1.3.1. Données d'établissement :

On peut les choisir ainsi:

- a) Propriétés de corps humide (propriétés physiques)
- b) Caractéristiques liées au séchage (teneurs initiale et finale; température maximale tolérée à l'état sec; temps de séchage probable)
- c) Production. Séchage continu ou discontinu ?
 - Séchoirs continus: masse de corps humide entrant par unité de temps
 - Séchoirs discontinus: quotient de la masse de corps humide sur le temps de séchage.
- d) Qualités désirées pour le produit sec .Température maximale à la sortie .Uniformité du séchage .Qualités diverses.
- e) Récupération éventuelle (poussières , solvant)
- f) Modalités d'installation du séchoir (espace disponible, conditions de l'air extérieur θ , humidité maximales et minimales, pression moyenne, pureté)

III 1.3.2. Caractéristique de fonctionnement

- Production q : corps sec à teneur finale par unité de temps
- Puissance d'évaporation M_e : c'est la masse Kg/h ou T/h de liquide évaporé dans l'unité de temps(en continu); Kg/h sur le temps de séchage (en discontinu).
- Consommation thermique Q_t : en continu:c'est la quantité de chaleur (Kcal/h)fournie au séchoir pendant l'unité de temps.
en discontinu: quantité de chaleur pendant l'opération de séchage par le temps de séchage
- Consommation thermique massique Q_m : c'est la quantité de chaleur (Kcal/Kg) fournie au séchoir rapportée à l'unité de masse de liquide évaporé
- Puissance mécanique absorbée P : c'est la puissance que fournissent les moteurs actionnant les ventilateurs ou pompes à vide , ainsi que l'ensemble des appareils branchés sur le circuit de manutention et de préparation .

III. 1.3.3 Caractéristique secondaires

Dans certains cas particuliers, on fait état des caractéristiques secondaires suivantes.

- homogénéité du séchage.
- perte de poussière pourcentage du débit du produit séché emporté par le gaz humide sortant du séchoir par rapport au débit de sortie
- qualité du produit séché.

III. 2. Classification des séchoirs.

Dans tout procédé de séchage, se superposent plusieurs phénomènes secondaires autres que le transfert de chaleur et de matières; suivant les produits à sécher, on réalise des dispositifs variés, de manipulations diverses et des moyens de transport. D'où l'en rencontre plusieurs classifications dont les principales sont faites d'après :

- 1 - le mode de chauffage du matériau
- 2 - la pression de travail
- 3 - le mode de déplacement de la charge
- 4 - le type de construction

Ces classifications ont pour but de mettre en évidence les types généraux de séchoirs, qui se distinguent entre eux du point de vue construction et fonction. Simplement pour la première classification c'est à dire, d'après le mode de chauffage du matériaux, on distingue pour le seul cas du chauffage par convection forcée des séchoirs à :

- boîtes de séchage
- chambres de séchage
- séchoirs tunnel -canaux de séchage
- convoyeurs de séchage
- tours de séchage
- séchoirs rotatifs cylindriques
- rigoles de séchage
- séchoirs à fluidisation
- séchoirs pneumatiques (par entraînement)
- séchoirs par pulvérisation

Et viennent ensuite les séchoirs à autres modes de chauffage. (conduction, radiation).

Toute classification permet de caractériser de façon précise un séchoir, quelque, capable de traiter une production donnée d'un corps humide.

On doit donc analyser les points suivants :

- 1 - premièrement, la recherche du meilleur type de séchoir

- 2 - préparation éventuelle du corps humide
- 3 - mode d'exploitation continue ou discontinu
- 4 - moyens de manutention suivant la texture du corps humide.
- 5 - source de chaleur
- 6 - mode de transmission
- 7 - circuit aérauliques équipant le séchoir.

III. 3. Choix du séchoir devant traiter un corps déterminé cellulose en pate.

Notamment pour porter sur un séchoir à canaux dans lesquels doit circuler la pate préparée de la façon suivante: le tissu cellulosique extrait par traitements est subdivisé en fibres simples par écrasement dans l'eau. Ensuite on forme une suspension de quelques pour cent de cellulose dans l'eau et on forme une bande pateuse de la cellulose par aspiration de l'eau véhiculant les fibres, ainsi on obtient une bande d'une tension valable pour être introduite dans le séchoir pour que l'élément transporteur soit assez simple et non encombrant.

Dans ce type de séchoir on utilise en général deux cables sans fin; disposés à l'intérieur des canaux, destinés à entrainer un baton d'embarquement qui amène la pate de l'entrée à la sortie du séchoir. Ainsi on peut disposer de plusieurs canaux horizontaux constitués par des caissons de soufflage d'air qui assureront dans chaque canal et sur toute la longueur la distribution et l'évacuation d'air chaud au dessous et au dessus de la pate de façon à la supporter et à lui assurer la transmission de chaleur et l'évacuation de vapeur qui permettent son séchage.

Pour cela on doit utiliser des ventilateurs;

- à l'extrémité du séchoir, des rouleaux de detour qui permettront à la pate de passer d'un canal au suivant.
- à l'entrée du séchoir; on doit disposer :
 - d'un transporteur de la pate
 - rouleau valseur qui assure la tension de la pate
 - une table d'embarquement.
- à la sortie du séchoir, on doit avoir.
 - rouleau qui centre la pate et la guide
 - rouleau rembareur
 - presse pour la circulation de la pate.

III.4 Calcul de la dimension de l'enceinte de séchage d'un séchoir continu.

Principe de calcul : soit :

- q (kg/h) le debit du séchoir
t_s (h) le temps de séchage
m (kg/m³) la masse de matière repartie dans l'unité de volume de l'enceinte de séchage.
V (m/h) - la vitesse d'avancement du produit dans le sechoir.
S (m²) - section droite de l'enceinte, normale à la direction de V.
L (m) - longueur de l'enceinte de séchage

La formule général de mécanique des fluides

$$q = V S \rho = \text{cte} \quad (31)$$

Qui exprime la conservation de la masse qui traverse un conduit en régime permanent, est applicable dans notre cas, la masse volumique du fluide étant remplacée par la masse de matière contenue dans l'unité de volume du séchoir.

$$q = V S \rho_m \quad (32)$$

Il faut pour assurer le séchage du corps humide le laisser séjourner un temps t_s dans l'enceinte de séchage. La vitesse d'avancement est imposé par la relation.

$$V = \frac{L}{t} \quad (33)$$

Ce qui donne

$$q = L S \rho_m / t_s \quad (34)$$
$$L S = q t_s / \rho_m$$

L S, étant le volume de l'enceinte de séchage L S ρ_m est la masse de matière qu'il contient. Connaissant q et t_s, on a à évaluer ρ_m qui dépend essentiellement du produit et du mode de transport pour le faire avancer à la vitesse V. Ceci fait, on choisira d'abord L, longueur du séchoir et l'on vérifiera que la valeur de S qui en résulte est bien proportionnée. En supposant qu'il en soit ainsi, on calculera la vitesse d'avancement du produit par la relation n° (33) qui sera d'autant plus grande que le séchoir sera plus long

III. 5 Base de calcul d'un séchoir

III.5.1. Bilan matière et d'énergie

Le calcul des installations de séchage repose sur la connaissance de deux éléments suivants :

- le bilan matière
- le bilan Energie

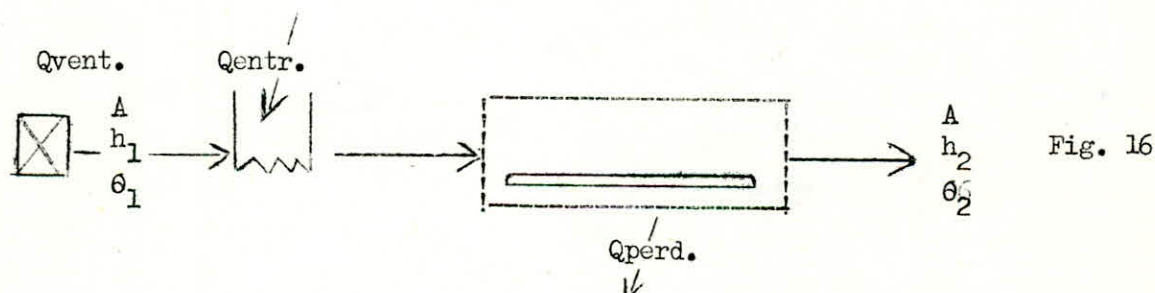
Les figures suivantes fig. (16.17), montrent l'établissement de ces bilans pour une installation discontinue et une installation continue.

En regime stationnaire, la somme des énergies entrées dans le système est égale à la somme des énergies sorties. Dans notre cas, le séchage se fait à l'air chaud à des températures où la teneur en humidité est un facteur essentiel. Pour une exploitation continue, pour le passif du bilan, on doit tenir compte des points suivants.

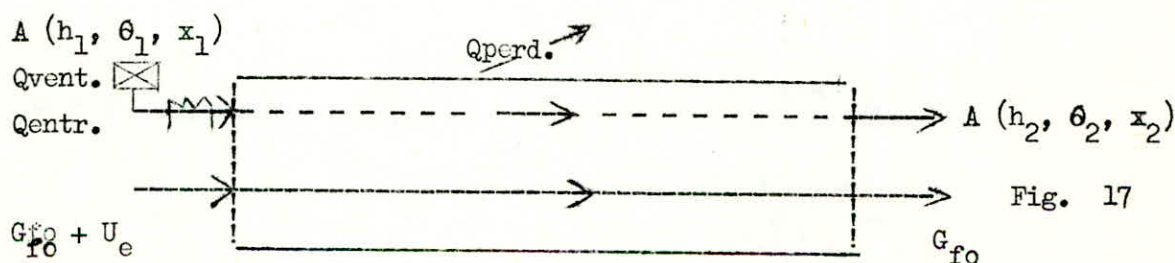
- la variation de l'enthalpie de l'air, en tenant compte de l'eau dont il a été chargé.
- La variation de l'enthalpie des solvants restés dans le matériau, évaporés et absorbés dans les gaz.
- La variation du matériau soumis au séchage.
- La variation de l'enthalpie des moyens de transport à travers le séchoir, des supports...
- La perte de chaleur par les gaz, quand se n'est pas l'air chaud qui est l'agent thermique.
- Les pertes de chaleur par les parois, par conductivité convection et rayonnement.
- Les pertes de chaleur par le manque d'étanchéité des dispositifs de fermeture; pertes, panneaux...

III. 5.1.1. Bilan matière

Sécheur à exploitation discontinue.



Secheur à exploitation continue.



Le matériau soumis au séchage est introduit en une quantité G_i (Kg/h), une teneur en matériau sec G_{fo} (Kg/h) et une humidité (quantité d'eau) en (Kg/h) qui s'élimine pendant le processus.

Celle ci se retrouve intégralement dans l'air évacué A dont l'humidité augmente de x_1 à x_2

$$U_e = A (x_2 - x_1) \quad (35)$$

III. 5. 1.2. Bilan thermique

La quantité de chaleur Q (Kcal/h) nécessaire au séchage est introduite dans l'air est la somme de la chaleur entrée dans le sechoir par les surfaces chauffantes et la quantité de chaleur équivalente à celle du travail de ventilation. (sans perte)

$$Q = Q_{ent} + Q_{vent} = A (h_2 - h_1) + G_{fo} c_G (\theta_{o2} - \theta_{o1}) - U_e c_e \theta_{o1} \quad (36)$$

A : quantité d'air sec (Kg)

c_G : chaleur massique du materiau sec (Kcal/kg °C)

$\theta_{o2} - \theta_{o1}$: Variation de température du materiau en °C

$(h_1; \theta_1, x_1)$, (h_2, θ_2, x_2) respectivement, etat initial et final de l'air.

c_e : chaleur massique de l'humidité (Kcal/kg °C)

En rapportant Q à lKg d'humidité on obtient :

$$Q/U_e = \frac{h_{o2} - h_{o1}}{x_2 - x_1} + \left(c_G \frac{G_{fo}}{U_e} (\theta_{o2} - \theta_{o1}) - c_e \theta_{o1} \right) \quad (37)$$

Le deuxième terme de l'équation précédente compris entre crochet est la quantité de chaleur nécessaire pour le chauffage du materiau notée q en tenant compte des pertes de chaleur par les parois du sechoir q_p rapportées à 1 kg d'humidité éliminé, la quantité de chaleur pour évaporer 1 kg d'eau est la suivante:

$$Q/U_e = \frac{h_{o2} - h_{o1}}{x_2 - x_1} + q + q_p \quad (\text{kcal/kg}) \quad (38)$$

Elle est indépendante des variations intermediaires et ne depend des états initiaux et finales de l'agent de séchage est du materiaux.

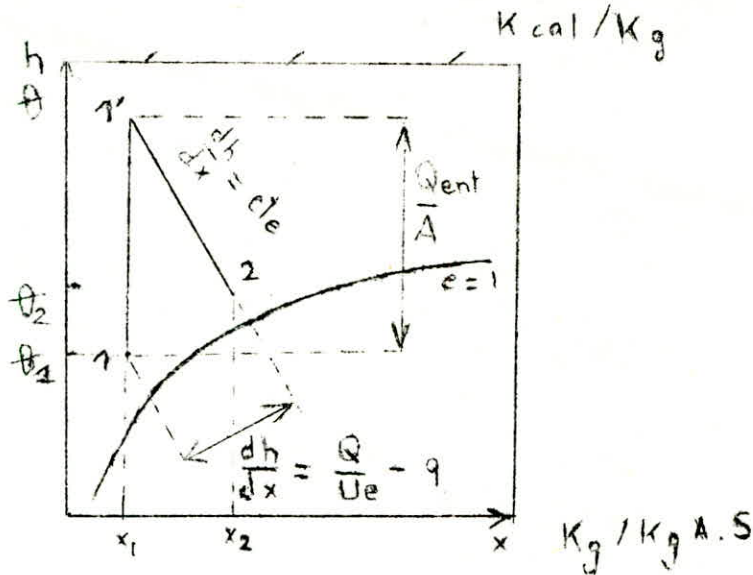
donc en determinant les initiaux et finals on a la variation d'enthalpie en fonction de l'humidité.

$$\frac{h_{o2} - h_{o1}}{x_2 - x_1} = Q/U_e - q - q_p \quad (39)$$

Pour un sechoir idéal on peut écrire

$$\frac{h_{o2} - h_{o1}}{x_2 - x_1} = Q/U_e + c_e \theta_{o1} \quad (39')$$

Pour un état initial et final donné de l'air utilisé pour le séchage, on peut directement déterminer la direction dh/dx et lire sur une échelle latérale, sur un diagramme h, x (fig. 18) la consommation de chaleur par kg d'eau évaporé.



III.5.2. Circulation des gaz dans le séchoir

Lorsqu'il s'agit de produits en mouvements l'agent de séchage employé, peut être dirigé parallèlement au déplacement de ces produits, soit à équicourant, soit à contre courant. Pour des substances granuleuse, on utilise le courant transversal.

III.5.2.1 Equicourant: fig 19

Avec le procédé à équicourant, le gaz frais chaud rencontre le produit humide à son entrée dans le sechoir, la grande différence de température qui y régné, permet un échange énergétique de chaleur et de matière. Ceci est employé pour des substances homogènes, et sa teneur en humidité empêche celui-ci de se surchauffé à une température qu'il ne supporterait pas.

Au debut du séchage, le potentiel du milieu séchant est élevé, et au contraire faible à la fin; parce que pendant le passage à travers le sechoir, la température du gaz diminue en raison de l'accroissement continu de l'humidité. Ce procédé impose donc des limites connues à la déshumidification d'un produit. Il est judicieusement utilisé lorsque le produit en question à l'état sec est sensible à l'influence des hautes températures.



fig. 19

Canal de séchage pour exploitation à équicourant.

III.5.2.2 Contre courant fig. 20

Dans le procédé à contre courant, le produit humide, à son entrée dans le séchoir vient en contact avec un gaz déjà refroidi et chargé d'humidité. Le gaz chaud frais atteint au contraire le produit séché. Ce procédé ne convient donc pas aux matières sensibles à la température. Pour tirer avantages des deux courants on les combine ensemble, dont la première partie est à équicourant et l'autre à contre courant. (fig. 21)

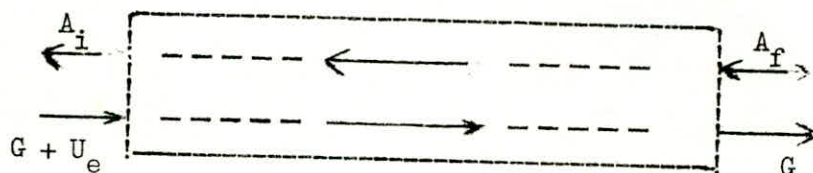


Fig. 20 : Canal de séchage pour exploitation à contre courant.

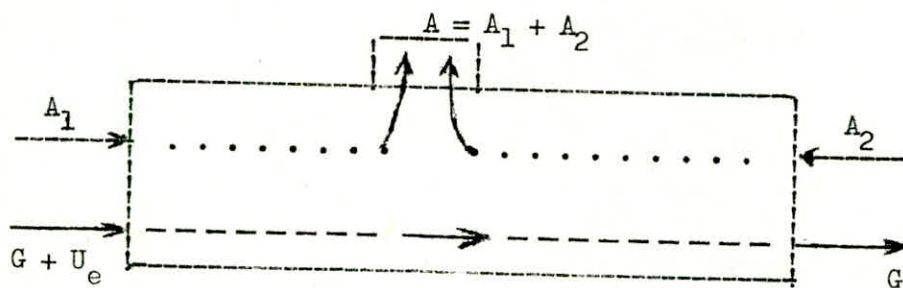


Fig. 21 : Courant combiné: équicourant et contre courant.

III. 5.2.3. Recyclage de l'air

Dans la fig. (22) qui montre le schéma d'un séchage à équicourant avec gaz recyclé, le gaz chaud A_1 , frais, et A_R d'air recyclé sont introduit dans le séchoir dans un rapport bien déterminé, nécessaire pour le séchage et éventuellement avec un apport supplémentaire de chaleur effectué avec un rechauffeur.

Fig. 22 : Séchoir à recyclage d'air.



A l'état initial, les caractéristiques de l'air A_1 sont x_2, θ_1, h_1 , à l'état final, l'air évacué du séchoir, qui est partiellement mélangé à A_1 , est A_e avec les caractéristiques x_f, θ_f, h_f .

En faisant un bilan en eau on peut déterminer la quantité d'air en circulation sachant que l'eau éliminée du solide est évacuée par l'air.

$$d'où \quad U_e = A (x_f - x_2) \quad (40)$$

x_2 étant la teneur en eau de l'air à l'entrée du séchoir.

Soit le rapport, quantité d'air frais A_1 sur la quantité d'air en circulation A_2 .

$$A_1 / A = (1 - R) / R \quad (41)$$

$$A = A_1 + A_R$$

$$R = \frac{A_R}{A_1 + A_R} = \frac{A_R}{A} \quad (42)$$

Bilan en eau.

$$A_R x_4 + A_1 x_1 = A x_2 \quad (43)$$

On obtient après transformation :

$$R A x_4 + (1 - R) A x_1 = A x_2 \quad (44)$$

$$\text{avec } R = \frac{x_2 - x_1}{x_4 - x_1} \quad (45)$$

En se servant d'un clapet d'étranglement et en ajustant éventuellement le chauffage du rechauffeur on parvient à compenser les variations des conditions atmosphériques et à régler aisément l'état de l'air frais.

Lorsque le matériau est sensible à la température le séchoir décrit précédemment n'est pas économique car il nécessite une grande quantité d'air à basse température. Il est recommandé d'utiliser le procédé par stades par lequel on ne chauffe l'air que jusqu'à une limite, mais en renouvelant ce chauffage de façon à maintenir le produit à un niveau de température convenant au produit.

La consommation totale de chaleur s'obtient par la relation suivante :

$$q = \frac{Q_{\text{entrée}}}{U_e} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{U_e} = \frac{h_{n+1} - h_1}{x_{n+1} - x_1} \quad (46)$$

n étant le nombre d'étapes.

IV ETUDE EXPERIMENTALE :

L'étude expérimentale réalisée est une cinétique de séchage de la pâte à papier (de l'Unité, Sonic de Mostaganem).

IV.1. Simulation du problème.

Une étude des phénomènes de séchage nécessite de maintenir constante les facteurs dont l'influence a été reconnue. On y parvient en ne faisant pas varier la température, l'humidité et la vitesse de l'air s'écoulant sur un échantillon de la substance étudiée; de plus la quantité d'air doit être d'une importance suffisante par rapport à celle du produit pour que l'état de l'air ne soit pratiquement pas influencé par la chaleur cédée au produit et l'humidité qu'il a absorbée.

De telles expériences sont effectuées dans une armoire de séchage avec déplacement d'air ou dans un canal de séchage à circulation d'air dans lequel la vitesse de l'air peut être variée dans de larges limites, et où le produit est pesé en continu. L'approche théorique et la simulation du problème industriel seraient particulièrement parfaite dans le deuxième séchage expérimental, où l'on pourrait sécher notre produit (de forme plane) maintenu horizontalement par des supports l'air séchant le parcourant longitudinalement.

Etant donné qu'on ne dispose pas d'un tel appareillage, on a utilisé le séchoir qui se trouve au Hall du Département.

Le sens du courant d'air, dans ce séchoir, se faisant de bas en haut, on doit placé notre produit verticalement de façon à ce que l'écoulement de l'air lui soit parallèle. La pâte sera maintenue dans un support fixe ou les bords de la pâte sont scellés à la paroi du support pour ne permettre à l'humidité de diffuser à travers une surface donnée.

IV.2. Appareillages et mesures.

IV.2.1. Appareillage de séchage.

L'appareil utilisé est un séchoir à lit fluidisé couramment employé dans des laboratoires Pharmaceutiques où les conditions d'hygiène sont exigées.

Les performances de cet appareil sont moyennes et ne présente pas tous les avantages nécessaires pour une étude de cinétique de séchage : la température de l'air présente des fluctuations.

Caractéristiques de l'appareil:

Modele 261 AE/15 PX FLUID BED DRYER

Hauteur 1370 mm.

Base 715 x 965 mm

Description de l'appareil :

L'appareil est composé d'une armoire de séchage dans la quelle se trouve une jatte en plexi - glass de 100 mm de diamètre, dont le fond est une plaque perforé pour l'introduction de l'air chaud.

Cet air est aspiré par le plafond de l'armoire grace à un ventilateur entrainé par un moteur de 1 Ch.vop. L'air introduit est chauffé électriquement par des resistances et sa température est regulée par un thermostat.

Cette température est indiqué par le thermometre N° 7 étaloné.

Le séchoir est muni d'un tube de VENTURI qui sert à mesurer les debits de l'air qui le traverse.

IV.2.2. Tube de VENTURI

C'est un appareil qui se compose d'un convergent, d'un col et d'un divergent (fig 23).

En appliquant la loi de conservation de masse, le theoreme de Bernouli à l'entrée et le col VENTURI et après transformation, on obtient la relation suivante exprimant le debit massique de l'air.

$$Q = C C_d \sqrt{\frac{2 \rho_{\text{air}} \Delta P}{1 - m^2}} \quad (47)$$

Q debit massique.

$$\Delta P = \rho_{\text{eau}} g h \quad ; \quad (h \text{ d'ecu}) \quad \text{M K S.}$$

C = 0,975 : Coefficient de perte de charge.

$$m = \frac{d_c^2}{d_1^2} = 0,25$$

$$d_c = 40 \text{ mm}$$

$$d = 20 \text{ mm}$$

ρ_{air} = densité de l'air en fonction de la θ

La vitesse à l'interieur de la jatte est de :

$$U_j = \frac{Q}{\int_{\text{air}} S_j} = 16 \cdot 10^{-2} \cdot 0,975 \left(\frac{2}{15} \frac{\Delta P}{\rho_{\text{air}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

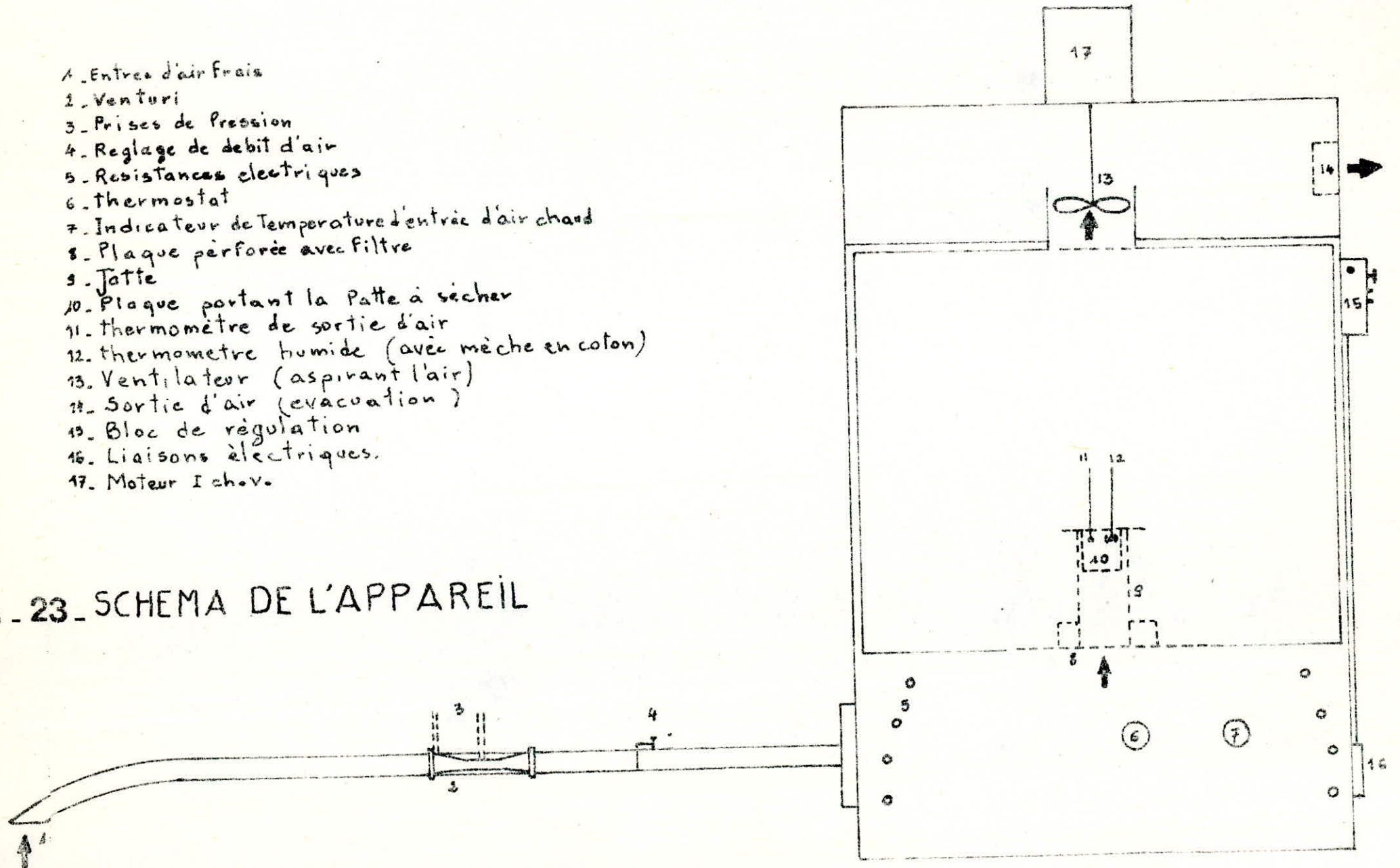
Sj : section de la patte de rayon 50 mm.

IV.2.3. Caracteristique de l'air.

La température de l'air d'entrée est mesurée par le thermometre N° 7 (voir sechema).

1. Entrée d'air frais
2. Venturi
3. Prises de Pression
4. Reglage de debit d'air
5. Resistances electriques
6. thermostat
7. Indicateur de Temperature d'entrée d'air chaud
8. Plaque perforée avec filtre
9. Jatte
10. Plaque portant la Patte à sécher
11. thermomètre de sortie d'air
12. thermometre humide (avec mèche en coton)
13. Ventilateur (aspirant l'air)
14. Sortie d'air (evacuation)
15. Bloc de régulation
16. Liaisons électriques.
17. Moteur I chov.

IG - 23 - SCHEMA DE L'APPAREIL



L'étalonnage de ce thermomètre indique une légère différence entre celle de l'étalon; thermomètre disposé juste au niveau du bord inférieur de la plaque contenant la pâte.

Pour la température de l'air de sortie, on utilise carrement, un thermomètre accroché au plafond de l'armoire de séchage de telle façon que son bulbe soit juste au dessus du bord supérieur de la pâte. Ce thermomètre indique la température sec de l'air. Un autre thermomètre dont son bulbe est entouré d'une mèche imbibée d'eau indique les températures humides de l'air. Ces deux thermomètres ont leurs colonnes colorées, qui nous permettent de lire à distance les températures indiquées. La connaissance de ces températures nous permettent de déterminer ainsi, à chaque temps les caractéristiques de l'air.

On a utilisé de même, un hygromètre à condensation.

IV.2.4. Détermination de l'humidité de la pâte.

La détermination de l'humidité de la pâte est faite par pesée (sur une balance analytique) de la quantité d'eau éliminée.

La pâte découpée en échantillons, de 60 x 60 mm pesés initialement (m_1) à 0,01 gramme près, dans une boîte tartrée en verre, est séchée dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (m_2 .)

La teneur en humidité est égale à :

$$x = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (49)$$

x en Kg d'eau " enlevée " par kg de matière sèche.

Le produit ainsi séché, est refroidi dans un dessiccateur avant d'être pesé.

IV.3. Manipulations

IV.3.1. Préparation de l'échantillon à sécher.

La pâte à papier est découpée finement suivant des échantillons de dimensions 60 x 60 mm (c'est les plus grandes dimensions que peut contenir une boîte à tarre pouvant être peser sur une balance analytique, sans subir à la pâte des déformations).

Pour pouvoir comparer l'influence des paramètres sur la vitesse de séchage, on procède de la façon suivante :

- On pèse les échantillons à 0,01 gramme près dans les mêmes conditions d'équilibre (température ambiante).
- On sélectionne, ensuite, les échantillons de masse identique sont imbibés d'eau distillée et pesés une nouvelle fois à 0,01 gramme près .
- Les échantillons de même masse sont alors séchés.

IV.3.2. Essais de séchage

La cellulose, colloïdes moléculaires, est une substance fibreuse dont la masse volumique varie avec le degré de cristallisation. Elle est très hygroscopique; La teneur en eau en équilibre avec l'air à 20°C et 65 % d'humidité relative est de l'ordre de 10 %. Malgré son hygroscopicité, la cellulose est insoluble dans l'eau. En l'imbibant, avec de l'eau distillée, l'humidité retenue provoque un gonflement et un accroissement de volume. La liaison de l'eau avec le matériau est de nature colloïdale.

Donc, le séchage présentera sûrement les deux périodes de séchage, l'évaporation superficielle en premier temps, et la deuxième période, à taux de croissant, en deuxième temps, qui sera probablement contrôlé par la diffusion.

Par conséquent, tout les facteurs intervenant dans le séchage peuvent avoir une influence sur la cinétique à savoir l'influence des facteurs internes et externes.

IV.3.2.4. Essais préliminaires :

Ces essais nous permis d'observer le comportement du produit pendant son séchage et de terminer ainsi les grandes lignes du problème.

IV.3.2.1.1. Retrait.

La pâte séchée, d'épaisseur moyenne de 1 mm, initialement double de volume quand on l'imbibe sous l'influence des conditions externes. En augmentant la température de l'air, le retrait ne se fait pas d'une manière uniforme : c'est à dire que le corps ne se contracte pas également dans toutes les directions. Et ceci provoque une très grande déformation de la surface de la pâte. Ce phénomène est du à la structure colloïdale de la cellulose; les fibres sont plus ou moins orientées dans une direction déterminée par suite d'un traitement de presses.

IV.3.2.1.2. Sensibilité du produit.

La cellulose séchée à une température plus de 70°C, subit un retrait énorme du fait que la surface exposée se sèche très vite, et qu'à l'intérieur du corps, l'humidité est beaucoup plus grande. De plus la pâte commence à brunir dès que l'étape de l'évaporation superficielle laisse place à la diffusion interne de l'humidité.

La cellulose séchée est destinée en général à la fabrication du papier ; car elle est régénérée par simple dispersion dans l'eau, et retrouve ainsi sa structure départ inaltérée.

Un séchage à une température où l'on observe un début de calcination, qui d'étériorer a priori les fibres, pose un autre problème, à savoir la blancheur du papier fabriqué avec une telle matière.

Or auparavant, et dans tout procédé de fabrication de la pâte à papier, où la cellulose extraite par les traitements préliminaires (Alcalins ou autres) est à l'état brut (cellulose foncée). Cette pâte purifiée par de l'eau de chlore et par des solutions diluées de soude (à froid ou à chaud suivant le degré de pureté que l'on désire) est toujours traitée par une solution de substances blanchissantes (hypochlorite) qui constitue la dernière étape du procédé avant le séchage.

IV.3.2.2. Mouvement de l'humidité dans le solide.

La nature du mouvement de l'humidité à l'intérieur du solide peut être déterminé par l'étude du gradient de l'humidité interne. En général, la détermination du gradient de l'humidité est très difficile; La technique employée est peu précise, car il s'agit de découper en couche mince le produit humide après séchage.

Dans notre cas, la solution adoptée est décrite par la méthode suivante :

- Dans une boîte parallélépipédique, en plexi-glass dont le fond est fermée, on superpose 7 couches de pâte de 2 mm d'épaisseur, à une humidité supposée identique. Cette boîte fixée sur un support, est introduite dans le séchoir, verticalement de façon à ce que le courant d'air chaud lui soit parallèle. Les échantillons sont de dimensions identiques et sont séchés à température et vitesse de l'air constante, en un temps donné.

Les couches sont ensuite retirées du séchoir et pesées séparément les unes après les autres dans des boîtes tarées numérotées respectivement dans l'ordre qu'occupe les couches séchées.

- On détermine ainsi leur humidité après séchage dans l'étuve à 105°C.

- On porte sur un graphique, l'humidité du produit en fonction de la distance à partir de la surface exposée au transfert en supposant que l'humidité est homogène et sera caractéristique d'une couche mince à la mi-épaisseur de l'échantillon. D'après les courbes expérimentales, on remarque que la première couche (celle qui est directement en contact avec l'air) est séchée à un degré d'humidité beaucoup plus bas que la seconde qui se trouve à la même humidité que les couches les plus profondes où l'humidité est maximum.

Pour une pâte d'épaisseur donnée, séchée des deux côtés, l'humidité, après diffusion serait maximum à la mi-épaisseur de la couche, et elle sera d'autant plus grande que la couche est d'épaisseur importante.

On remarque que l'épaisseur de la couche séchée par l'unité de Mostaganem a été choisie judicieusement.

DIFFUSION DE L'HUMIDITE

$x = f(d)$ - d : Distance à partir de la Surface d'échange

A. à $\theta_{\text{air}} = 54^\circ\text{C}$

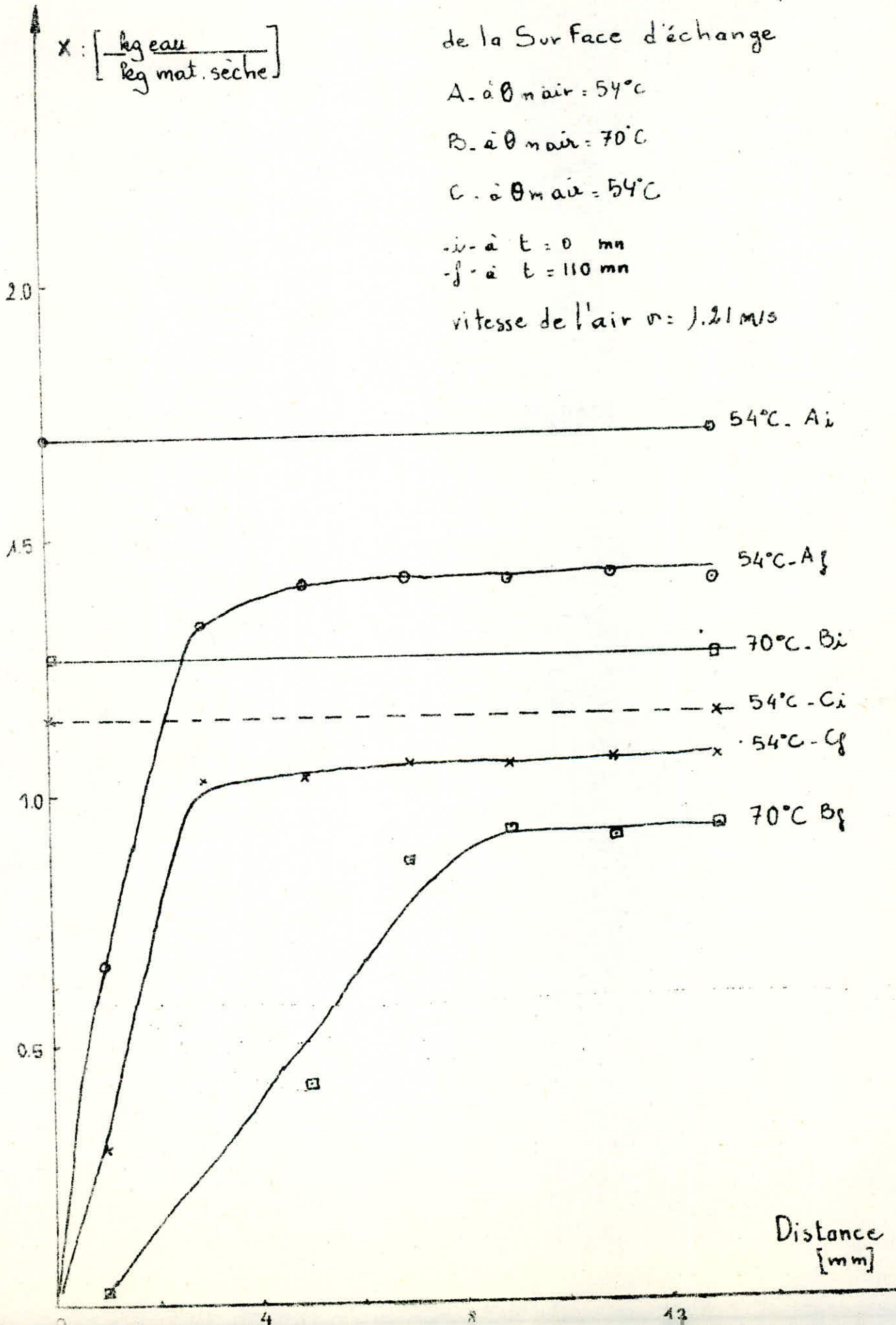
B. à $\theta_{\text{air}} = 70^\circ\text{C}$

C. à $\theta_{\text{air}} = 54^\circ\text{C}$

-i- à $t = 0 \text{ mn}$

-f- à $t = 110 \text{ mn}$

vitesse de l'air $v = 1.21 \text{ m/s}$



IV.3.4 Courbes de séchage :

- A une température, et vitesse et humidité de l'air constante, on introduit la pate humide dans le séchoir.
- A des intervalles de temps déterminés, on retire notre échantillon et on le pèse jusqu'à atteindre un état d'équilibre.
- Puis on sèche le produit à l'étude à 105 °C pour déterminer la masse du produit sec.
- On trace la courbe de séchage donnant l'humidité de produit en fonction du temps.
- Cette courbe est ensuite différentiée, graphiquement.

Vitesse de l'air $v = 1.1 \text{ m/s}$

épaisseur : une couche séchée
d'un seul côté

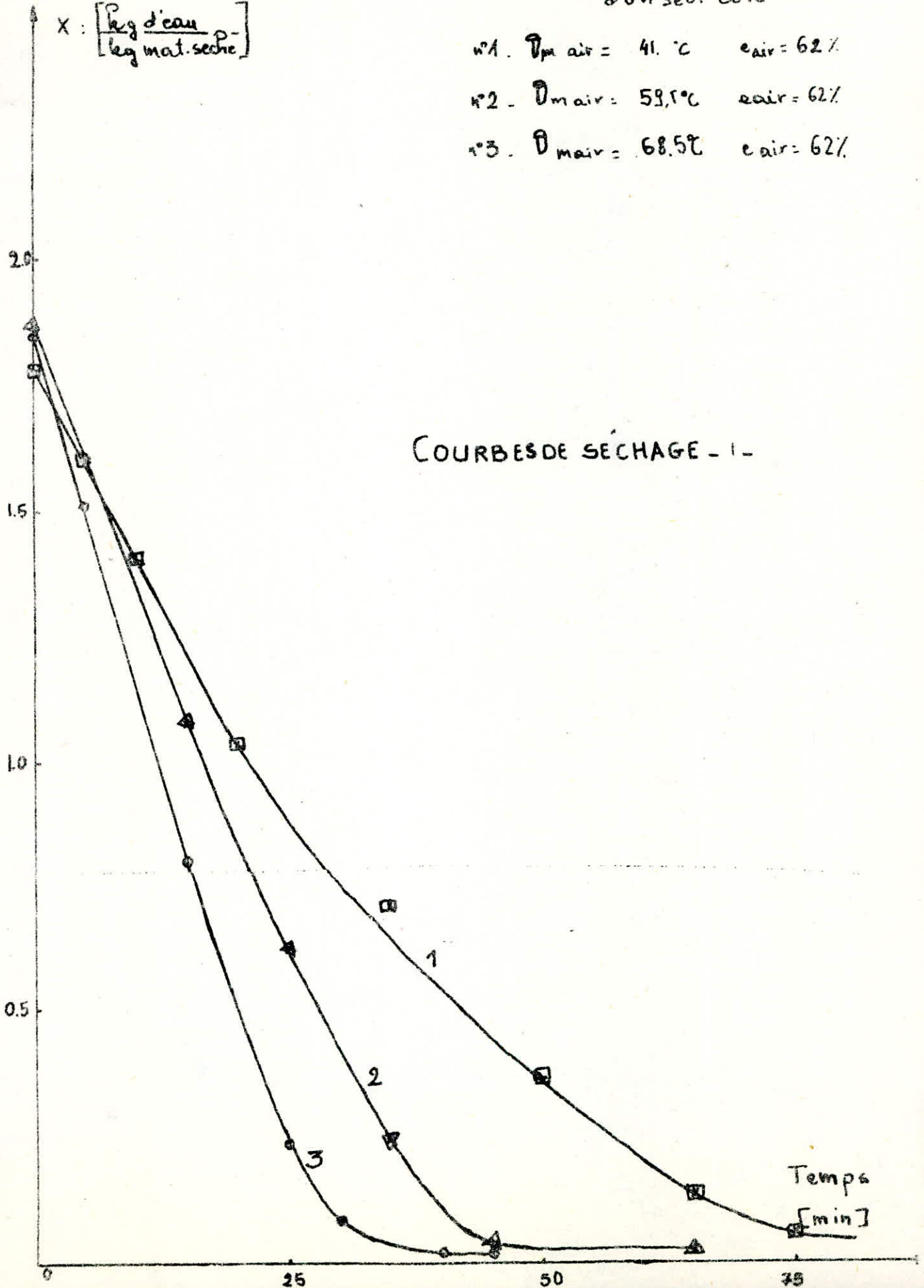
$X : \left[\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg mat. sèche}} \right]$

n°1. $T_{\text{m air}} = 41.^\circ\text{C}$ $e_{\text{air}} = 62\%$

n°2. $T_{\text{m air}} = 59.5^\circ\text{C}$ $e_{\text{air}} = 62\%$

n°3. $T_{\text{m air}} = 68.5^\circ\text{C}$ $e_{\text{air}} = 62\%$

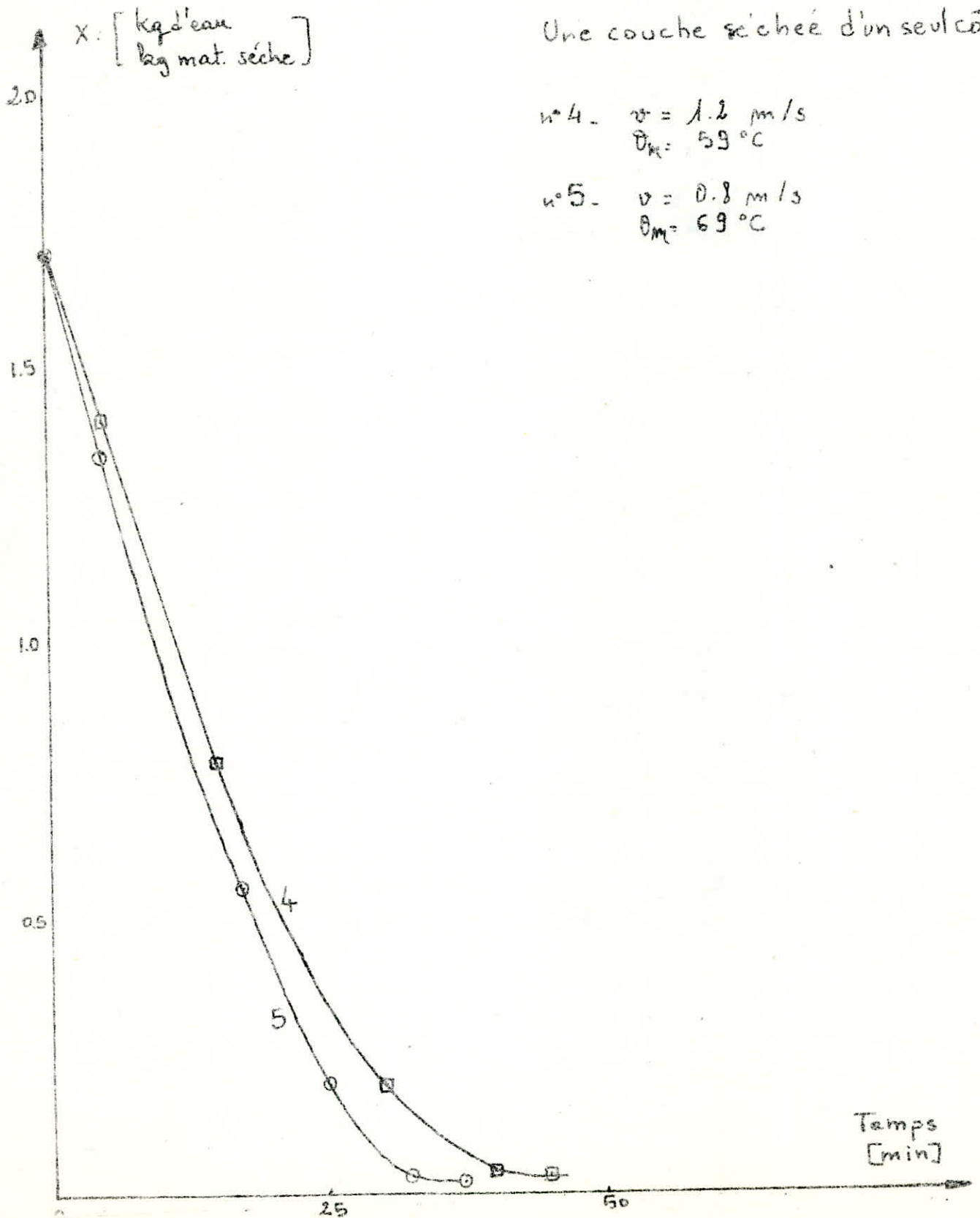
COURBES DE SÉCHAGE - I -



Courbes de Séchage - II -

humidité relative de l'air $e = 65\%$

Une couche séchée d'un seul côté



COURBES DE SECHAGE - III -

Sechage d'une seule couche
sechée d'un seul côté.

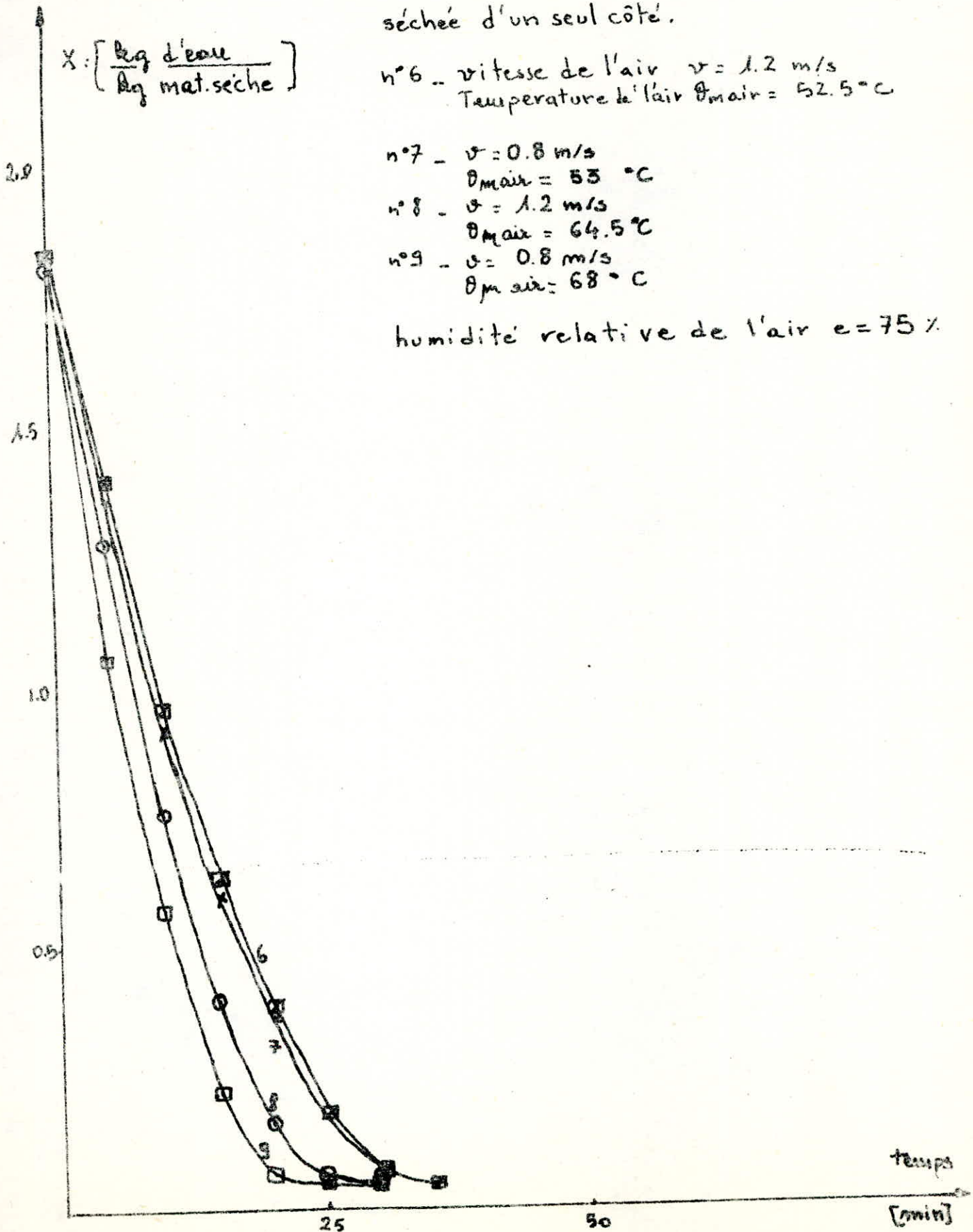
n°6 - vitesse de l'air $v = 1.2$ m/s
Temperature de l'air $\theta_{\text{air}} = 52.5$ °C

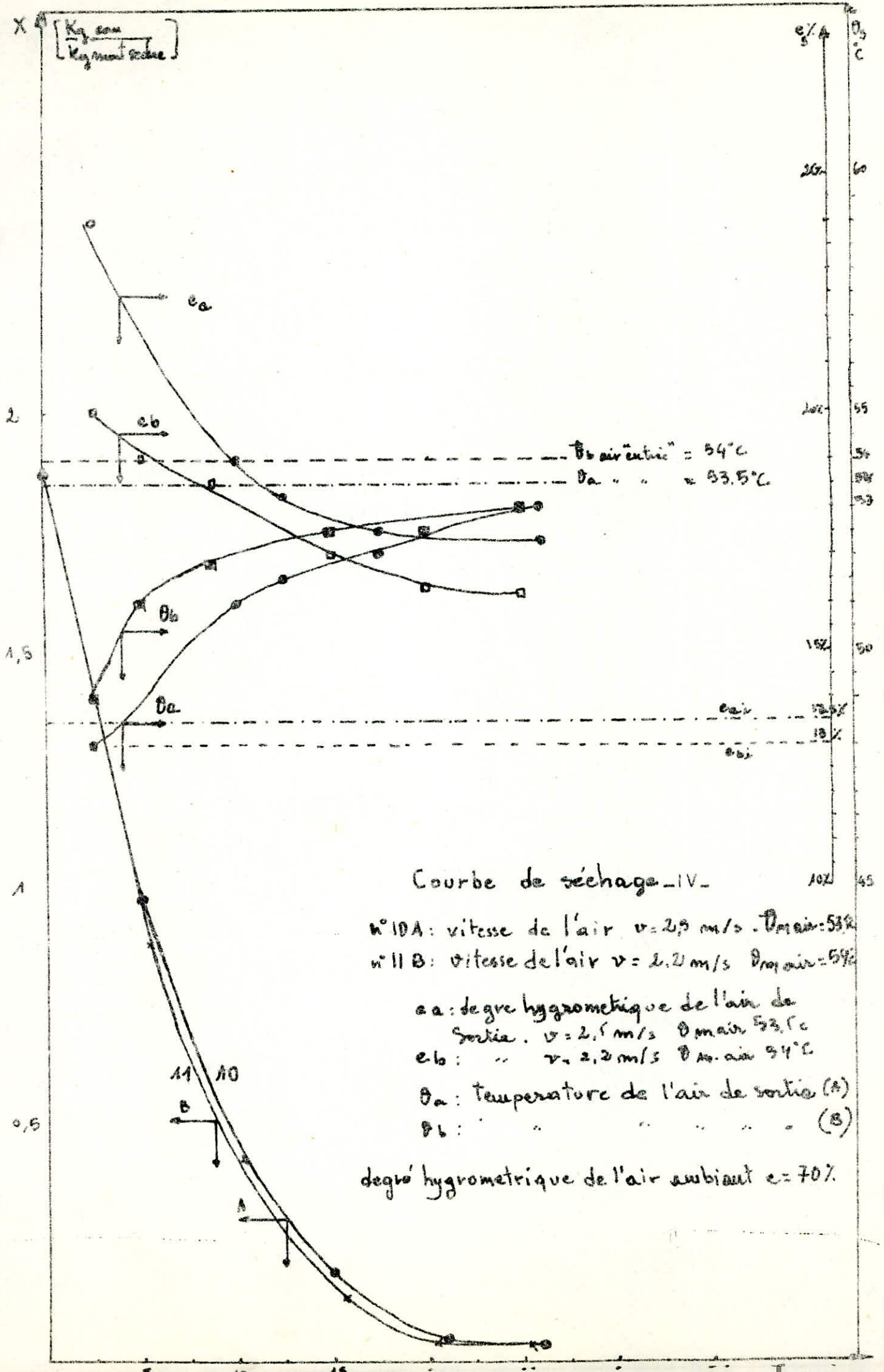
n°7 - $v = 0.8$ m/s
 $\theta_{\text{air}} = 53$ °C

n°8 - $v = 1.2$ m/s
 $\theta_{\text{air}} = 64.5$ °C

n°9 - $v = 0.8$ m/s
 $\theta_{\text{air}} = 68$ °C

humidité relative de l'air $e = 75\%$





Courbes de Séchage - v -

humidité relative $e = 58\%$

n°12. 2 couches séchées d'un seul côté

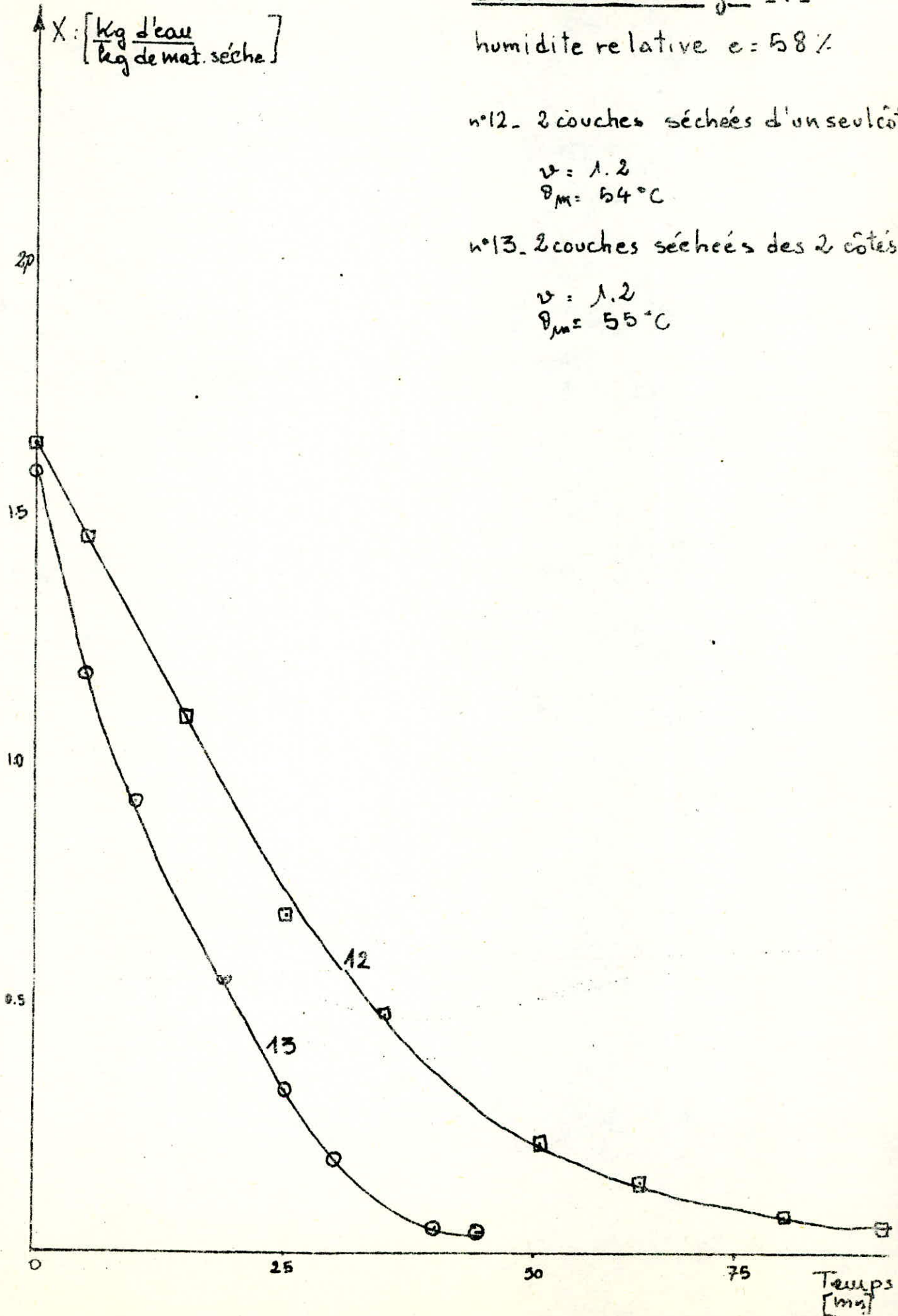
$$v = 1.2$$

$$\vartheta_m = 54^\circ\text{C}$$

n°13. 2 couches séchées des 2 côtés

$$v = 1.2$$

$$\vartheta_m = 55^\circ\text{C}$$



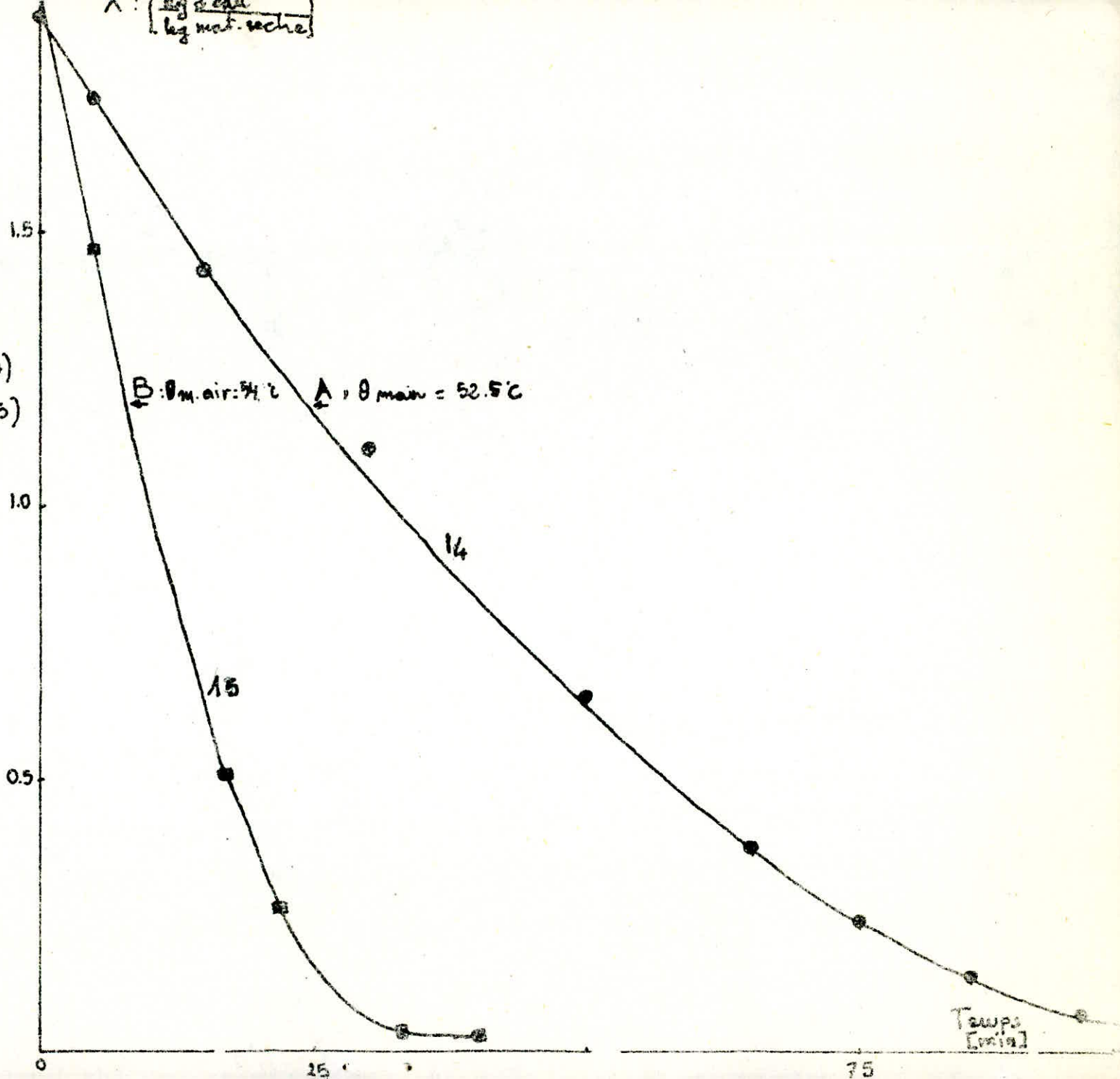
COURBES DE SÉCHAGE - VI -

Vitesse de l'air $v = 1.2 \text{ m/s}$

humidité relative de l'air: 56%

A: 2 couches séchées en 1 seul côté $n^\circ(14)$

B: 1 couche séchée en 1 seul côté $n^\circ(15)$



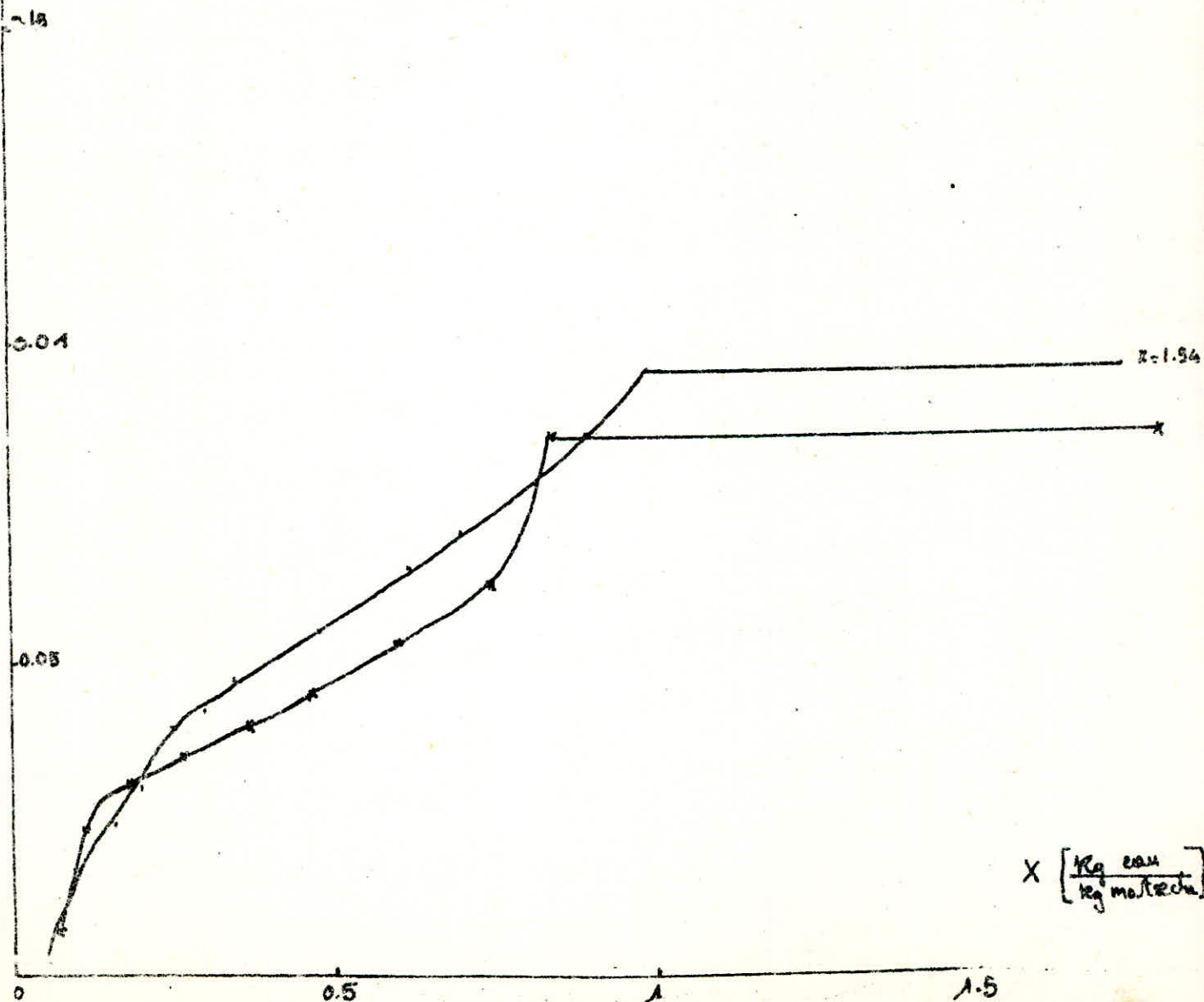
VII

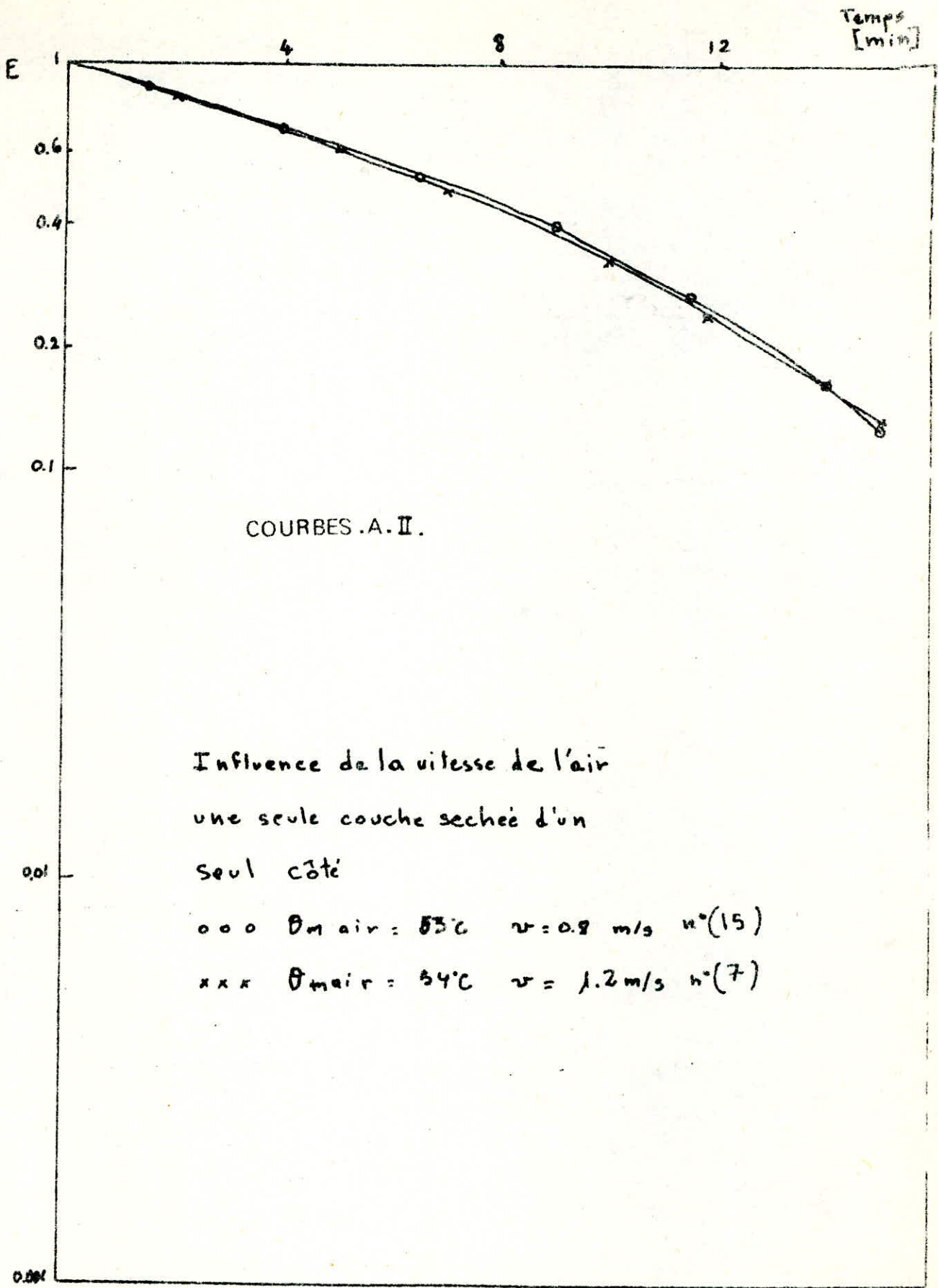
INFLUENCE DE LA VITESSE DE L'AIR
 épaisseur d'une couche séchée
 d'un seul côté

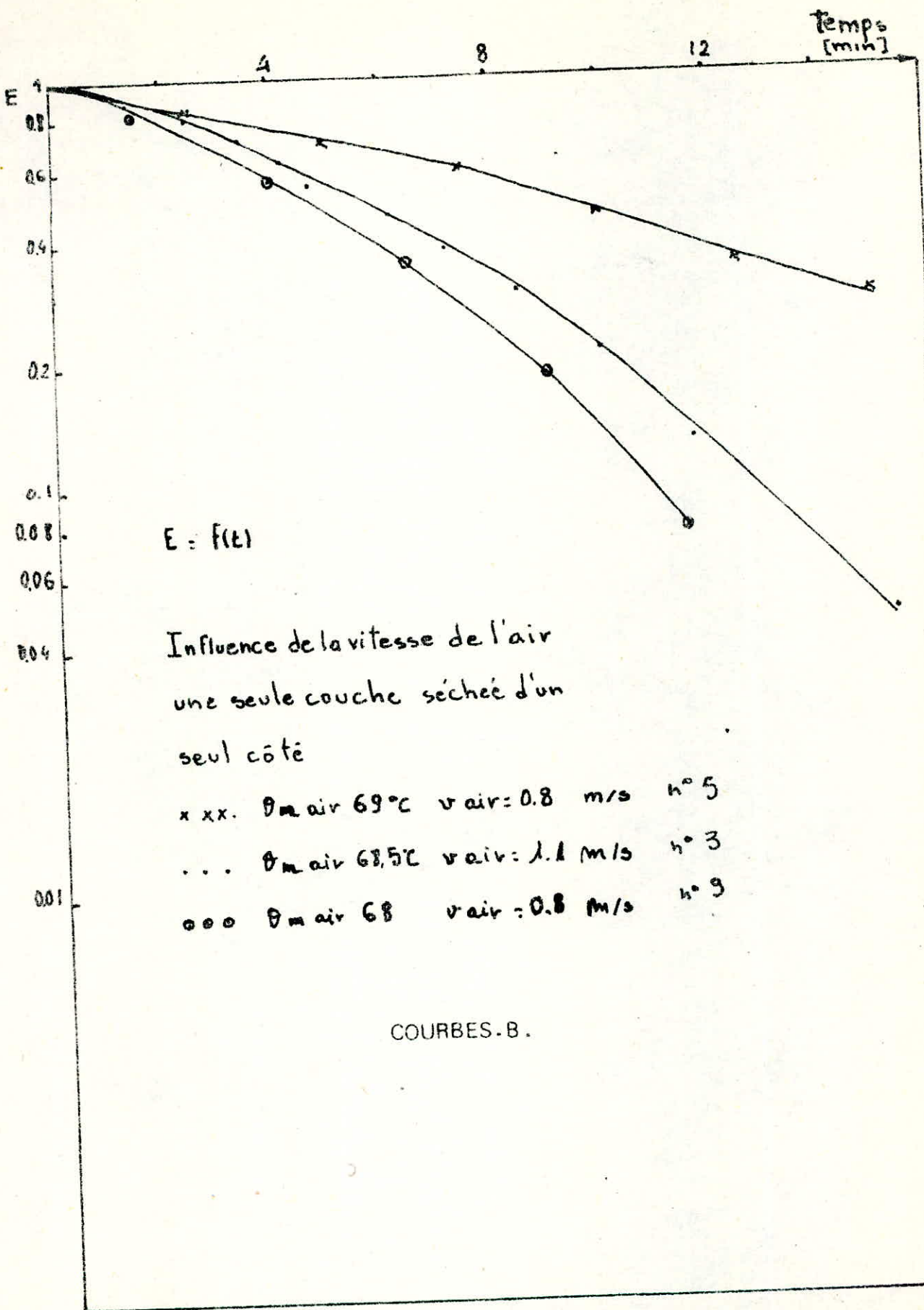
$w(15) \dots \theta_{m \text{ air}} = 54^\circ\text{C} \quad v = 1.2 \text{ m/s}$
 $w(7) \times \times \times \theta_{m \text{ air}} = 53^\circ\text{C} \quad v = 0.8 \text{ m/s}$

$$\frac{dX}{dt} : \left[\frac{\text{kg eau}}{\text{kg mat. sèche. min.}} \right]$$

COURBE. A. I.







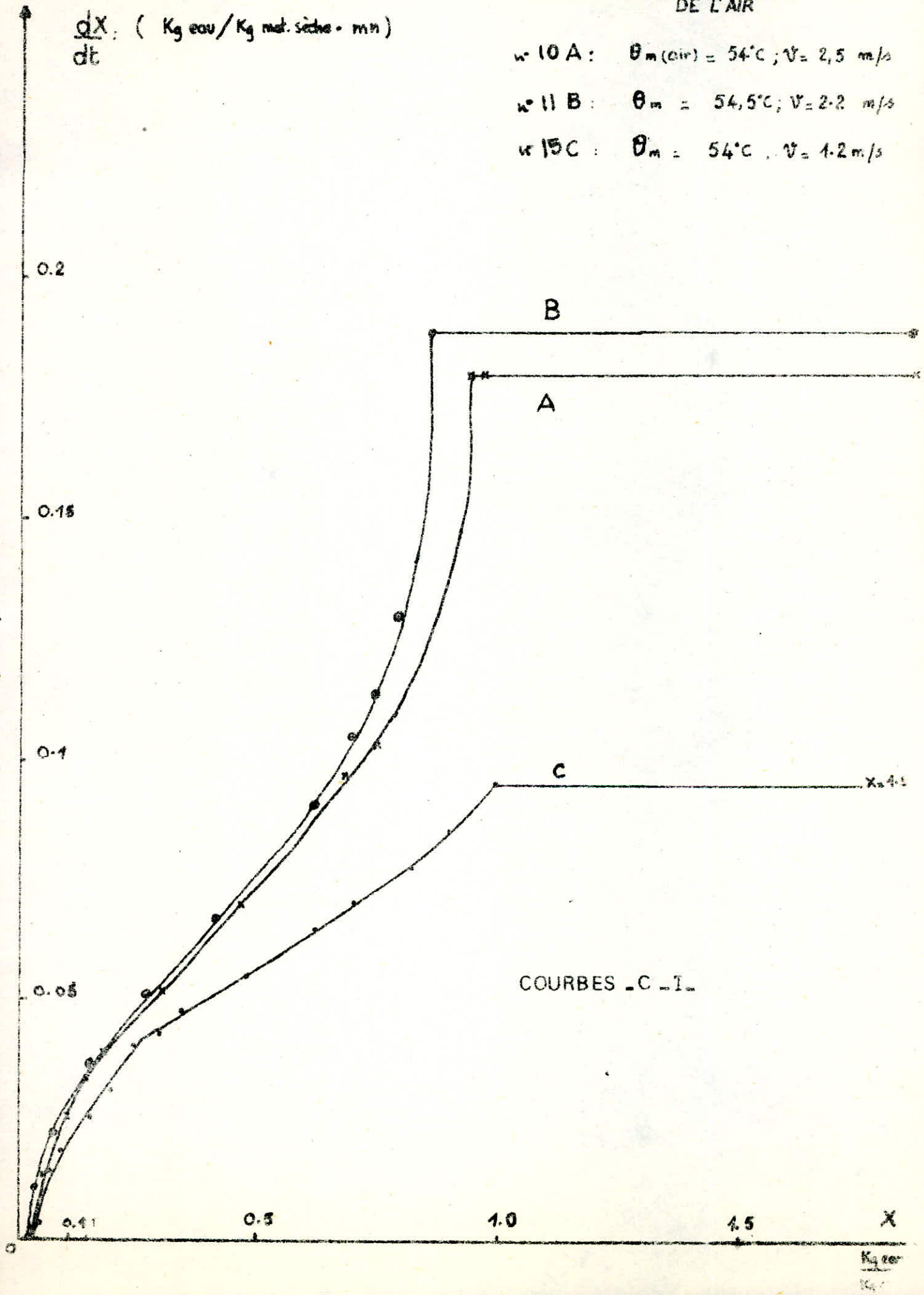
- INFLUENCE DE LA VITESSE -
DE L'AIR

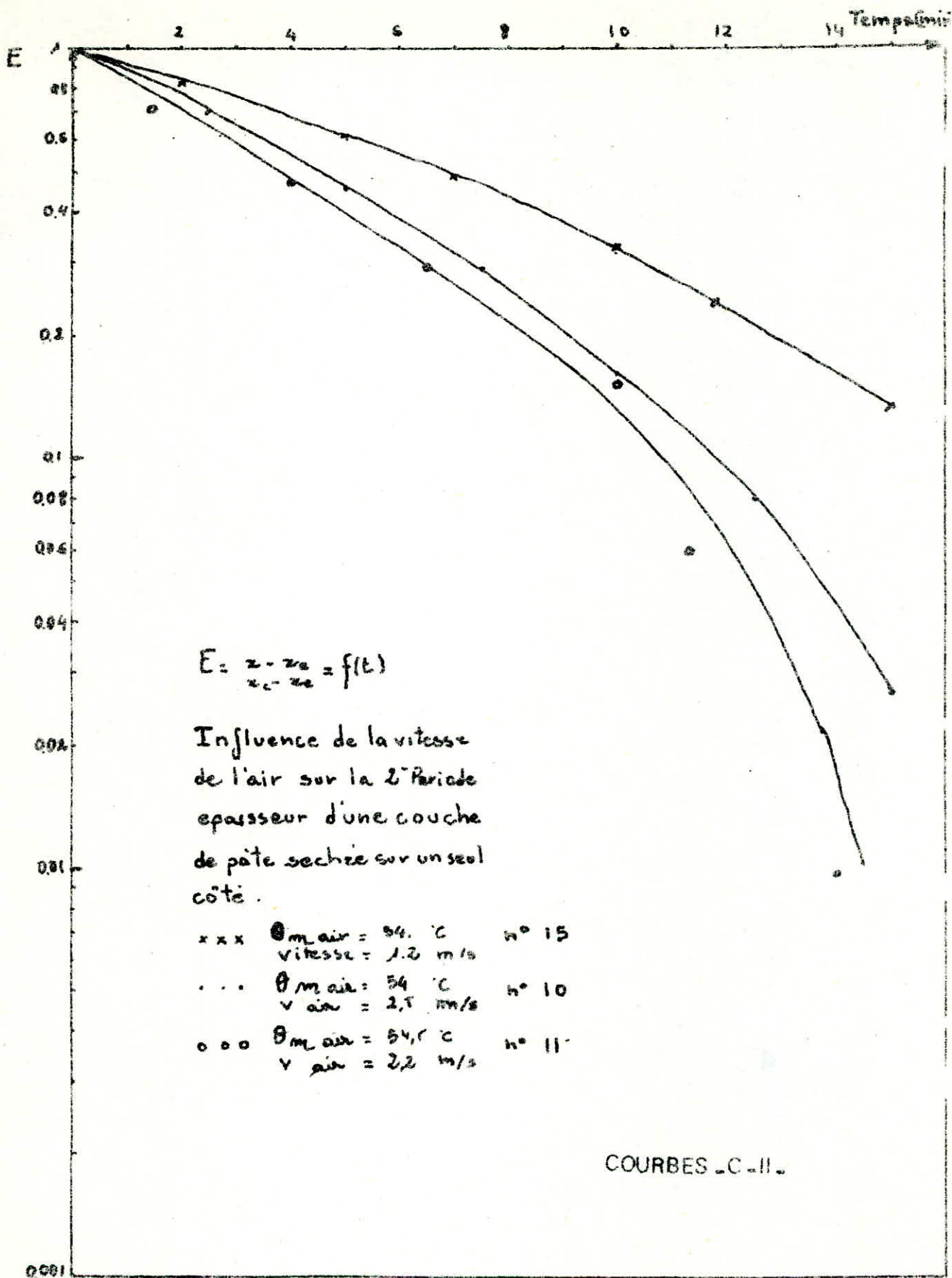
$\frac{dx}{dt}$: (Kg eau / Kg mat. sèche . mn)

n° 10 A : $\theta_m(\text{air}) = 54^\circ\text{C}$; $V = 2,5 \text{ m/s}$

n° 11 B : $\theta_m = 54,5^\circ\text{C}$; $V = 2,2 \text{ m/s}$

n° 15 C : $\theta_m = 54^\circ\text{C}$; $V = 1,2 \text{ m/s}$





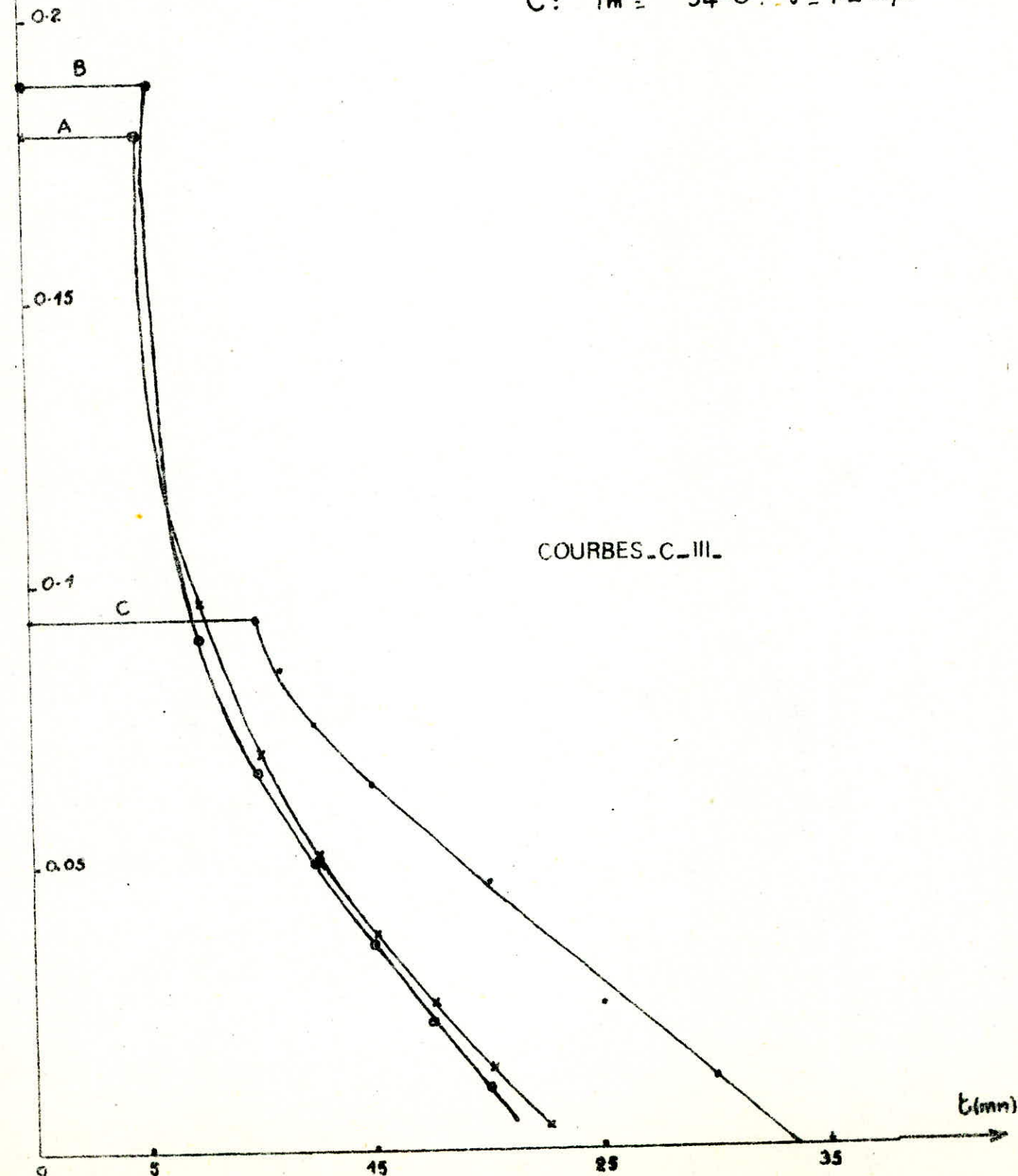
$$\frac{dx}{dt} : \left(\frac{\text{Kg eau}}{\text{Kg mat. seche} \cdot \text{mn}} \right)$$

- INFLUENCE DE LA VITESSE DE L'AIR -

A: $T_m(\text{air}) : 54^\circ\text{C} : V = 2.5 \text{ m/s} \quad n^\circ 10$

B: $T_m = 54.5^\circ\text{C} : V = 2.2 \text{ m/s} \quad n^\circ 11$

C: $T_m = 54^\circ\text{C} : V = 1.2 \text{ m/s} \quad n^\circ 15$



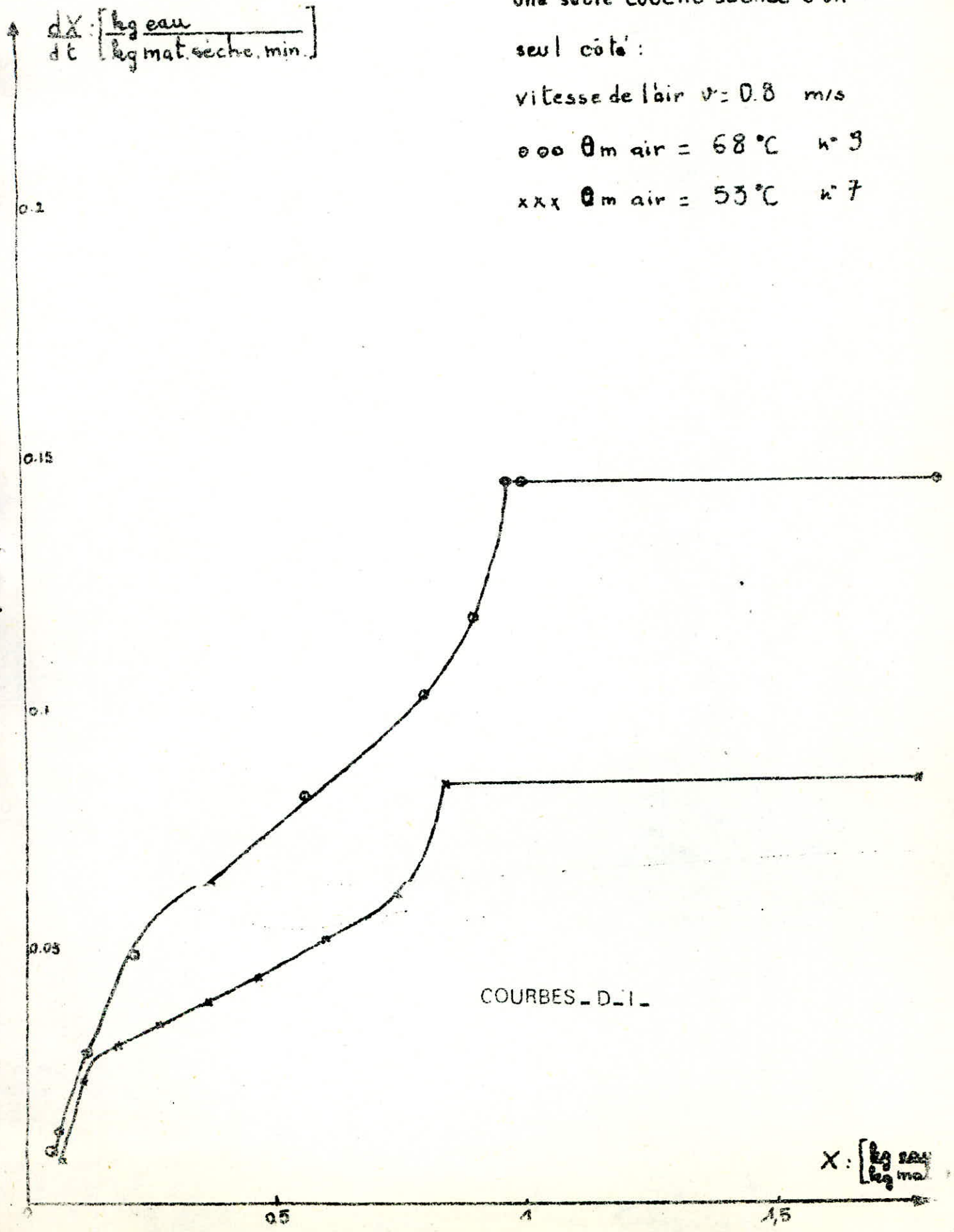
COURBES C-III

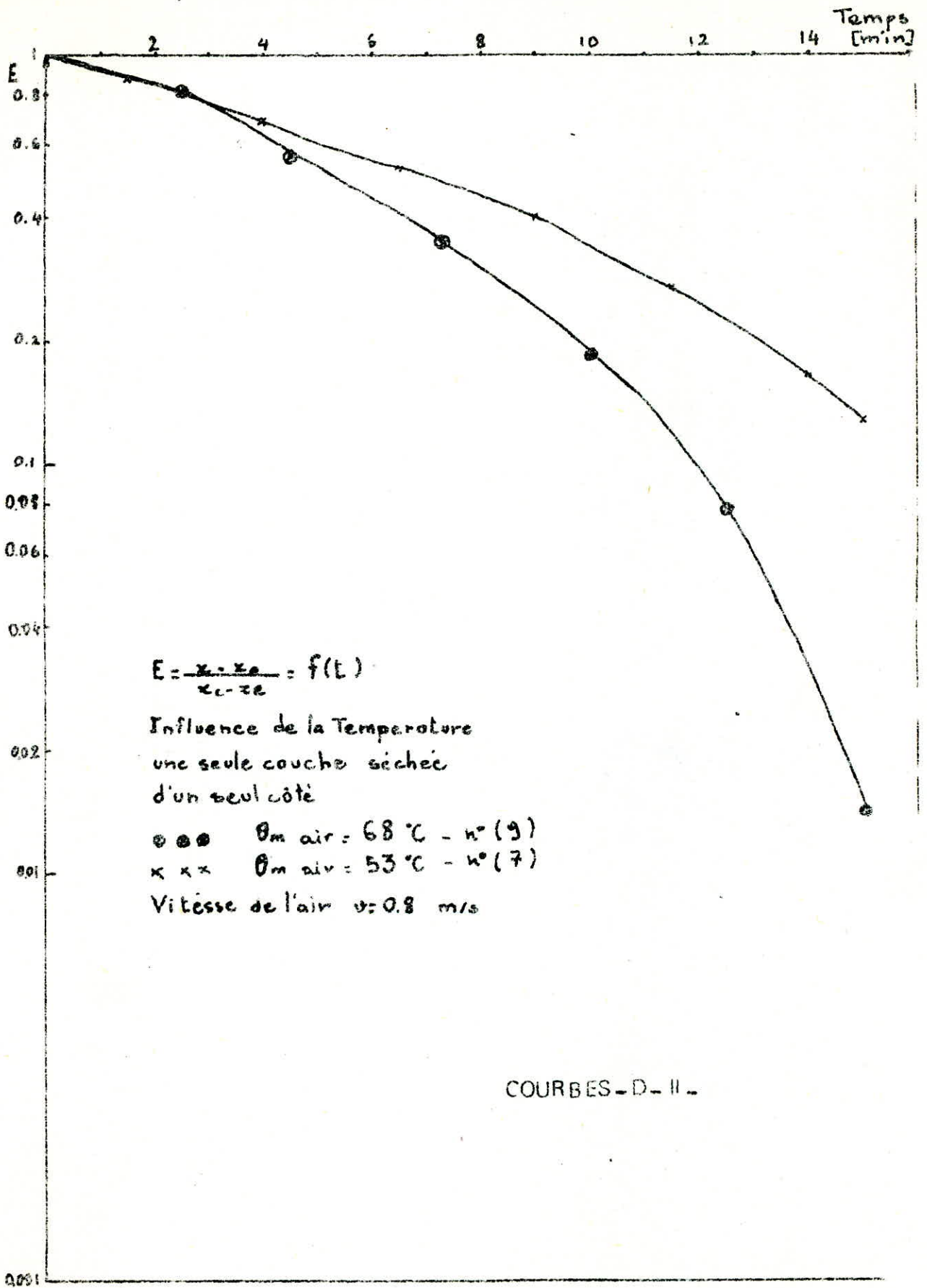
Influence de la Température
 une seule couche séchée d'un
 seul côté :

vitesse de l'air $v = 0.8$ m/s

ooo θ_m air = 68°C n° 9

xxx θ_m air = 53°C n° 7





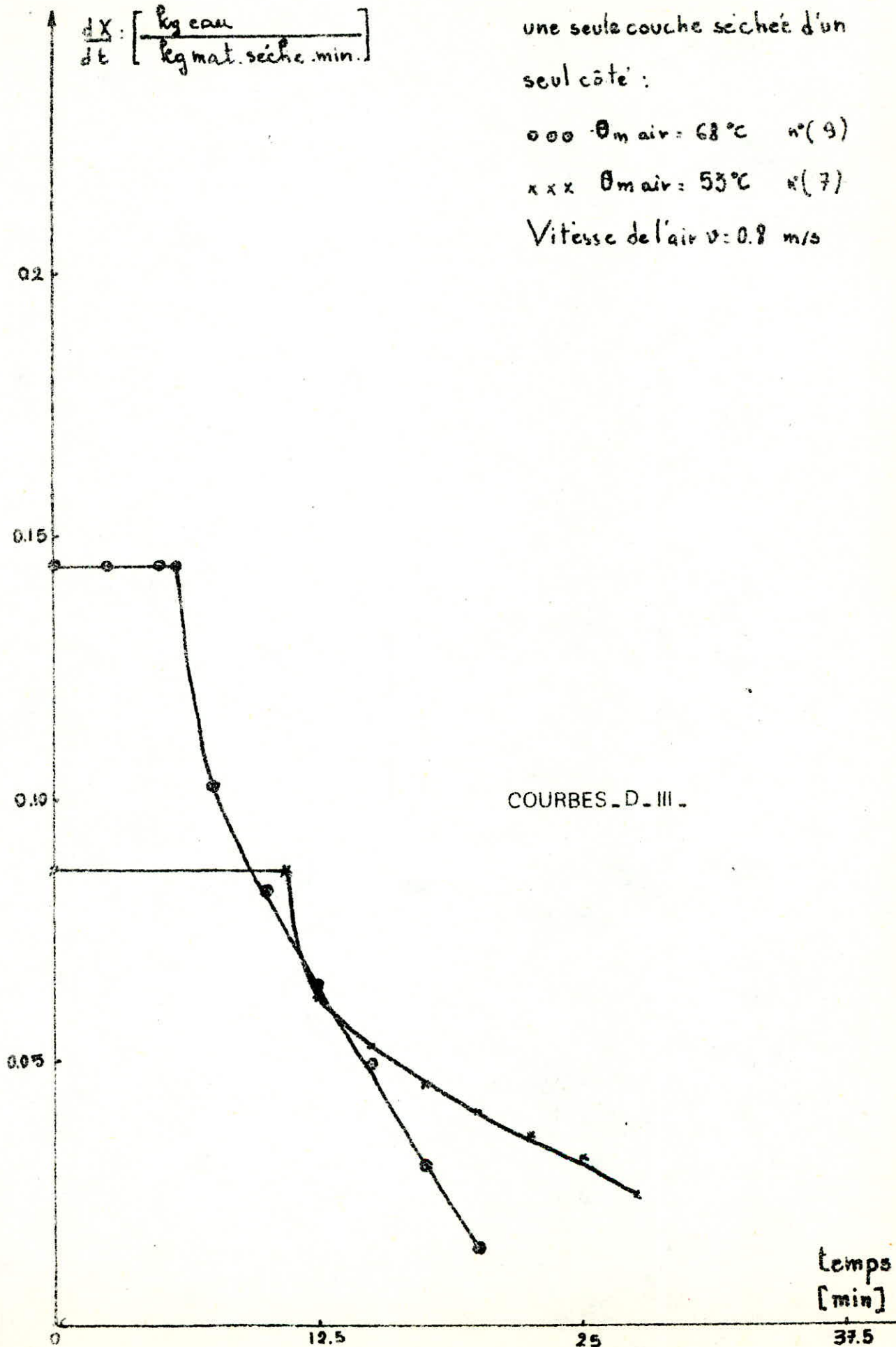
INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

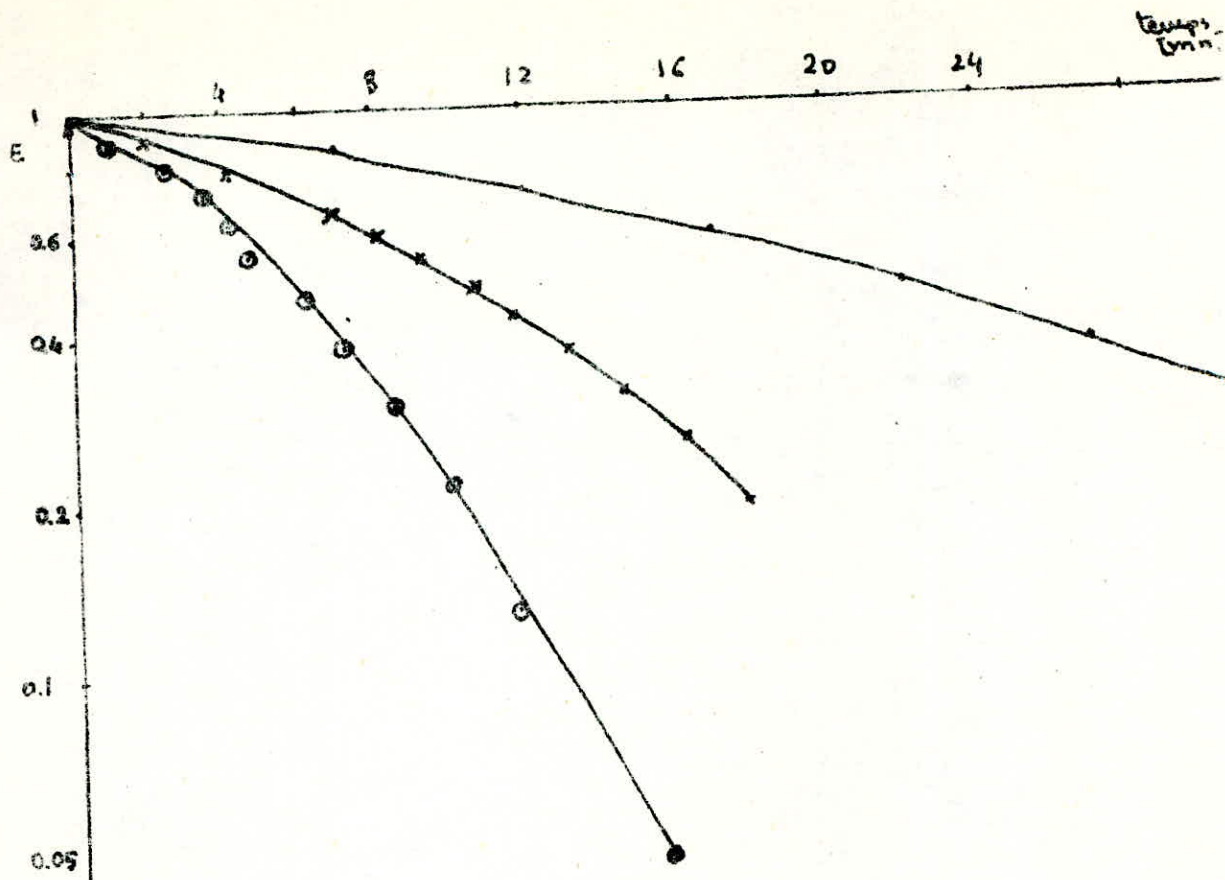
une seule couche séchée d'un
seul côté :

ooo $\theta_{m \text{ air}} = 68^\circ\text{C}$ n°(9)

xxx $\theta_{m \text{ air}} = 53^\circ\text{C}$ n°(7)

Vitesse de l'air $v = 0.8 \text{ m/s}$





Influence de la température
 vitesse de l'air $v = 1.1$ m/s
 épaisseur : une seule couche
 séchée d'un seul côté

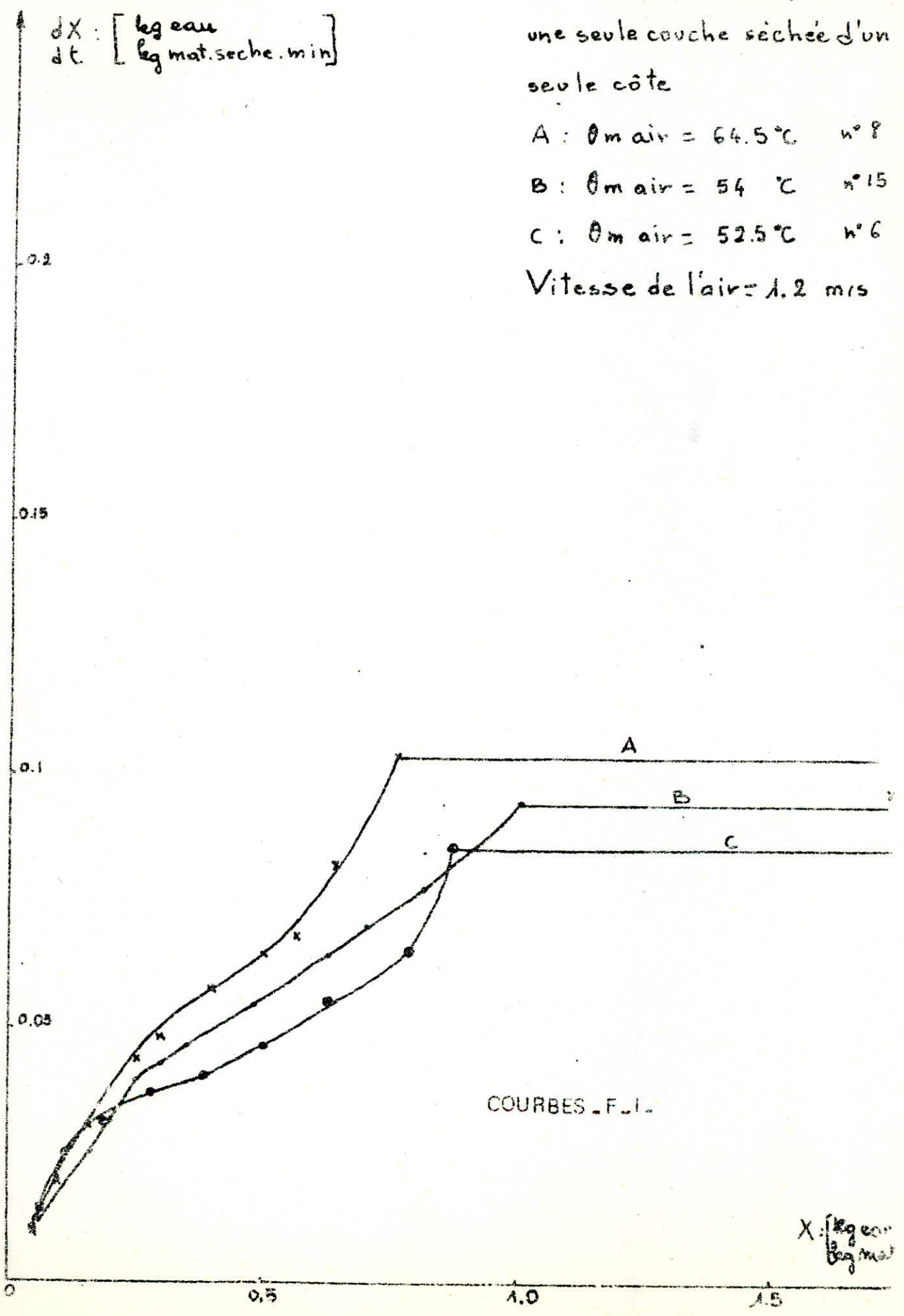
... θ_m air = 41. °C $h^{\circ}(1)$
 xxx θ_m air = 59.5 °C $h^{\circ}(2)$
 ooo θ_m air = 68.5 °C $h^{\circ}(3)$

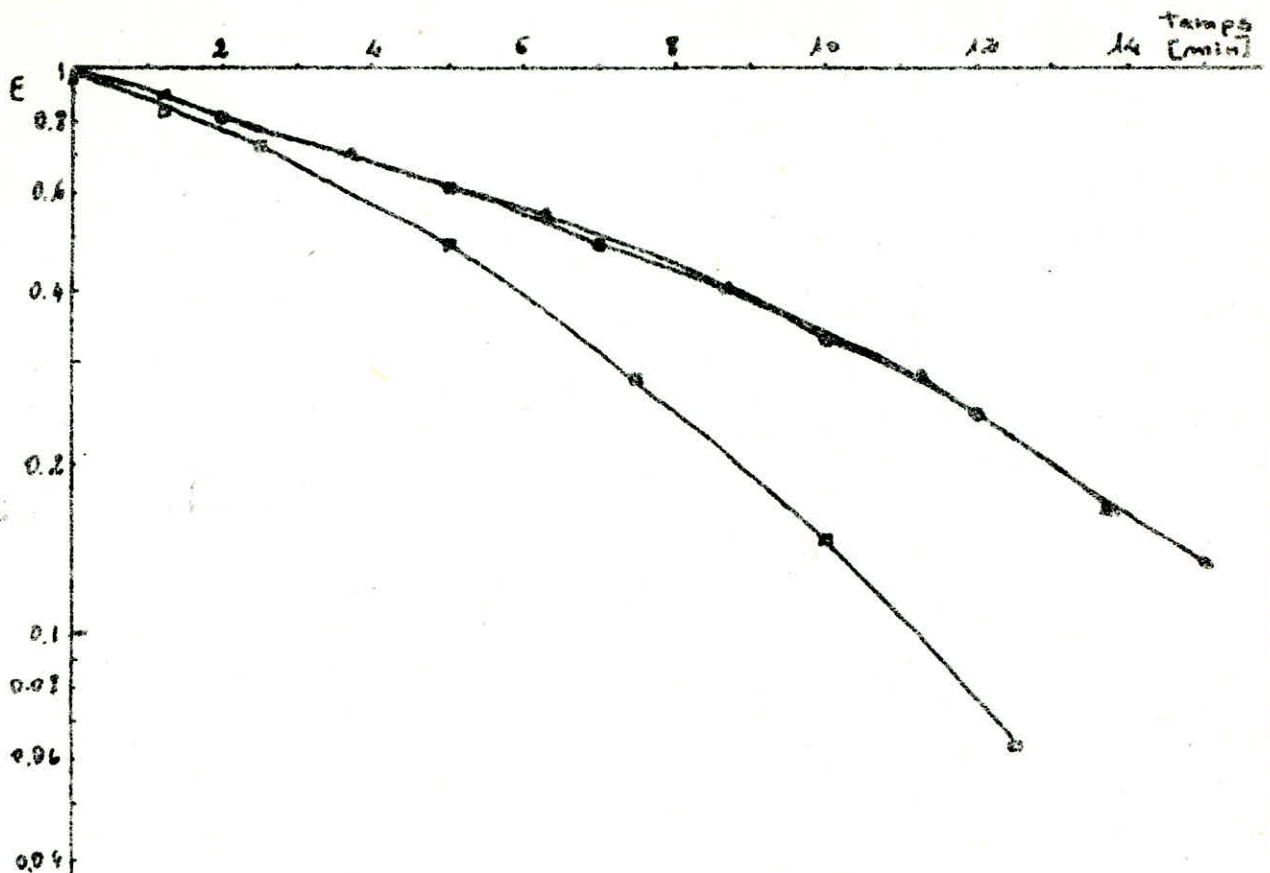
COURBES - E - 1.

Influence de la température
 une seule couche séchée d'un
 seule côté

A : $\theta_{m \text{ air}} = 64.5^\circ\text{C}$ n° 8
 B : $\theta_{m \text{ air}} = 54^\circ\text{C}$ n° 15
 C : $\theta_{m \text{ air}} = 52.5^\circ\text{C}$ n° 6
 Vitesse de l'air = 1.2 m/s

$$\frac{dX}{dt} : \left[\begin{array}{l} \text{kg eau} \\ \text{kg mat. seche. min} \end{array} \right]$$





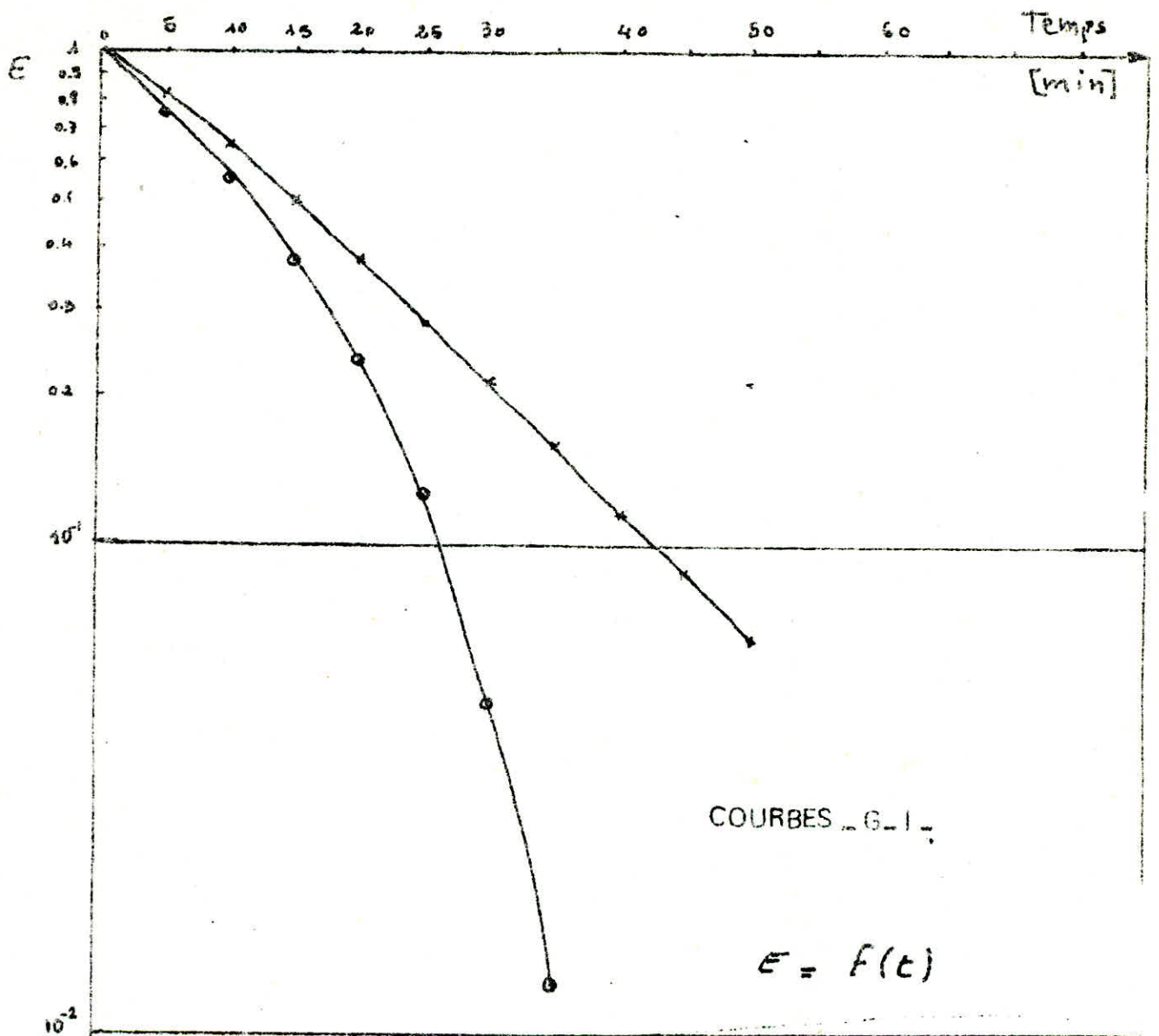
$$E = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = f(t)$$

Influence de la Temperature
 une seule couche sechee
 d'un seul cote

- △△△ θ air = 58,5°C n° 6
- θ air = 54,0°C n° 15
- θ air = 64,5°C n° 8

Vitesse de l'air = 1,2 m/s

COURBES - F. II -



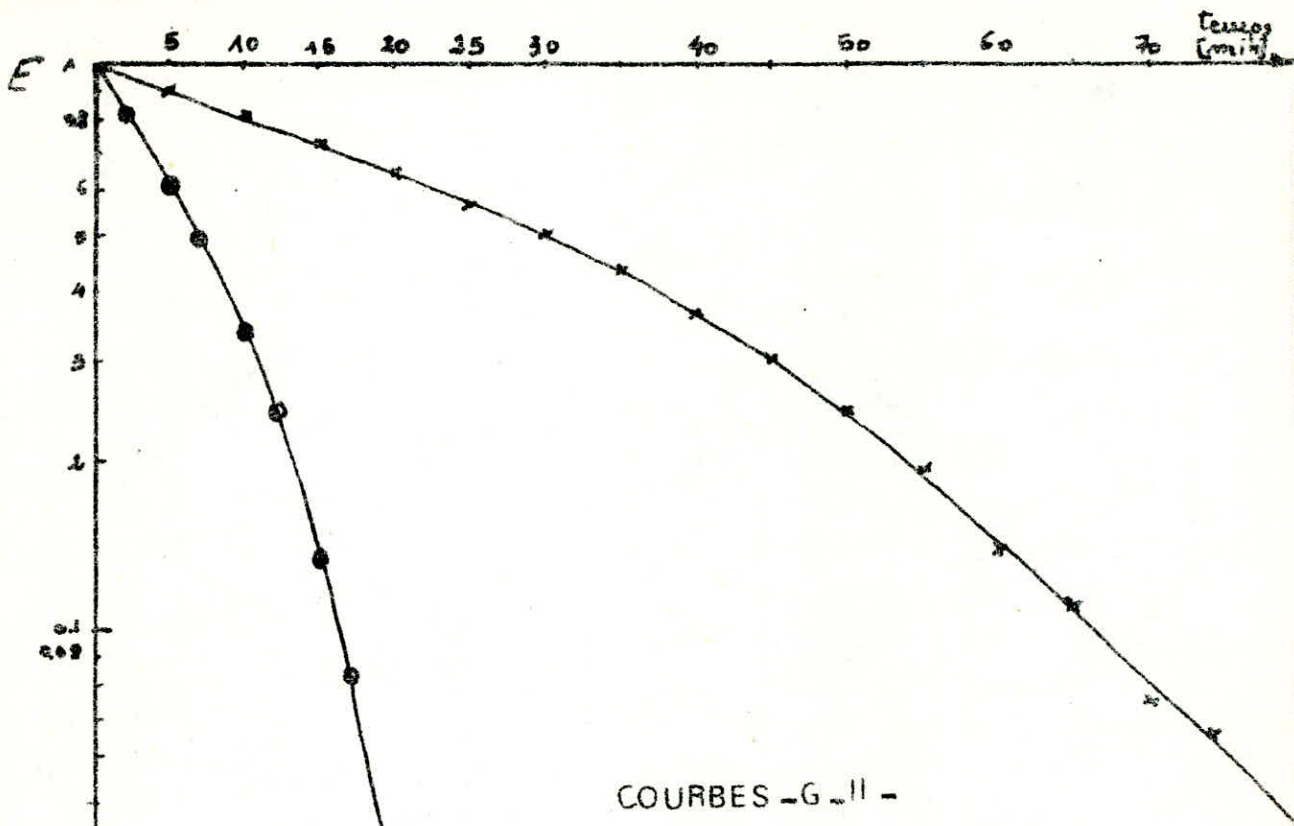
Influence de l'épaisseur

vitesse de l'air 1.2 m/s

n° 12. xx x 2 couches séchées d'un
seul côté $T_{air} = 54^{\circ}C$

n° 13. ooo 2 couches séchées des
deux côtés $T_{air} = 55^{\circ}C$

10^{-2}



COURBES -G- II -

$$E = F(t)$$

INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR

Vitesse de l'air $v = 1.2 \text{ m/s}$

n°14 - x x x 2 couches séchées d'un seul côté
 $T_{\text{air}} = 52.5 \text{ }^\circ\text{C}$

n°15 - o o o 1 couche séchée d'un seul côté
 $T_{\text{air}} = 54 \text{ }^\circ\text{C}$

Interpretation des Résultats

L'allure des courbes de séchage de la pate montre en evidence les deux périodes de séchages.

- Première periode de séchage
- seconde periode de séchage.

Influence de la vitesse de l'air.

1^{er} periode :

Les resultats montre la nette influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage. Ceci suggère que le séchage de la pate à telles humidités, presente la première période de séchage. Elle est mise en evidence sur les courbes de sechage $dx/dt = f(t)$ ou $dx/dt = g(x)$ (courbes A_i, B, C_i) : La vitesse de séchage augmente avec la vitesse de l'air; plus on augmente la vitesse de l'écoulement, moins est epaisse la couche **limite laminaire**, plus la resistance au transfert de matière se trouve diminuer : le coefficient de transfert augmente avec la vitesse de l'air.

2^{eme} periode :

Elle apparait quand l'humidité critique est atteinte (point d'inflexion sur la courbe $x = h(t)$).

Pour des faibles vitesse de sechage et de temperature moyenne (courbe A_i), la vitesse de l'air n'a pratiquement pas d'influence sur cette periode : la resistance au transfert est negligeeable par rapport à la resistance interne du solide.

Il se trouve que pour des grands ecart de vitesse (on pour le cas de grande température) B, C_i . On observe une influence due à la variation de l'etat de surface du produit qui est extremement sensible à la température et à la vitesse de l'air qui provoque soit des fissures, donc qui change l'etat interne et externe du produit, soit une diminution ou une deformation de la surface causé par un sechage non homogène, donc change les conditions de sechage : la pate se trouve séchée des deux côtés.

Influence de la température.

Les resultats montrent une influence enorme de la température de l'air, une augmentation de l'air entraine une elevation de gradient de température de la 1^{er} periode. Dans la 2^{eme} periode le **produit** s'echauffe, le coefficient de diffusion augmente avec la température ce qui fait que la vitesse de sechage de **ce** produit moins vite; courbes (D_i, E_i, F_i)

Influence de l'epaisseur :

L'influence de l'epaisseur se traduit sur les courbes (G_i) representant $\ln E = f(t)$, par une augmentation de la pente :

Plus la couche est mince, plus la pente est grande.

- Ce qui peut être également une explication pour la variation de la linearité de ces courbes en effet lors du séchage, la pâte subit un retrait, donc son épaisseur diminue de plus en plus, la courbure est de plus en plus accentuée.

- Critiques des résultats

Les divers conditions dans les quelles s'effectue l'opération de séchage se traduisent par des courbes de séchage extrêmement différentes les unes des autres.

- l'échantillon séché est de dimension faible, ne nécessite pas un temps de séchage long : on atteint l'état d'équilibre à 35 minutes.
- Les résultats des essais effectués en pesant à des intervalles de temps courts, ne présentent aucune régularité. Car avec les fluctuations de la température et le fait d'ouvrir plusieurs fois le séchoir, (le produit se refroidit), on introduit énormément d'erreurs qui ne sont pas régies par des lois et qu'on ne peut déterminer leur sens.
- On peut citer quelques erreurs dues.
 - aux conditions expérimentales que l'on ne peut contrôler.
 - répartition irrégulière de l'humidité
 - refroidissement du produit.
 - retrait.
 - pâte non homogène
 - variation de la température.

Remarque

On peut dire que les propriétés du produit imposent une limite à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur et à celle du coefficient de transfert de matière. Or dans les relations déduites on a considéré comme invariable la surface d'échange, c'est à dire la surface du corps à sécher. Pour la cellulose qui se contracte fortement au cours du séchage, ce préalable ne peut être admis, dans les conditions de températures et de vitesses de l'air élevées. La résolution du phénomène de séchage dans des conditions variables conduit à des considérations théoriques très poussées, et nécessite un sécheur expérimental on l'on pourrait faire des pesées en continue, et humidifier l'air.

V - Suggestion

V 1- Sechoir à canaux avec cellules de sechage :

Dans des sechoirs , à canaux où la temperature et l'humidité de l'air peuvent être réglées de façon satisfaisante sur toute la largeur de canal, étant donnée, que chaque cellule de sechage possède son propre ventilateur et son propre registre, le sechage de la pate à papier devra être programmer. On peut citer 3 zones importantes de séchage:

- (1) - Préséchage : où la pate est séché à une température de l'air l'ordre de 55°C; Pour éviter un sechage energique dans la phase qui suit.
- (2) - Sechage à temperature maximum que peut supporter le produit humide :(evaporation superficielle)

La pate encore humide doit être séché à une temperature maximum (70°C) tout en diminuant l'humidite de l'air.

- (3) - Sechage à la temperature maximum que peut supporter le produit sec : 60°C.

Des deteriorations sont à craindre du fait que le produit pourrait être quelquefois surchauffé ou surséché.

V2 - sechoir à canaux à une seule etape.

Le procédé precedent diffère plus ou moins des procédés à équicourants ou à contre courant proprement dits.

On pourrait approché ces performances en combinant, un procédé à contre courant pour éviter que la pate humide ne se séche, au debut du sechage energiquement, avec un procédé à equicourant pour parer à la sensibilité du produit sec à la temperature.

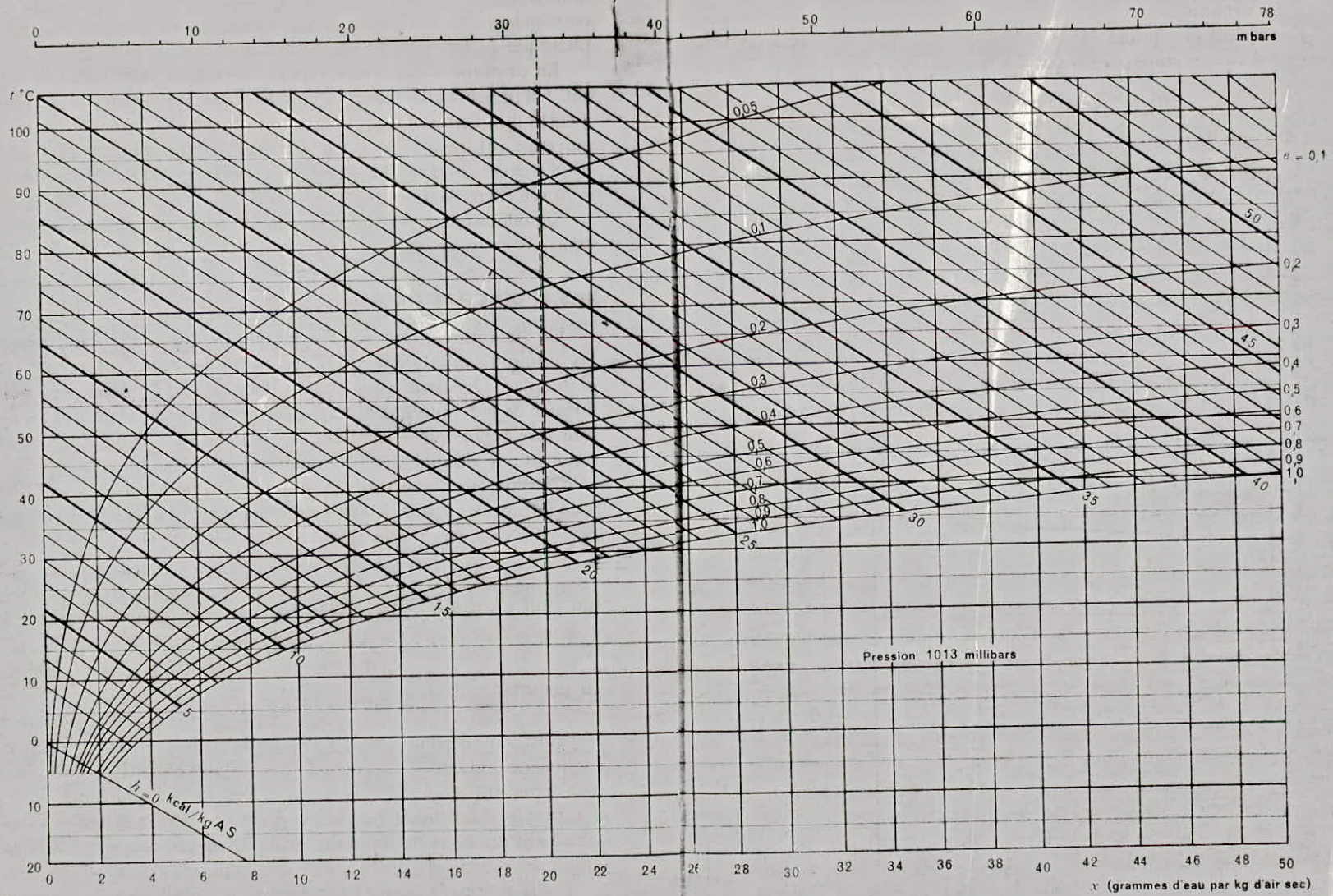


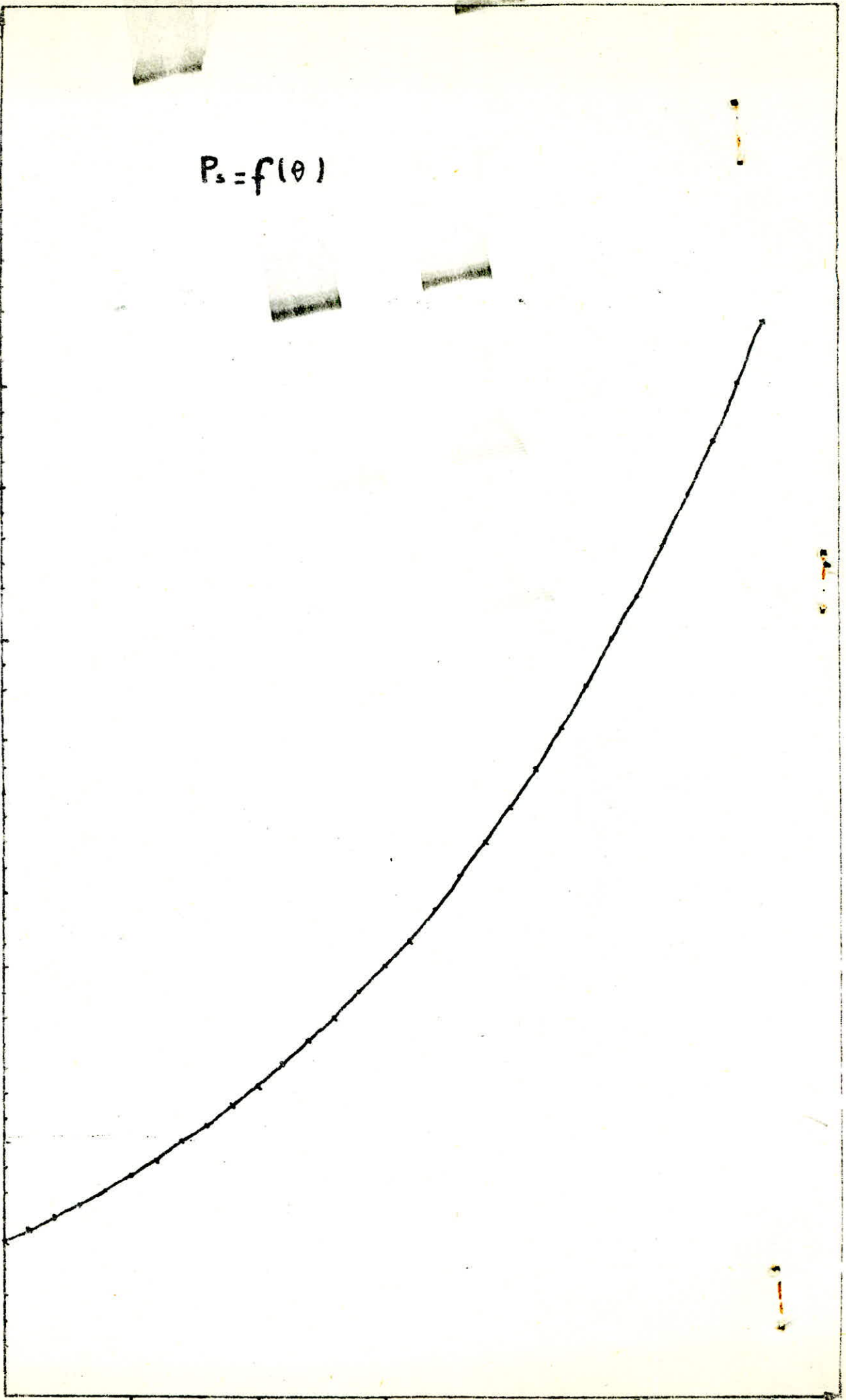
FIG. 467

Diagramme h, x de l'air humide

P_s
mbars

$$P_s = f(\theta)$$

44
42
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2



θ Temperature $^{\circ}\text{C}$

— B I B L I O G R A P H I E —

- 1 - J.H. Perry, R.H. Perry, C.H. CHILTON, S.D. Krikpatrick,
Chemical Engineer's Handbook, 4^e ed. Mc Graw Hill, 1963.
- 2 - R.E. Treybal, Mass. Transfer operations
2^e ed. Mc Graw Hill, 1968.
- 3 - F. Kneule, le Sechage, Eyrolles, 1964.
4. - M. Bailly, 2a. Production et transfert de chaleur.
ecoulements, Bordas 1971.
- 5 - M. Bailly. 2b. Machines thermiques et frigorifiques tables numeriques,
Bordas 1971.
- 6 - A. Dascalescu, le Sechage et ses applications industrielles,
Dunod 1969.
- 7 - Y. Adda et J. Philibert, la Diffusion dans les solides, P.U.F. 1966.
- 8 - Techniques de l'Ingénieur, J 2710, J 2312.

