

8/80

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

1EX

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Sujet :

CINETIQUE

DE SECHAGE

DE PRODUITS ALIMENTAIRES.

Proposé par : J. GROCHOWSKI Etudié par : T. AHMED ZAÏD

Promotion : Janvier 1980.



DEDICACE

Je dédie ce ~~tra~~ travail à tous ceux qui me
sont chers.

REMERCIEMENTS.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à:

Mr. GROCHOWSKI qui m'a guidé tout au long de ce travail

Mr BELABBES POUR AVOIR EU L'AMABILITE DE PRESIDER LE JURY.

Mr CHITOUR, GALICKI, AMANOWICZ pour avoir bien voulu
en faire partie.

MEMBRES DU JURY.

Promoteur: Mr. GROCHOWSKI Maître de conference à l'E.N.P.A.

President: Mr. BELABBES Maître assistant, directeur des études à l'E.N.P.A.

Examineurs: Mr. S.E.CHITOUR DOCTEUR ES SCIENCES *Maître de Conf.*
Chef du département Génie Chimique.

Mr. GALICKI Maître de conference à l'E.N.P.A.

Mr. AMANOWICZ Maître de conference à l'E.N.P.A.

P L A N .

I INTRODUCTION

II THEORIE DU SECHAGE

III APPAREILLAGE & ACCESSOIRES

IV PARTIE EXPERIMENTALE

V INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES

VI ASPECT DU PRODUIT TRAITÉ

VII CALCUL D'UN SECHOIR INDUSTRIEL

Depuis des temps immémoriaux, les hommes ont cherché des moyens de conserver le plus longtemps possible les produits de leurs chasses et les fruits de leurs récoltes. Ils ont dû remarquer que certains aliments, les fruits notamment, conservaient toujours un peu de leur saveur, après même que la nature les ait desséchés par l'action du soleil. C'est sans doute ainsi que devaient prendre naissance les premières méthodes de séchage: on n'avait qu'à étaler les produits au soleil, et, après une bonne récolte, on parvenait à conserver la majeure partie pendant plusieurs saisons.

Bien entendu, tous les produits ne se prêtaient pas facilement à l'opération de séchage et on comprit que pour accélérer le processus, un apport de chaleur supplémentaire était souvent nécessaire. C'est ainsi que les oignons, les poivrons, le raisin sont suspendus en grappes dans les maisons, là où la chaleur du foyer leur parvient et leur assure la conservabilité. Des espèces de combles en bois ou en roseaux sont également aménagés au-dessus du canoun; on y étend les glands et autres graines comestibles.

On comprend alors le rôle important que joue le séchage dans les industries de consommation.

On entend par séchage le procédé mis en oeuvre pour éliminer le liquide d'un produit, soit par évaporation, soit par vaporisation à l'aide, en règle générale, d'un apport de chaleur; le séchage est donc une opération de transfert simultané de matière et de chaleur.

C'est précisément l'existence de ce transfert de chaleur qui caractérise le séchage et qui le distingue de la filtration et des autres procédés purement mécaniques de séparation des solides et des liquides. Ces dernières techniques n'éliminent d'ailleurs pas la totalité du liquide, et sont souvent suivies d'un séchage, qui apparaît ainsi comme une opération où le liquide à séparer constitue une fraction relativement peu importante de la matière à traiter.

Il existe plusieurs méthodes de séchage, qui tiennent compte surtout et avant tout de la nature de la substance et de son état.

Du point de vue économique, un produit ne doit être traité qu'en fonction des caractéristiques exigées. C'est ainsi que les aliments sont défavorablement influencés par une haute température. De même, le bois ainsi que d'autres produits façonnés éprouvent, lors d'un séchage trop rapide, des modifications de forme indésirables.

Les trois méthodes principales de séchage sont /

- le séchage par convection (ou direct)
- le séchage par conduction.
- le séchage par rayonnement.

Les trois méthodes diffèrent par le mode d'apport de la chaleur.

° Dans le séchage par convection la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide est apportée par un gaz ou une vapeur qui passe à travers cette substance.

° Dans le séchage par conduction, le produit à sécher se trouve dans des récipients chauffés ou se déplace au-dessus de ceux-ci.

° Dans le séchage par rayonnement, la chaleur est transmise par les surfaces rayonnantes voisines.

~~dans ce~~ qui suit, seul le premier type de séchage est considéré.

Le but de ce projet est l'étude de la cinétique de séchage de produits alimentaires, en lit fixe et en lit fluidisé, ainsi que le projet d'un séchoir industriel, en tenant compte des résultats obtenus.

II.i Généralités.

II.ii Humidité d'un solide.

Le liquide qui accompagne un solide peut consister en un liquide d'hydratation ou en un liquide de constitution. le liquide d'hydratation est retenu:

-Soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide sous l'action de forces superficielles;

-Soit d'une façon plus intime sous l'action de forces capillaires, à l'intérieur des interstices ou des pores plus ou moins fins du solide.

Les solides imprégnés de liquide d'hydratation sont dits HUMIDES.

Le séchage a pour but d'éliminer plus ou moins complètement le liquide d'hydratation et de transformer ainsi les produits humides en produits secs.

II.i2 Teneur en humidité.

La teneur en humidité d'un solide s'exprime par la masse de liquide (en Kg) associée à un Kg de matière solide à l'état de siccité. On la désigne par X.

L'humidité s'exprime parfois en pourcentage; elle est dans ce cas égale à 100 X.

II.i3 Hygroscopicité.

La présence d'humidité dans un solide se traduit par une certaine tension de vapeur \bar{w} qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

a) Si le liquide adhère à la surface externe du solide, il n'est retenu que par des forces superficielles peu intenses. La tension de vapeur \bar{w} du liquide n'est alors fonction que de la température et elle égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à la température considérée.

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus fins.

Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est que faiblement retenue.

Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur w du liquide est égale à la tension maximale du liquide pur à la température où l'on se trouve. Un solide qui se comporte de cette façon est dit ^{non} hygroscopique.

b) Si par contre, les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires ~~sont~~ sont intenses et peuvent retenir en profondeur des quantités notables d'humidité. Dans ce cas la tension de vapeur w du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température et le solide est dit hygroscopique.

II.4 Courbes d'équilibre x_{eq} pour T constante.

Les facteurs déterminants pour obtenir les paramètres fonctionnels d'une installation de séchage, pour un certain matériau, se déterminent en général par voie expérimentale. Il est parfois utile pour certains procédés de suivre l'évolution de la teneur en humidité x du produit en fonction de l'humidité relative de l'air φ . Les courbes sont tracées en fonction de la teneur en humidité à l'équilibre, pour une température donnée. Elles servent, en premier lieu, à établir le point final du processus, dans le cas du séchage dans une atmosphère déterminée (x, φ et T connues). De ces courbes, on en déduit aussi les conditions de séchage dans un séchoir. Dans certains cas elles sont utiles pour déterminer les conditions d'entreposage dans des atmosphères conditionnées, de matériaux qui adsorbent et retiennent de grandes quantités d'eau. Les courbes d'équilibre peuvent être calculées à l'aide d'une équation BET.

Likov donne une relation empirique plus simple qui ne demande que la détermination de deux constantes, a et b .

$$x_{eq} = a / (b - \varphi) \quad (II.1)$$

materiau sèche à l'air	a	b
pain blanc	17.70	2.00
Nouilles	-28.40	-0.63
Amidon	22.50	-1.00
Pommes	12.10	1.05
Blé(dur)	114.00	5.00
Graines de tournesol	252.00	20.00
Feuilles de tabac	-341.50	-5.00

- constantes a et b
pour divers substances
soumises au séchage
à T = 25°.

Les matériaux sensibles à la température sont ceux qui sont séchés à l'air, à une température inférieure à 100°C. Pour ce genre de matériaux, les courbes $x_{\text{eq}} = f(\varphi)$ sont significatives et importantes, vu que les processus ont lieu à des températures peu élevées. Dans le tableau ci-dessous se trouvent les valeurs d'équilibre de l'humidité de certains matériaux, en fonction de l'humidité relative de l'air. (d'après Likov.)

materiau	HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (%)						
	10	30	50	60	70	80	90
Farine	2.20	5.05	8.50	10.08	12.60	15.80	19.00
Nouilles	5.00	8.76	12.20	13.75	16.60	18.85	22.40
Amidon	2.20	5.20	7.40	8.30	9.20	10.60	12.70
Pommes	--	5.00	11.00	18.00	25.00	40.00	60.00
Feuilles de tabac	7.40	13.90	19.80	23.00	27.10	33.40	--
Grains de blé	--	9.30	--	13.00	--	--	24.00
Cellulose	3.00	6.00	3.30	11.30	13.90	17.50	22.00
Papier écriture	3.25	5.00	6.20	6.90	8.15	10.40	14.00
Argile	--	3.00	4.50	4.80	5.00	6.00	7.90

La figure ci-dessous représente des courbes d'équilibre $x=f(p)$ des pommes de terre à différentes températures.

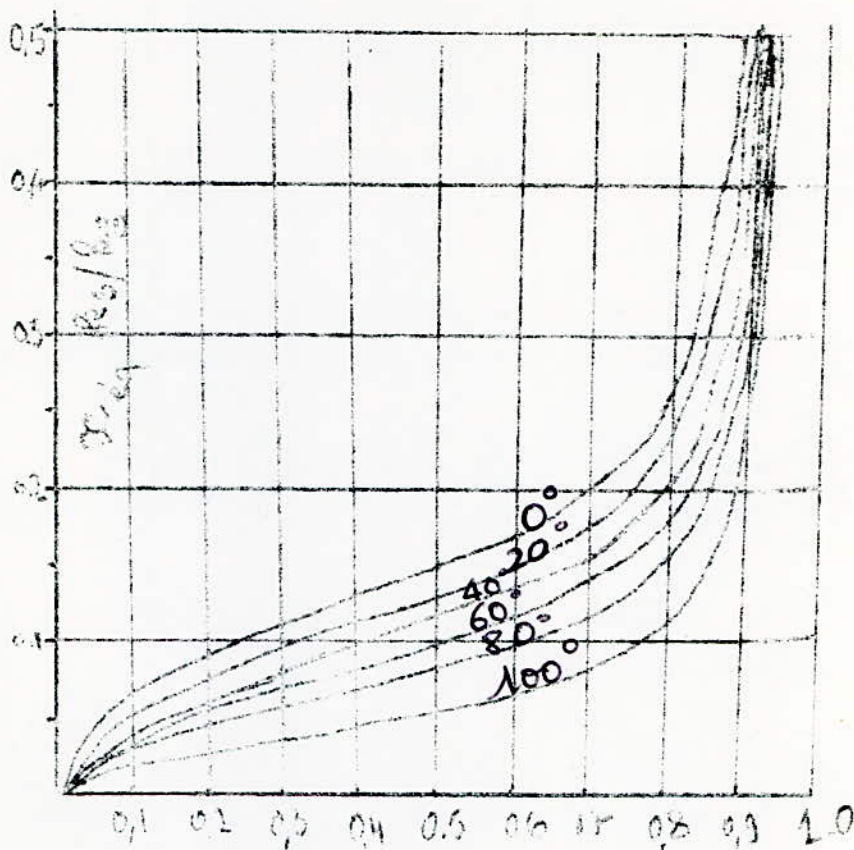


fig. II.i

II. 2 LE SECHAGE: ELEMENTS DE THEORIE.

II.2i Courbes de séchage

Le produit au repos est soumis à un passage de fluide (agent sécheur). Les conditions du séchage (température, humidité et vitesse de l'air) sont maintenues constantes. Le produit est pesé à des intervalles de temps déterminés au cours du séchage, ce qui permet de tracer une courbe qui donne la teneur en humidité du produit en fonction du temps (fig. 3).

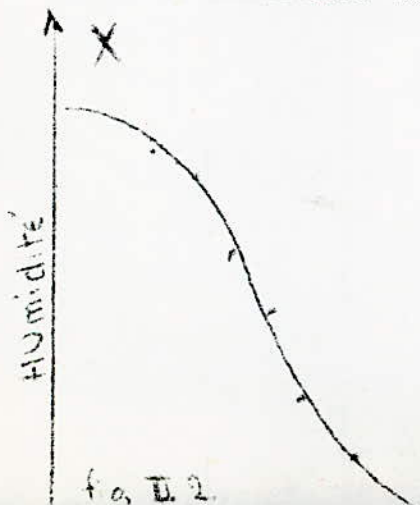


fig. II.2

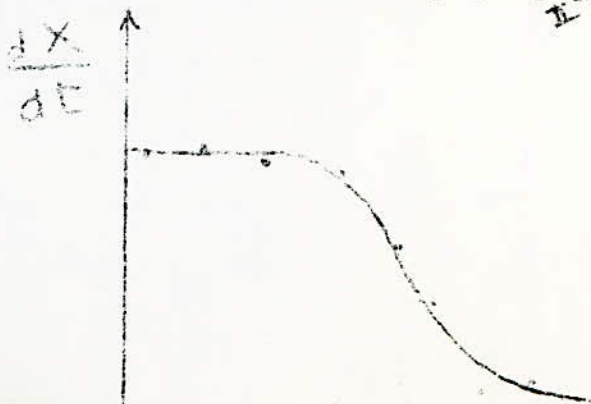
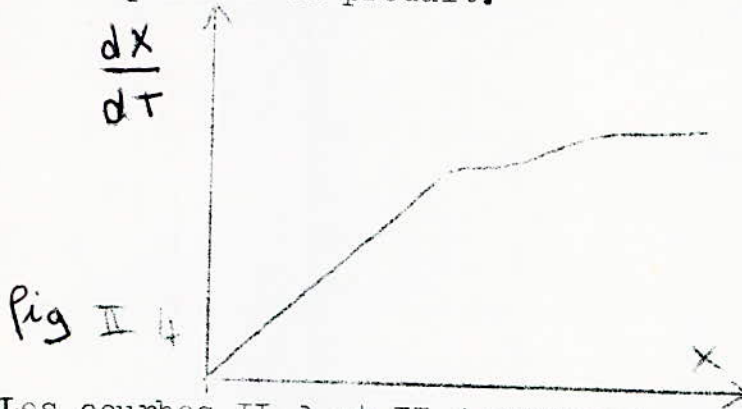


fig. II.3

La courbe de la figure II.3, obtenue en différentiant la courbe de la figure II.2, donne la modification de l'humidité du produit en fonction du temps. Cette modification rapportée à l'unité de surface est appelée vitesse de séchage.

La figure II.4 indique la modification de l'humidité en fonction de l'humidité du produit.



Les courbes II.3 et II.4 montrent que le phénomène du séchage se divise en deux périodes caractéristiques, l'une à vitesse de séchage constante, l'autre où cette vitesse présente un ralentissement.

II.2ii Première période: l'évaporation superficielle.

Le séchage d'un produit humide commence très souvent par une période de vitesse de séchage constante. L'humidité gagne si rapidement cette surface que la pellicule d'eau qui s'y trouve se renouvelle vite. Son séchage est alors analogue à l'évaporation d'une surface liquide.

Par suite du mouvement de l'eau; il se produit à l'intérieur de la substance des différences d'humidité d'où il résulte une diminution de la teneur en humidité superficielle. Celle-ci reste humide aussi longtemps que la force d'aspiration des capillaires suffit à amener rapidement de l'intérieur la quantité d'humidité qui s'évapore à la surface, dans les conditions qui règnent dans l'air ambiant.

Etant donné que la succion exercée par les capillaires est d'autant plus forte que les pores sont plus étroits, les ménisques des pores les plus éloignés de l'orifice superficiel rétrogradent et cheminent à l'intérieur du produit. Par suite de la formation de "trous d'air" dans les pores larges, la surface, qui fournit l'évaporation, se rétrécit d'une petite fraction de la surface totale.

En outre, étant donné qu'il se forme également dans les pores étroits un nombre de plus en plus grand de ménisques rétrogrades, le trajet de la diffusion de la vapeur augmente. Pour ces deux raisons, au dernier stade de l'évaporation superficielle, la vitesse de séchage ne peut rester constante.

II.2i2. Le point d'inflexion.

Lorsque la partie interne de la substance n'est plus susceptible de fournir à la surface la quantité d'humidité que l'air est à même de vaporiser, nous constatons donc un ralentissement de la vitesse de séchage. Le début de cette décroissance se traduit en général par une inflexion plus ou moins prononcée de la courbe de séchage.

Étant donné que dans la région qui se trouve après le point d'inflexion, le séchage est dominé par d'autres conditions physiques que pendant la première période, il est d'une très grande importance de connaître l'emplacement de ce point afin de mieux juger les phénomènes du séchage et de les diriger conformément au but visé.

II.i3. Seconde période du séchage.

Au dernier stade de l'évaporation superficielle, c'est-à-dire dans un domaine d'humidité plus faible, qui dépend de la nature de la substance et des conditions du séchage, la vitesse du séchage est influencée de façon déterminante par les lois de la migration de l'humidité à l'intérieur de la matière solide.

Plusieurs phénomènes s'y superposent, tels que le déplacement de l'humidité par capillarité, la diffusion de la vapeur et ; l'écoulement rapide des molécules.

II.2i4 Vitesse de séchage.

On appelle vitesse de séchage la masse de liquide évaporée pendant l'unité de temps à travers une surface unitaire d'évaporation.

Soient X : l'humidité du solide soumis au séchage.
 M : la masse de ce solide sec
 S : la surface à travers laquelle se produit l'évaporation.

Si pendant un temps Δt l'humidité du solide décroît de X , la vitesse moyenne du séchage pendant ce temps est:

$$V = - \frac{M}{S} \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (\text{II.2})$$

Le signe moins indiquant que l'humidité diminue avec le temps. A l'instant t , la vitesse est donnée par

$$V = - \frac{M}{S} \frac{dX}{dt} \quad (\text{II.3})$$

On a pu établir que cette vitesse était fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont:

- la nature, la porosité, la forme et l'humidité de la matière
- la température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.
- les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de chaleur.

II.2i5 Durée de séchage.

La durée de séchage s'obtient à partir de la relation (II.3) que l'on peut écrire:

$$dt = - \frac{M}{S} \frac{dX}{V} \quad (\text{II.4})$$

d'où en intégrant:

$$\int_0^t dt = - \frac{M}{S} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{V} \quad (\text{II.5})$$

X_2 et X_1 étant respectivement les valeurs de l'humidité à la fin et au début de l'opération.

Pour conduire ce calcul, on néglige la très brève période de mise en température et on considère successivement la vitesse à période constante et la période à vitesse décroissante.

a) si V_0 est la valeur de la vitesse constante, la relation (II.5) s'écrit:

$$\int_0^t dt = - \frac{M}{S V_0} \int_{X_1}^{X_2} dX$$

ce qui donne:

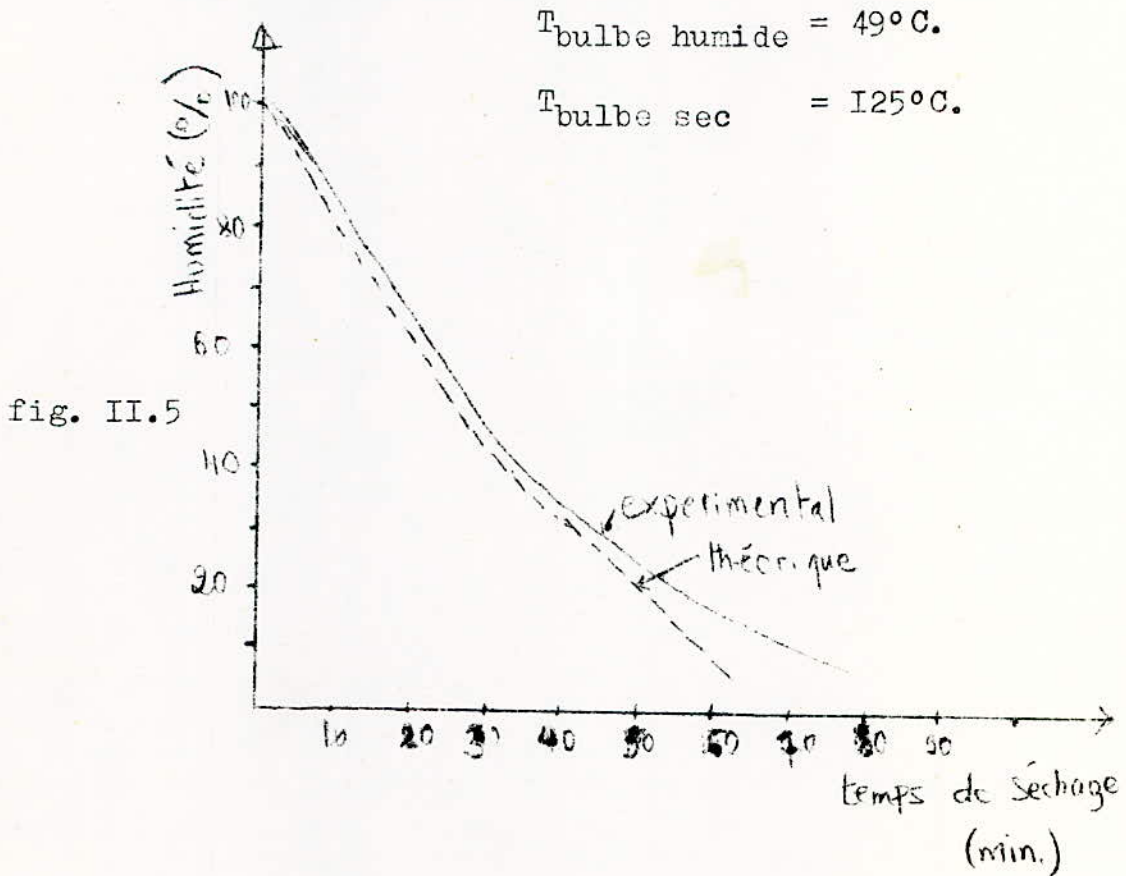
$$t = \frac{M}{S \cdot V_0} (X_1 - X_2) \quad (\text{II.6})$$

b) Après le point d'inflexion (point critique), la vitesse est fonction de l'humidité du solide. Comme en general, on ne connaît pas la fonction $V = f(X)$, l'intégration ne peut s'effectuer que graphiquement, ce qui nécessite de construire le graphe $\frac{I}{V}$ en fonction de X.

II.2i6. Courbes généralisées de séchage.

On peut obtenir des courbes généralisées de séchage qu'on utilise pour prévoir les temps de séchage. Pour cela, il est nécessaire de bien choisir le modèle mathématique qui représente le mieux le système considéré.

C'est ainsi que pour des particules de gypse de dimension variées, l'écart entre les résultats prédits par la théorie et ceux trouvés expérimentalement est très faible. (figure ci-dessous.)



II.22 Séchage en lit fixe (Through-circulation drying.)

Le fonctionnement des séchoirs qui utilisent un lit fixe consiste à insuffler de l'air chaud à travers un lit de matériau humide disposé sur une plaque perforée. L'air peut être insufflé de deux manières différentes:

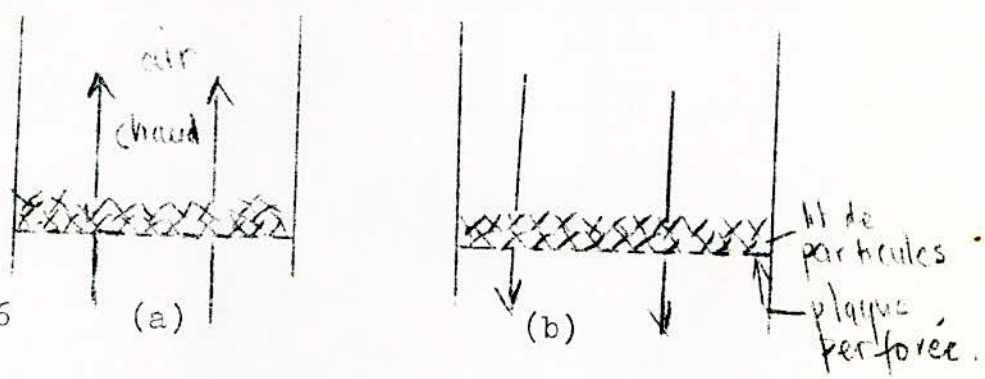


fig. II.6 (a)

Les vitesses de séchage pour ce genre de séchoir sont grandes du fait de la grande surface de contact de la faible distance que l'humidité interne du matériau a à effectuer. En effet, l'agent sécheur brasse toute la matière au cours de l'opération. Le mode d'insufflation (b) est préféré lorsqu'on veut éviter l'entraînement de fines particules.

Le type de séchoir le plus utilisé dans l'industrie est le séchoir à bande horizontale (horizontal-conveying-screen-dryer.)

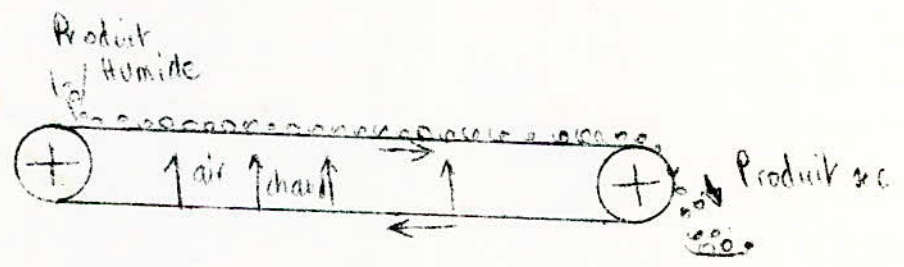


fig. II.7 Schéma d'un séchoir à bande horizontal.

Ce mode de séchage (en lit fixe) nécessite toutefois que le matériau humide soit sous forme divisée (granules).

II.23. Le séchage en lit fluide.

Si l'on augmente la vitesse du fluide sécheur, il arrive un moment où les particules de matière s'élèvent. Le gradient de pression à travers la couche reste constante. Cet état d'écoulement a pris une grande importance pratique. C'est le séchage en lit fluidisé.

Au début de la fluidisation, la force exercée par le fluide est exactement compensée par le poids du lit:

$$\frac{\Delta P}{l_{mf}} (\rho_s - \rho_g)(1 - \epsilon_{mf}) = (\rho_s - \rho_g)(1 - \epsilon_{mf}) g_c \quad (\text{II.7})$$

Dans cette formule:

l_{mf} est la hauteur de la couche (m)
 ϵ_{mf} est la porosité du lit fluide
 ρ_s, ρ_g sont respectivement le poids par unité de volume ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) et la densité du produit (kg/m^3)
 g_c c'est un facteur de conversion.

U_{mf} , la vitesse minimum de fluidisation s'obtient en combinant l'équation (II.7) à l'équation d'ERGUN qui exprime la perte de charge à travers des lits fixes de particules de dimensions uniformes.:

$$\frac{\Delta P}{l} g_c = 150 \frac{(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad (\text{II.8})$$

avec:

μ : viscosité du gaz sécheur.
 U_0 : vitesse superficielle du fluide.
 ϕ_s : facteur de sphericité des particules.
 d_p : diamètre d'une particule.

On obtient une forme quadratique en U_{mf}

$$\frac{1,75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (\text{II.9})$$

Pour de petites particules de faible poids spécifique, l'équation d'ERGUN peut se ramener à:

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{\rho} \gamma_c = \frac{150 (1 - \varepsilon_m^2)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} \\ Re_p = \frac{d_p \rho_g U_0}{\mu} < 20 \end{cases}$$

L'équation (II.9) donne alors:

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 \rho_g \gamma_c}{150 \mu} \left(\frac{\varepsilon_m^3}{1 - \varepsilon_m^2} \right), \quad Re < 20 \quad (\text{II.10})$$

Pour de grosses particules, l'équation d'ERGUN peut se ramener à :

$$\frac{\Delta P}{\rho} \gamma_c = 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_m) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_m^3 \phi_s d_p}, \quad Re > 1000 \quad (\text{II.11})$$

Lorsque Σ_{mf} et/ou ϕ_s sont inconnus, (comme c'est le cas pour les particules de pomme de terre que nous avons traitées) WIEN et YU suggèrent de modifier les expressions précédentes.^(*) D'abord, il est remarqué pour une grande variété de systèmes que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} &\approx 14 \\ \text{et} \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} &\approx 11 \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant dans les expressions (II.10) et (II.11), cela donne, pour toute valeur du nombre de Reynolds Re :

$$\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33,7 \quad (\text{II.13})$$

Pour les petites particules, on trouve:

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) \gamma_c}{1650 \mu}, \quad Re < 20 \quad (\text{II.14})$$

Pour les grosses particules:

$$U_{mf} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) \gamma_c}{24,5 \rho_g}, \quad Re > 1000 \quad (\text{II.15})$$

Remarque: Ces résultats permettent de prédire U_{mf} avec un écart de $\pm 34\%$ (*)

D'autres auteurs^(°) donnent pour la vitesse minimale de fluidisation la forme simplifiée:

$$U_{mf} = \sqrt{3gdp \frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \quad (II.I6)$$

II.23i Application du séchage en couche fluidisée.

Le séchage en couche fluidisée s'applique aux matériaux très humides, en granules, non collants et non agglomérants. Le charbon, le calcaire, les silicates, le polystyrène et autres matériaux de synthèse sont couramment soumis au séchage en lit fluidisé.

On cite l'application suivante du séchage en couche fluidisée:

-le séchage final des pommes de terre granulées.

Avec une humidité initiale de 10 à 12%, les pommes de terre sèchent jusqu'à une humidité finale de 4%, ce qui augmente ainsi leur résistance en vue de leur conservation.^(°°) Les résultats du séchage, dans différentes conditions, sont consignés dans le tableau ci-dessous.⁽¹⁾

Caracteristiques	Humidité finale (%)			
	6,80	6,28	5,06	3,92
Alimentation(kg/h)	360	290	130	75
Humidité initiale (%)	10,83	10,50	10,99	10,50
Temperature entrée d'air(°C.)	117	117	117	117
Temperature moy. sortie d'air(°C.)	55	57	64	68
Temperature granules sortie séchoir (°C.)	57	63	71	77
Evaporation spec. (kg/m ² h.)	13,4	12,2	7,4	4,8
Durée de séjour dans le séchoir(h.)	1,09	1,31	3,11	5,12

(°) L.Essayan, Fluidizarea, Bucuresti Ed. Technica, 1959

(°°) M.T.Roby M. Simon, Improvement of potato granules quality by fluidized bed finish drying.

III.i Classification des séchoirs.

Dans tout procédé de séchage, on rencontre les phénomènes suivants:

-la chaleur est transmise au matériau pour l'élimination de l'humidité par évaporation;

-l'eau évaporée est évacuée par un transfert de masse.

Ces phénomènes principaux, ainsi que d'autres, qui interviennent dans le procédé pour obtenir une rentabilité satisfaisante, sont réalisés avec une série de dispositifs de manipulation et de transport, de conceptions des plus variés.

On peut classer les séchoirs d'après le mode ^{de} chauffage du matériau. Suivant ce critère, les séchoirs se divisent en:

I) Séchoirs qui fonctionnent par convection forcée (à l'air chaud, à gaz chauds, à la vapeur surchauffée; courant de même sens, en contre courant ou à courant croisé.)
Ceux-ci à leur tour se divisent en:

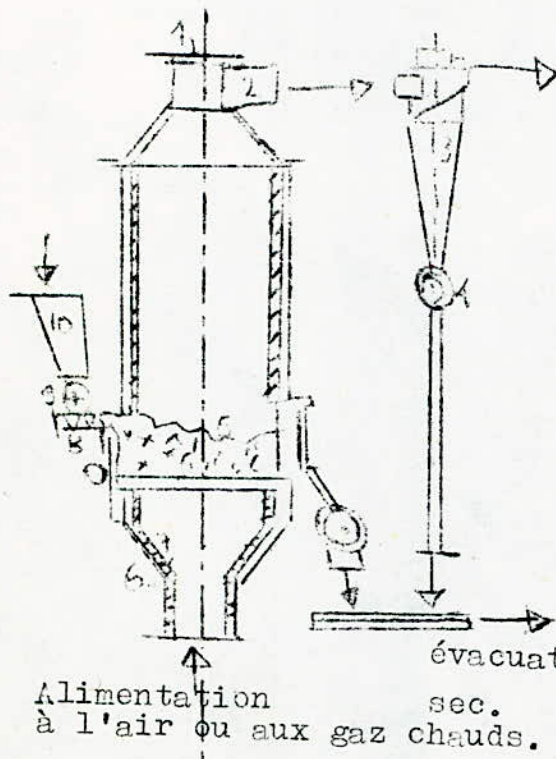
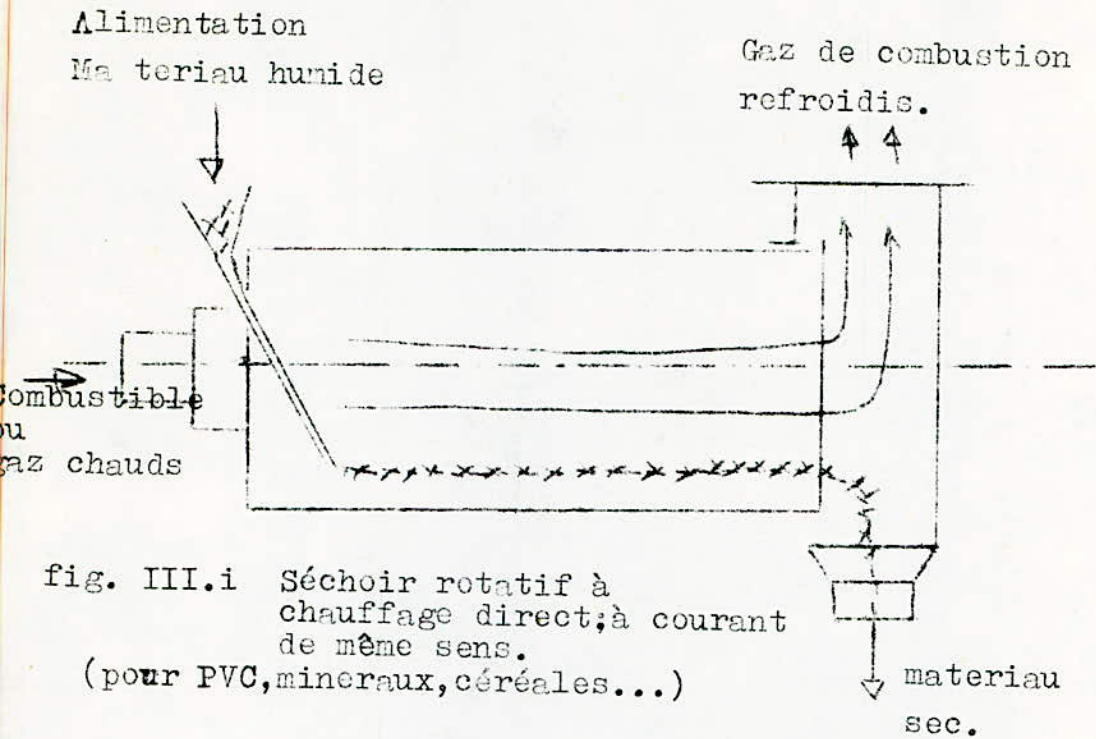
- boîtes de séchage
- Armoire de séchage
- Chambre de séchage
- Séchoirs-tunnel
- Convoyeurs de séchage
- Tours de séchage
- Séchoirs à soles superposées (à plateaux fixes ou mobiles)
- Séchoirs rotatifs cylindriques
- Séchoirs à fluidisation
- Séchoirs pneumatiques
- Séchoirs par pulvérisation.

2) Séchoirs qui fonctionnent par conductivité.

3) Séchoirs qui fonctionnent par émetteurs lumineux ou obscurs.

4) Séchoirs par séchage à haute fréquence.

III.2 Exemples de séchoirs industriels



fig; III.2 Séchoir à couche
fluidisée.

- 1 trou d'homme
- 2 air ou gaz froids
- 3 cyclône
- 4 doseur à cellules
- 5 couche fluidisée
- 6 isolant
- 7 revêtement réfractaire
- 8 vis sans fin d'alimentation
- 9 dispositif d'alimentation
- 10 trémie d'alimentation.

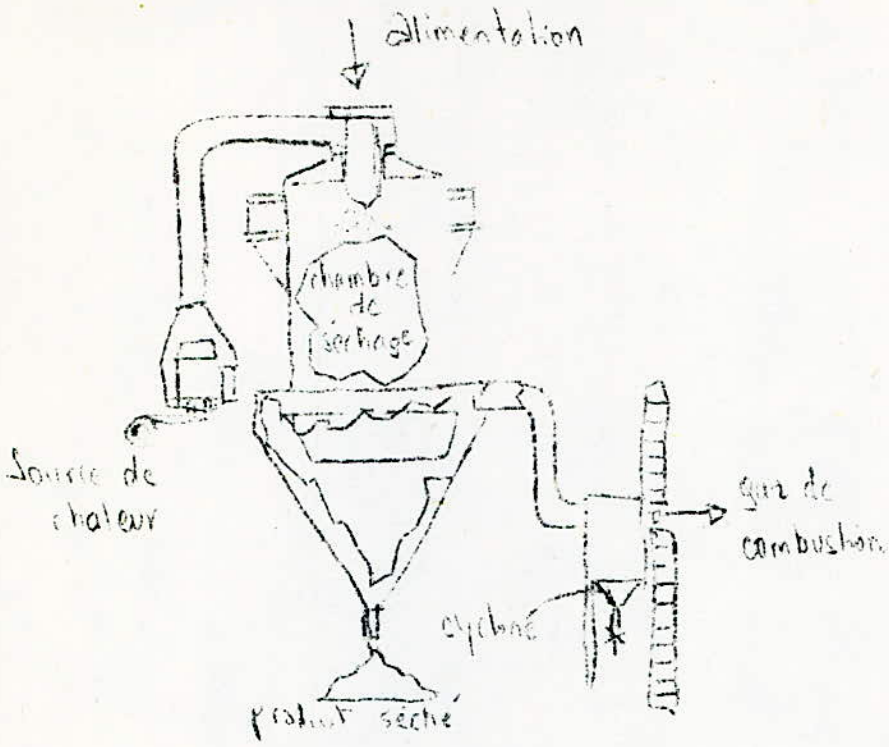


fig.III.2 Séchoir à pulvérisation.

(pour produits visqueux, en bouillie...)

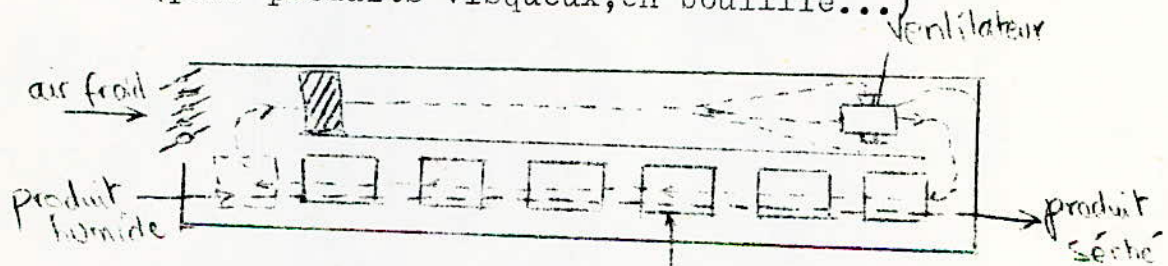


fig.III.4 Canal de séchage à contre courant.

(séchage semi-continu de grosses quantités.)

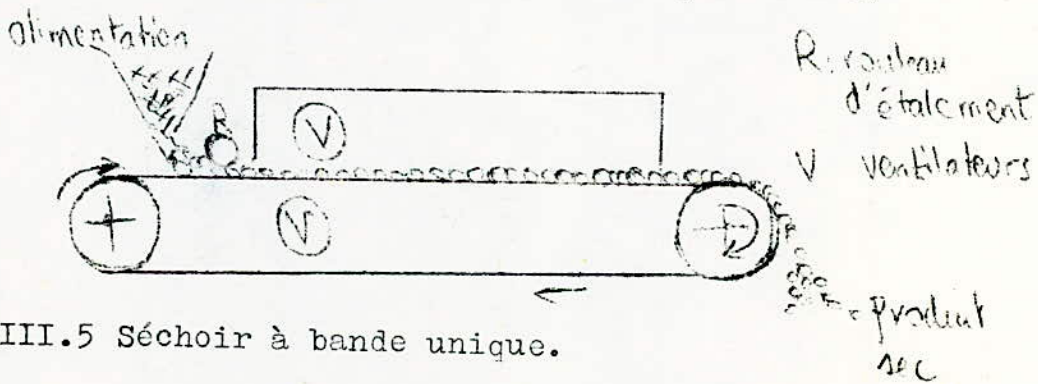


fig.III.5 Séchoir à bande unique.

III.3 Séchoir "APEX" utilisé dans notre laboratoire.

Le séchoir dont nous disposons est un séchoir à lit fluidisé. C'est un petit séchoir expérimental utilisé pour sécher en discontinu, de petites quantités de matériaux granulaires, fibreux ou floconneux.

Les produits pharmaceutiques (comprimés, pastilles) et alimentaires (flocons, graines) sont les produits qui conviennent le mieux pour ce genre de séchoir. L'emploi de faibles températures de l'air (agent sécheur) le rend particulièrement adapté aux matériaux sensibles à la chaleur.

Comparé aux séchoirs à pression normale conventionnels, il se distingue par le fait que les temps de manutention des produits se trouvent très réduits, de même que les vitesses de séchage sont plus grandes. Les risques de contamination sont moindres; il n'y a aucune partie mobile de l'appareil en contact avec les produits traités. En outre, le nettoyage est très aisé.

III.31 Caractéristiques de l'appareil.

Modèle	261 A.E/15.PX	FLUI BED DRYER
Hauteur	1370 mm	
Encombrement	715 x 965 mm	
Poids à vide	255 kg.	

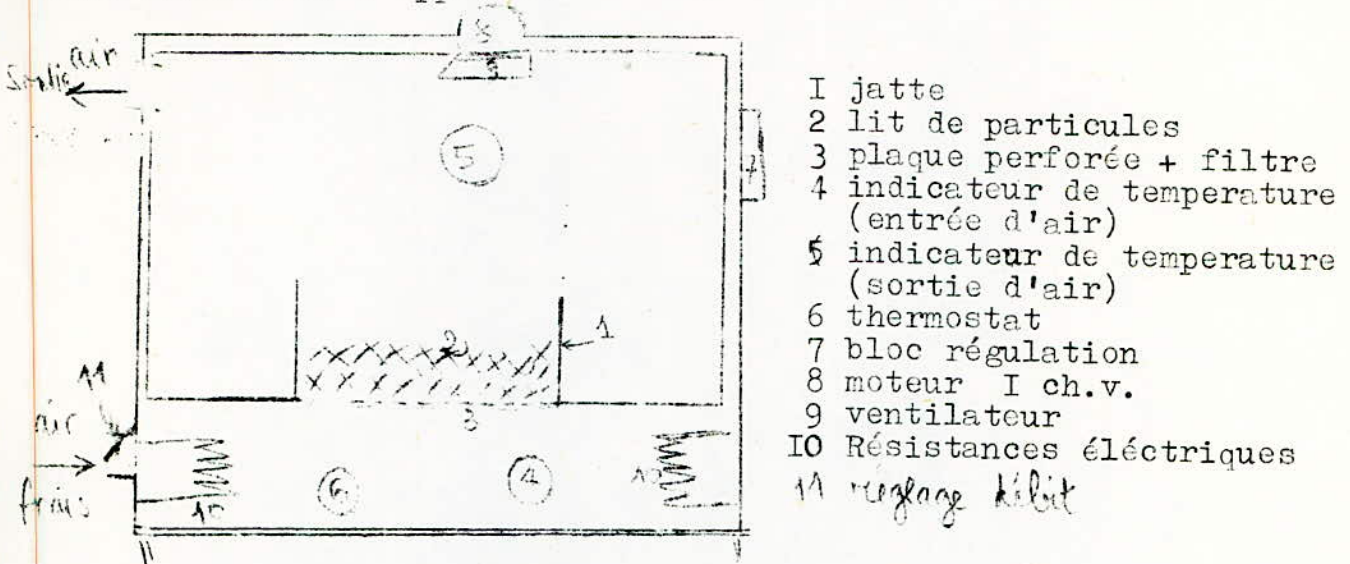
III.32 Description de l'appareil.

L'appareil est composé d'une armoire à l'intérieur de laquelle se trouve une jatte de 205 mm de diamètre en plexiglass et dont le fond est une maille en acier inox sur laquelle est fixé un tamis. L'air est aspiré par le haut de l'appareil grâce à un ventilateur entraîné par un moteur de 1 Ch. Vap. La température de l'air est thermostatée et le chauffage est assuré par des résistances électriques (4,5 KW.). Afin d'éviter l'entraînement des particules fines, des filtres en forme de sacs peuvent être adaptés à la jatte.

L'appareil est également muni de deux manomètres qui indiquent les pertes de charge à travers le lit de particules et à travers le filtre.

Une autre jatte de capacité plus grande (diamètre = 380 mm.) avec son filtre correspondant peut être également à l'appareil.

III.4 Schema de l'appareil.



- 1 jatte
- 2 lit de particules
- 3 plaque perforée + filtre
- 4 indicateur de temperature (entrée d'air)
- 5 indicateur de temperature (sortie d'air)
- 6 thermostat
- 7 bloc régulation
- 8 moteur 1 ch.v.
- 9 ventilateur
- 10 Résistances électriques
- 11 réglage kilbit

fig.III.6 schéma de l'armoire deséchage "APEX"

III.5 Accessoires.

III.5i Venturi.

Afin de mesurer le débit de l'air qui traverse l'appareil, nous avons adapté un venturi en plexiglass à l'entrée de celui-ci. Les caractéristiques de cet appareil sont indiquées sur la figure III.7

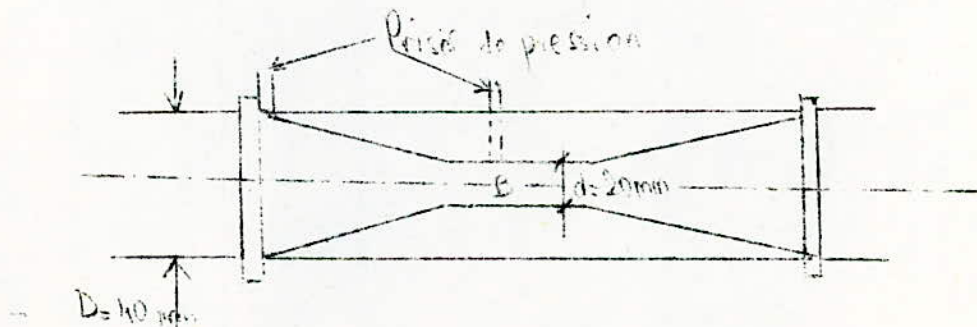


fig. III.7 Venturi.

Ce venturi répond aux normes du venturi classique type "Neuhauss"
En effet la prise d'impulsion positive est faite juste avant le
convergent (et non à 1/2 fois le diamètre de la conduite comme
l'exigent les normes.) (9)

La vitesse de l'air dans le convergent s'obtient facilement
en appliquant l'équation de Bernouilli aux points A et B (fig. III 7)

$$u_B = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \quad (\text{III } 1)$$

où $\Delta P = \rho \frac{(u_B^2 - u_A^2)}{2}$ représente la pression différentielle
dynamique (N/m^2)

ρ la masse volumique de l'air (kg/m^3)

m le rapport des diamètres de la conduite et de l'étranglement,
au carré.

$$m = (d/D)^2$$

ceci donne un débit volumique Q_v :

$$Q_v = u_B S_B = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} C_e \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (\text{III } 2)$$

où S_B est l'aire de la section droite de l'étranglement.

Dans une formule plus correcte, qui tient compte de toutes les
pertes de charge (frottements), on introduit un coefficient
 C , appelé coefficient de perte de charge.

$$Q_v = \frac{C}{\sqrt{1-m^2}} S_B \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (\text{III } 2')$$

et

$$u_B = \frac{C_e}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (\text{III } 1')$$

Dans notre cas

$$m = 0,25$$

et $C = 0,975$ (d'après les abaques)

Les deux prises de pression du venturi sont reliées à un tube en
U contenant de l'eau; la pression différentielle est donc donnée
en mm. d'eau.

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,8 \text{ N/m}^2$$

La densité de l'air à la température T est donnée par:

$$\rho(T) = 1,29 \cdot \frac{273}{T} \quad (P = 1 \text{ atm})$$

en considérant que l'air est un gaz parfait aux températures
considérées.

Le terme $\frac{c}{\sqrt{1-m^2}}$ est voisin de 1

$$u_B \approx \left(2L\frac{f}{\rho}\right)^{1/2}$$

La vitesse à l'intérieur de la jatte vaut :

$$u_j = u_B \cdot \frac{S_B}{S_j} = \frac{0,000311}{0,033} u_B = 0,0095 u_B$$

$$u_j = 0,0095 \sqrt{2L\frac{f}{\rho}} \quad (\text{III } 3)$$

III.52 Hygromètre à condensation "Casella"

Principe⁽⁹⁾ : ~~Dans~~ cet appareil, on refroidit graduellement un corps, dont on peut à chaque instant mesurer la température, jusqu'à ce que la vapeur d'eau contenue dans le gaz commence à se déposer sous forme de rosée à sa surface.

La température mesurée à ce moment est le "point de rosée" qui est défini comme étant la température à laquelle la teneur en vapeur d'eau du gaz est égale à la teneur maxima le possible.

Description : Ce type d'hygromètre peut être utilisé aussi bien pour la mesure de l'humidité de l'air ambiant que pour celle d'un courant gazeux circulant dans une conduite. Dans cet instrument montré en coupe (fig. III 7), la rosée est produite sur un miroir qui peut être facilement observé et dont on peut mesurer la température. Le miroir, constitué par un disque d'argent chromé de 0,3 mm d'épaisseur, forme la paroi de séparation entre une chambre où un réfrigérant est versé et une seconde chambre de 10 ml. de capacité où on introduit l'échantillon de gaz.

La surface polie du miroir fait face dans cette chambre contenant le gaz et peut être observée au travers d'une vitre.

Le produit réfrigérant est de l'ether ou tout autre produit volatil.

Si l'échantillon à examiner est de l'air atmosphérique, on l'introduit dans l'appareil à l'aide d'une poire d'aspiration et on l'y maintient prisonnier en obturant les orifices d'entrée et de sortie.

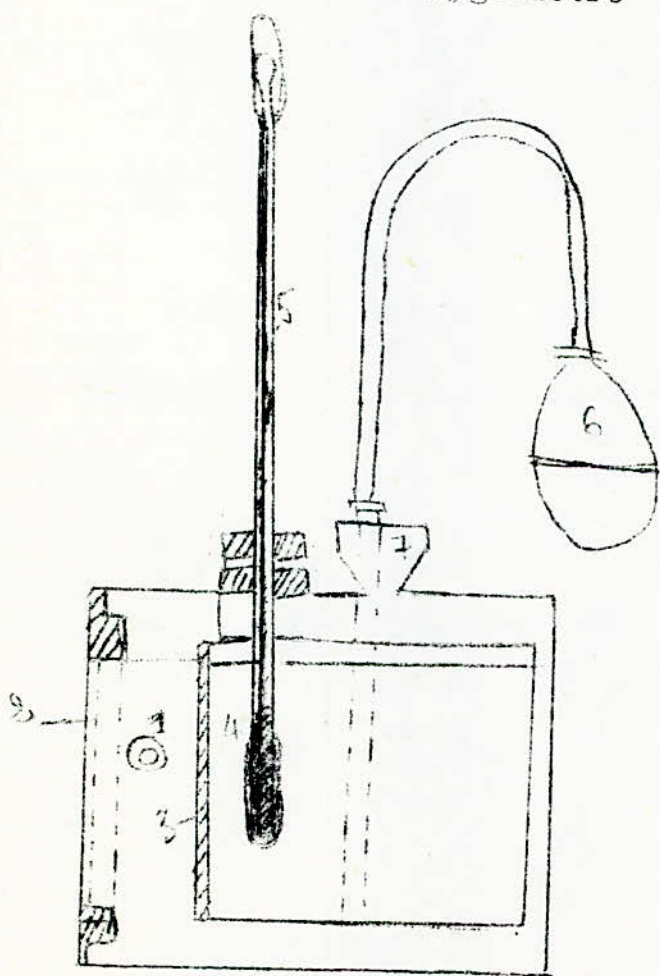
On provoque l'évaporation et le refroidissement de l'ether par barbotage d'un courant d'air produit par une poire en caoutchouc.

Le miroir se refroidit par conduction jusqu'au point de rosée de l'échantillon examiné.

Lorsque la rosée apparaît, on arrête l'évaporation de l'ether et on note la température, laquelle est mesurée par un thermomètre à mercure, dont le réservoir est immergé dans l'ether. On laisse la chambre se réchauffer lentement et lorsque la rosée disparaît, on note à nouveau la température. La moyenne de ces deux températures est le point de rosée.

La connaissance de ce point de rosée et de la température ambiante nous permet de connaître l'humidité relative de l'air en utilisant le diagramme de Mollier, donné en annexe.

Schéma de l'hygromètre "Casella"



- I entrée du gaz
- 2 verre
- 3 miroir
- 4 chambre contenant l'ether
- 5 thermomètre à mercure
- 6 poire
- 7 entonnoir d'introduction de l'ether

fig. III.8 Hygromètre "CASELLA"

PARTIE
EXPERIMENTALE.

IV.I Essais à vide.

Avant de commencer toute expérience, nous avons effectué un certain nombre d'essais à vide afin de déterminer les pertes calorifiques de l'appareil.

Ces essais nous ont permis également de déterminer les performances du séchoir, notamment le débit maximal d'air que l'on peut obtenir.

Ainsi, durant l'essai du 27 oct. 79, nous avons obtenu les résultats suivants, à l'équilibre (qui est atteint au bout d'une heure environ.)

$$T_1 = 73^\circ\text{C} \quad (\text{entrée d'air})$$

$$T_2 = 49^\circ\text{C} \quad (\text{sortie de l'air})$$

$$\text{Pression différentielle } h = 230 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$T \text{ ambiante} = 16,2^\circ\text{C}$$

Calcul du débit:

Il est donné par la formule (III.2')

$$Q_v = \frac{c}{\sqrt{1-m^2}} S_B \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

$$T_{\text{moy}} = 334^\circ\text{K}$$

$$\rho_{\text{air}}(334^\circ\text{K}) = 1,054 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_v = 0,000314 (2 \times 9,8 \times 230 / 1,054)^{1/2}$$

$$Q_v = 0,0205 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_v = 74 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ceci nous donne un débit massique Q_m

$$Q_m = 74 \times 1,054 = 78 \text{ kg/h}$$

D'où la prte de chaleur par heure:

$$Q_p = Q_m \times C_p \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_p = 78 \times 0,24 \times (73 - 49) \quad (C_p \text{ air} = 0,24 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C})$$

$$Q_p = 450 \text{ Kcal/h}$$

La température de l'air à l'entrée et à la sortie du séchoir est mesurée à l'aide de deux thermomètres (4 et 6 sur le schéma de l'appareil/

Nous avons étalonné ces deux thermomètres qui indiquent une température légèrement différente de celle de l'étalon.

Les températures de travail sont celles indiquées par ces thermomètres. Dans la page suivante, on donne les courbes d'étalonnage.

IV.3 Planification des expériences.

Afin d'étudier l'influence des divers paramètres qui contrôlent le séchage, nous avons choisi de travailler avec trois températures différentes, deux débits, et deux hauteurs de lit différents. En outre nous avons projeté de traiter deux produits (pommes de terre et petits pois ou lentilles)

Les valeurs choisies pour ces trois paramètres sont:

Température (à l'entrée):	50°C ;	70°C ;	90°C
Vitesse de l'air (m/s):	0,5 ;	0,75	
	(h=145 mm H ₂ O)		(h=350 mm H ₂ O)
Hauteurs du lit (cm.)	2 ;	6.	

Nous pouvons ainsi effectuer 12 essais sur chaque produit.

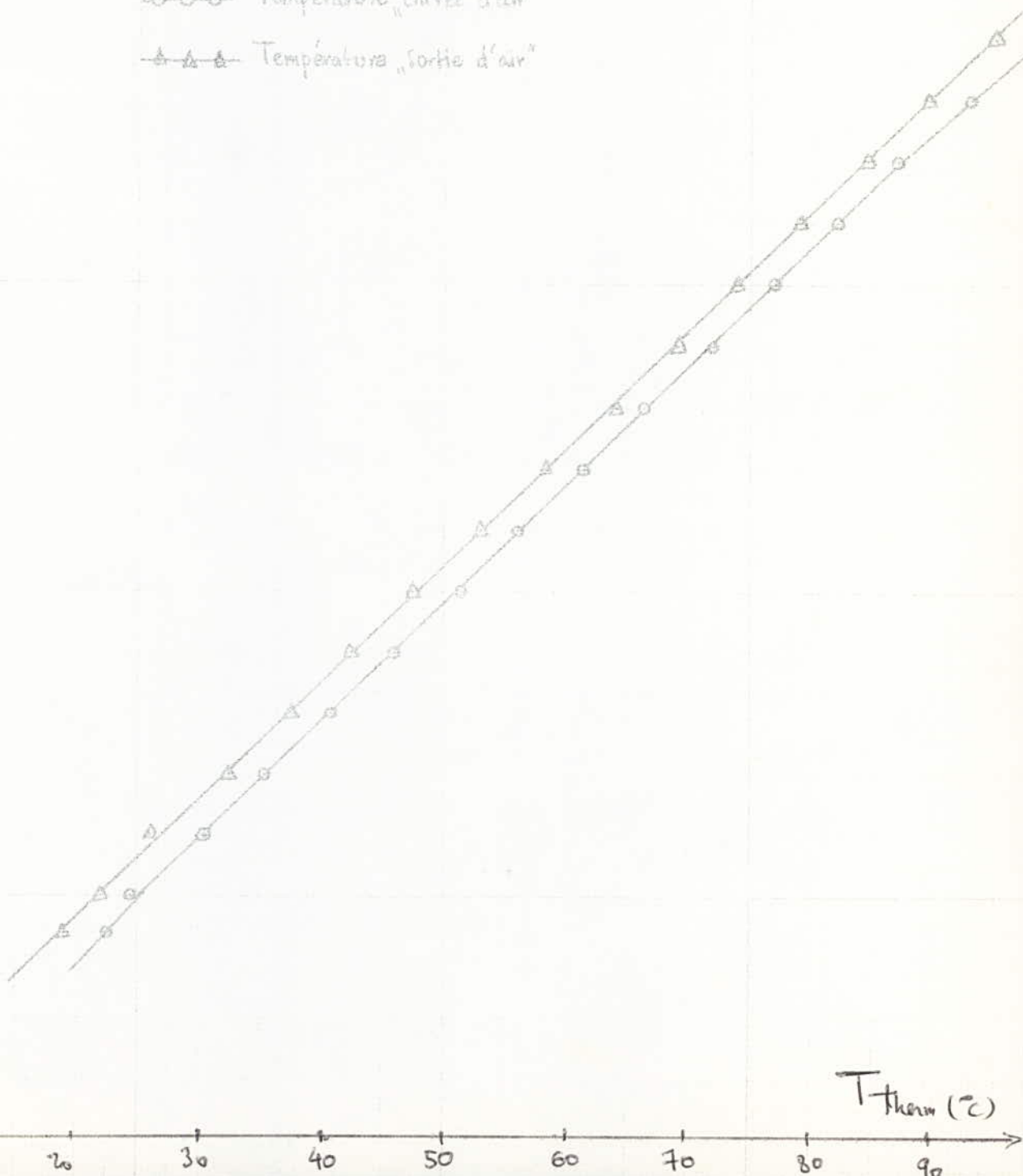
N° ESSAI	T _I (°C.)	Hauteur du lit (cm.)	U calculée (m/s)
1	50	2	0,48
2	50	2	0,74
3	50	6	0,48
4	50	6	0,73
5	70	2	0,49
6	70	2	0,76
7	70	6	0,49
8	70	6	0,75
9	90	2	0,49
10	90	2	0,76
11	90	6	0,49
12	90	6	0,74

Température
étalon (°C)

SECHOIR "APEX"

Etalonnage des thermomètres

- ○ ○ Température "entrée d'air"
- △ △ △ Température "sortie d'air"



T_{therm} (°C)

IV.4: Essai préliminaire.

27

Cet essai, qui n'entre pas en ligne de compte dans la planification précédente, nous a permis cependant d'observer le comportement du produit pendant le séchage ainsi que d'apprécier qualitativement les performances de l'appareil.

Le produit traité est de la pomme de terre de conservation (variété BINTJE, importée de Belgique). Avant d'être traitées, les pommes de terre sont découpées en tranches parallélépipédiques de dimensions moyennes $2 \times 1,5 \times 0,2$ cm.

La vitesse linéaire de l'air dans la section de la jatte est de 0,75 m/s.

Au cours du séchage, nous avons observé les phénomènes suivants:

Au début, les particules sont pratiquement immobiles. Le débit de l'air est à son maximum. Les particules qui se trouvent près de la paroi de la jatte sèchent plus rapidement que celles qui sont situées plus au centre. D'autre part, celles-ci ont pris une coloration brunâtre due à l'oxydation par l'air insufflé. Ce phénomène sera évité ultérieurement au moyen d'un traitement au bisulfite de Sodium (Na_2SO_3) qui joue un rôle d'antioxydant.

Une demi-heure après le début de l'opération, les premières particules commencent à se mouvoir. Le lit semble tourner à l'intérieur de la jatte, mais on n'observe pas de fluidisation. Ce mouvement du lit est seulement dû aux vibrations de l'appareil.

Nous avons remarqué également que l'air trouve des chemins préférentiels à travers le lit de particules, ce qui fait que le séchage s'effectue de façon non uniforme.

L'opération a duré 180 min.

Ce premier essai nous a permis de conclure que nous ne pouvons pas fluidiser les particules de pomme de terre: nous sommes limités par la puissance du ventilateur.

Par la suite nous avons tenté de fluidiser ces particules en réduisant leurs dimensions, mais le résultat est toujours le même. En outre, les particules présentent un aspect collant dû à l'amidon lâché par les cellules de la pomme de terre.

Ceci a par ailleurs fini par colmater le tamis à travers lequel l'air doit passer. Nous avons changé ce dernier avec une plaque en matière plastique perforée, dont les orifices sont beaucoup plus grands ($d=2,5\text{mm.}$).

Pour ce tamis, nous avons évalué le rapport $R : \left(\frac{\text{surf. trous}}{\text{surf. totale}} \right)$

$$R = 20\% \quad (\text{"surface libre"})$$

Pour tous les essais qui sont effectués par la suite, le traitement de la pomme de terre avant le séchage est le suivant:

Elles sont d'abord épluchées, puis découpées en morceaux grossièrement parallélépipédiques de dimensions moyennes $5 \times 5 \times 40 \text{ mm.}$ Elles sont ensuite immergées dans une solution bouillante à 300 PPM de Na_2SO_3 pendant 3 minutes environ. (traitement antioxydant.)

REMARQUE:

Pour les particules de pomme de terre de dimensions $5 \times 5 \times 40 \text{ mm.}$ le diamètre équivalent est de 1,2 cm.

Nous pouvons utiliser la relation approchée (II.15) pour estimer la vitesse minimale de fluidisation:

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{d_p^2 (P_s - P_f) g}{24,5 P_f}}$$

$$U_{mf} = \left(\frac{1,210^2 (1570) \cdot 9,8}{24,5 \cdot 1,2} \right)^{1/2} = 2,5 \text{ m/s}$$

$P_{s \text{ exp}} \approx 1570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$U_{mf} = 2,5 \text{ m/s} \quad Re_p > 1000$$

Cette vitesse est trois fois plus grande que la vitesse maximale obtenue dans la section de la jatte, ce qui explique pourquoi ces particules ne fluidisent pas.

Nous avons effectué un essai avec des lentilles séchées pour voir si on pouvait les fluidiser; le résultat est analogue à celui des particules de pomme de terre: nous n'avons constaté aucun signe de fluidisation.

Si on assimile les lentilles à des sphères de diamètre égal à 3mm la relation d'Ergun nous donne une vitesse minimale de fluidisation égale à 0,96 m/s.

$$\frac{\Delta P}{L} = \gamma(1-\epsilon)(\rho_s - \rho_g) = \frac{157,4 U_{mf}(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^3} + \frac{175 \rho U_{mf}^2(1-\epsilon)}{d_p \epsilon^3}$$

$$\epsilon \approx 0,4$$

$$6015,6 U_{mf}^2 + 937,5 U_{mf} - 6468 = 0$$

$$U_{mf} \approx 0,96 \text{ m/s}$$

Pour nous assurer de cet ordre de grandeur, nous avons introduit un échantillon de lentilles à l'intérieur de la colonne de l'appareil de fluidisation. La valeur expérimentale de U_{mf} est proche de la valeur théorique. Nous avons toutefois admis l'hypothèse de la sphericité parfaite des particules de lentilles.

$$U_{mf,exp} = 0,85 \text{ m/s}$$

IV.5 Détermination de l'humidité hygroscopique des produits.

Celle-ci est désignée, d'après la norme DIN 51718 comme la quantité d'humidité dégagée par la substance "séchée à l'air" lorsqu'on la sèche à $106 \pm 2^\circ\text{C}$.⁽²⁾

25 à 50 g. de la matière à sécher à l'air sont prélevés sous forme d'un échantillon réduit en grains de moins de 1 mm. Celui-ci est pesé à 0,01 g. près dans un flacon à tarre en verre, séché dans un dessiccateur. Le couvercle, placé en biais, le flacon est séché à $106 \pm 2^\circ\text{C}$. jusqu'à poids constant dans une étuve de séchage, et refroidi dans un dessiccateur. Un séchage d'environ 2 heures suffit en général.

Lorsqu'on retire l'échantillon du dessiccateur, on ferme le couvercle de façon étanche, après quoi, l'échantillon est nouveau pesé.

La détermination de l'humidité de la pomme de terre a été effectuée comme suit:

La pomme de terre préalablement épluchée et traitée au bisulfite de sodium est découpée en petit cubes de 5 mm d'arête que l'on met à l'étuve à 110°C - 115°C pendant 2 h. Le poids avant et après étuvage nous donne l'humidité du produit.

Conditions opératoires:

T = 50°C (entrée d'air)

Hautcur du lit: 2cm.

Vitesse de l'air: U = 0,13 m/s

Humidité relative de l'air: $\varphi = 65\%$

Caracteristiques du produit:

Charge: 710 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4.73$ kg/kg mat. sècheHumidité finale: $X_{\infty} = 0.30$ kg/kg mat. sècheMatière sèche: $m_s = 150$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps (min.)	T _I (°C)	T ₂ (°C)	masse		
			produit (g.)	X	$\frac{X - X_0}{X_0 - X_{\infty}}$
0	49	35	710	4,73	1,00
5	50	29	610	4,07	0,85
10	51	29	545	3,63	0,75
15	50	30	500	3,33	0,68
20	52	31	455	3,03	0,62
25	51	31	420	2,80	0,56
30	50	32	395	2,63	0,53
35	49	31	370	2,47	0,49
40	50	32	350	2,33	0,46
45	51	33	335	2,23	0,44
50	51	33	315	2,10	0,41
60	50	34	290	1,93	0,37
70	45	33	270	1,80	0,34
80	51	35	255	1,70	0,32
95	51	35	235	1,57	0,29
110	65	40	215	1,43	0,26
120	48	35	210	1,40	0,25
130	45	34	200	1,33	0,23
140	50	34	195	1,30	0,23

Conditions operatoires:

$T_I = 50^{\circ}\text{C}$

Hauteur du lit: 2cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,21 \text{ m/s}$

Humidité relative de l'air: $\phi = 60\%$

Caracteristiques du produit:

charge: 710 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,44 \text{ kg/kg mat. sèche}$

Humidité finale: $X_{of} = 0,19 \text{ kg/kg mat. sèche}$

Matière sèche: $m_s = 160 \text{ g.}$

Resultats experimentaux:

Temps(min)	$T_I (^{\circ}\text{C})$	$T_2 (^{\circ}\text{C})$	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_0}{X_0 - X_{of}}$
0	50	36	710	4,44	1,00
5	51	28	610	3,81	0,85
10	50	28	555	3,47	0,77
15	50	30	480	3,00	0,66
20	50	30	460	2,88	0,63
25	51	30	420	2,63	0,57
30	50	30	390	2,44	0,53
35	50	32	360	2,25	0,48
40	50	32	345	2,16	0,46
45	51	32	325	2,03	0,43
50	53	32	310	1,94	0,41
60	48	32	280	1,75	0,37
70	50	34	265	1,66	0,35
80	49	34	245	1,53	0,32
95	50	34	225	1,41	0,29
110	52	36	210	1,31	0,26
120	49	34	200	1,25	0,25
130	50	34	195	1,22	0,24
140	50	35	190	1,19	0,24

Conditions opératoires:

$T_1 = 50^\circ\text{C}$

Hauteur du lit: 6cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,13$ m/s.Humidité relative de l'air: $\varphi = 70\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 1310 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,94$ Kg/Kg mat. sèche.Humidité finale: $X_{\infty} = 0,26$ Kg/Kg mat. sècheMatière sèche : $m_s = 265$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps(min.)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$
0	50	36	1310	4,94	1,00
5	50	25	1185	4,47	0,90
10	50	25	1110	4,19	0,84
15	50	25	1025	3,87	0,77
20	50	25	955	3,60	0,71
25	50	25	875	3,30	0,65
30	51	26	820	3,09	0,60
35	51	28	760	2,87	0,56
40	60	30	705	2,66	0,51
45	55	32	655	2,47	0,47
50	52	32	620	2,34	0,44
55	49	31	585	2,21	0,42
60	50	31	555	2,09	0,39
70	50	32	510	1,92	0,35
80	50	32	470	1,77	0,32
90	50	33	435	1,64	0,29
100	50	33	410	1,55	0,28
110	51	33	390	1,47	0,26
120	50	33	375	1,42	0,25
130	50	33	360	1,36	0,24
140	50	33	350	1,32	0,23
150	50	33	335	1,26	0,21

Conditions opératoires.

$$T_I = 50^{\circ}\text{C}$$

Hauteur du lit: 6cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,20$ m/s.Humidité relative de l'air $\psi = 70\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 1310 g.

Humidité initiale: 4,53 kg/kg mat. sèche.

Humidité finale: $X_s = 0,32$ kg/kg mat. sèche.Matière sèche $m_s = 289$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps(min)	$T_I(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_s}{X_0 - X_s}$
0	50	35	1310	4,53	1,00
5	47	27	1170	4,05	0,89
10	53	28	1070	3,70	0,80
15	50	27	1005	3,48	0,75
20	49	28	930	3,22	0,69
25	50	28	865	2,99	0,63
30	50	29	820	2,84	0,60
35	50	29	770	2,66	0,56
40	50	30	730	2,53	0,52
45	50	30	695	2,40	0,49
50	50	31	665	2,30	0,47
55	50	32	635	2,20	0,45
60	50	32	610	2,11	0,43
70	50	32	560	1,94	0,38
80	50	33	525	1,82	0,36
90	50	33	490	1,70	0,33
100	50	33	465	1,61	0,31
110	50	34	440	1,52	0,29
120	51	34	420	1,45	0,27
130	51	35	400	1,38	0,25
140	50	35	390	1,35	0,24
150	50	35	380	1,31	0,24

Conditions opératoires:

$$T_I = 70^\circ\text{C}$$

Hauteur du lit: 2cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,14\text{m/s}$ Humidité relative de l'air $\phi = 55\%$

Caractéristiques du produit:

Charge: 710g.

Humidité initiale $X_0 = 4,70\text{ kg/kg mat. sèche.}$ Humidité finale: $X_\infty = 0,09\text{ kg/kg mat. sèche.}$ Matière sèche: $m_s = 151\text{ g.}$

Resultats experimentaux:

Temps(min.)	$T_I(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	Masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_\infty}{X_0 - X_\infty}$
0	70	48	710	4,70	1,00
5	75	41	585	3,87	0,82
10	67	40	490	3,25	0,69
15	77	44	420	2,78	0,58
20	65	41	385	2,55	0,53
25	72	44	350	2,32	0,48
30	68	44	320	2,12	0,44
35	70	45	300	1,99	0,41
40	75	46	280	1,85	0,38
45	69	45	260	1,72	0,35
50	68	45	250	1,66	0,34
60	75	50	220	1,46	0,30
70	70	45	205	1,36	0,28
80	72	48	195	1,29	0,26
90	68	48	185	1,23	0,25
100	70	48	180	1,19	0,24
120	70	48	170	1,13	0,23
130	70	48	170	1,13	0,23
145	70	48	165	1,09	0,22

Conditions opératoires:

$$T_I = 70^\circ\text{C}$$

Hauteur du lit: 2 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,76$ m/s.Humidité relative de l'air: $\phi = 55\%$

Caractéristiques du produit:

Charge: 620 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,16$ kg/kg mat. sèche.Humidité finale: $X_\infty = 0,09$ kg/kg mat. sèche.Matière sèche: $m_s = 149$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps (min.)	T_I ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	masse produit (g.)	X	$\frac{X - X_\infty}{X_0 - X_\infty}$
0	70	48	620	4,16	1,00
5	65	38	510	3,42	0,82
10	69	41	450	3,02	0,72
15	70	42	400	2,68	0,64
20	70	43	370	2,48	0,59
25	69	44	340	2,28	0,54
30	70	45	315	2,11	0,50
35	70	46	290	1,95	0,46
40	70	46	275	1,85	0,43
45	70	46	260	1,74	0,41
50	70	46	250	1,68	0,39
55	70	47	235	1,58	0,37
60	70	48	225	1,51	0,35
70	70	48	205	1,38	0,32
80	70	48	192	1,29	0,29
90	70	48	182	1,22	0,28
100	70	48	175	1,17	0,27
110	70	48	167	1,12	0,25
120	70	48	165	1,11	0,25
130	70	48	163	1,09	0,25

Conditions opératoires:

$T_I = 70^{\circ}\text{C}.$

Hauteur du lit: 6 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,49$ m/s.Humidité relative de l'air: $\varphi = 65\%$

Caracteristiques du produit:

Charge: 1260 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,13$ kg/kg mat. sèche.Humidité finale: $X_{\infty} = 0,13$ kg/kg mat. sèche.Matière sèche: $m_s = 305$ g.

Resultats experimentaux:

Temps(min.)	T_I ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$
0	70	48	1260	4,13	
5	75	38	1095	3,59	0,87
10	65	35	1000	3,28	0,79
15	65	35	910	2,98	0,71
20	71	39	880	2,89	0,69
25	75	40	740	2,43	0,58
30	65	40	690	2,26	0,53
35	68	40	650	2,13	0,50
40	72	42	620	2,03	0,48
45	69	42	585	1,92	0,45
50	70	43	560	1,84	0,43
55	70	44	530	1,74	0,40
60	70	45	505	1,66	0,38
70	70	46	465	1,52	0,35
85	70	46	420	1,38	0,31
100	70	46	390	1,28	0,29
115	70	46	370	1,21	0,27
125	69	46	360	1,18	0,26
140	72	47	345	1,13	0,25
150	70	48	345	1,13	0,25

Conditions opératoires:

$$T_I = 70^{\circ}\text{C.}$$

Hauteur du lit: 6 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,75$ m/s.

Humidité relative de l'air: $\phi = 70\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 1260 g.

Humidité initiale : $X_0 = 4,60$ kg/kg mat. sèche

Humidité finale : $X_{\infty} = 0,13$ kg/kg mat. séché

Matière sèche: $m_s = 274$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps (min.)	$T_I (^{\circ}\text{C.})$	$T_2 (^{\circ}\text{C.})$	Masse Produit (g.)	X	$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$
0	70	48	1260	4,60	1,00
5	72	34	1115	4,07	0,88
10	71	34	985	3,59	0,77
15	70	34	885	3,23	0,69
20	71	36	780	2,85	0,61
25	70	39	690	2,52	0,53
30	70	38	645	2,35	0,50
35	70	40	595	2,17	0,46
40	70	39	555	2,03	0,43
45	70	41	515	1,88	0,39
50	65	40	490	1,79	0,37
55	70	42	460	1,68	0,35
60	70	43	435	1,59	0,33
70	70	44	400	1,46	0,30
80	69	45	370	1,35	0,27
90	69	46	345	1,26	0,25
100	70	47	330	1,20	0,24
110	70	47	320	1,17	0,23
120	70	48	315	1,15	0,23
130	72	48	310	1,13	0,22

Conditions opératoires:

$T_I = 90^{\circ}\text{C.}$

Hauteur du lit: 2 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,49$ m/s.Humidité relative de l'air: $\phi = 70\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 625 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,77$ kg/ kg mat. sècheHumidité finale : $X_{\infty} = 0,22$ kg/ kg mat. sècheMatière sèche: $m_s = 131$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps(min.)	$T_I(^{\circ}\text{C.})$	$T_2(^{\circ}\text{C.})$	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_0}{X_0 - X_{\infty}}$
0	90	60	625	4,77	1,00
5	95	53	460	3,66	0,76
10	85	50	420	3,21	0,66
15	85	50	370	2,82	0,57
20	92	54	330	2,52	0,51
25	87	51	300	2,29	0,45
30	93	56	270	2,06	0,40
40	85	56	230	1,76	0,34
50	93	59	225	1,72	0,33
60	90	58	205	1,56	0,29
70	93	61	190	1,45	0,27
80	90	58	180	1,37	0,25
90	90	59	172	1,31	0,24
100	92	62	167	1,27	0,23
110	89	59	165	1,26	0,23
120	89	59	160	1,22	0,22
135	89	59	160	1,22	0,22

Conditions opératoires:

$$T_I = 90^{\circ}\text{C.}$$

Hauteur du lit: 2 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,76$ m/sHumidité relative de l'air: $\varphi = 60\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 590g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,00$ kg/kg mat. sècheHumidité finale : $X_{\infty} = 0,09$ kg/kg mat. sècheMatière sèche: $m_s = 146$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps (min.)	$T_I (^{\circ}\text{C.})$	$T_2 (^{\circ}\text{C.})$	masse produit (g.)	X	$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$
0	90	50	590	4,00	1,00
5	89	45	465	3,18	0,79
10	89	48	405	2,77	0,69
15	89	49	355	2,43	0,60
20	89	52	322	2,21	0,54
25	90	54	295	2,02	0,49
30	91	54	270	1,85	0,45
35	90	53	255	1,75	0,42
40	89	53	246	1,68	0,41
45	88	53	226	1,55	0,37
50	89	54	216	1,48	0,36
55	87	54	206	1,41	0,34
60	87	53	200	1,37	0,33
65	89	53	190	1,30	0,31
70	89	55	186	1,27	0,30
75	90	54	180	1,23	0,29
90	89	57	170	1,16	0,27
120	91	58	160	1,10	0,26
135	89	56	158	1,08	0,25

Conditions opératoires:

$$T_I = 90^\circ\text{C.}$$

Hauteur du lit: 6 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,49$ m/s

Humidité relative de l'air: $\Psi = 65\%$

Caractéristiques du produit:

Charge : 1360 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,50$ kg/kg mat. sèche

Humidité finale: $X_\infty = 0,14$ kg / kg mat. sèche

Matière sèche: $m_s = 302$ g.

Résultats expérimentaux:

Temps(min.)	T_I (°C.)	T_2 (°C.)	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_\infty}{X_0 - X_\infty}$
0	92	50	1360	4,50	1,00
5	93	45	1150	3,81	0,84
10	85	42	1020	3,38	0,74
15	88	43	910	3,01	0,66
20	91	46	780	2,58	0,56
25	93	49	720	2,38	0,51
30	95	53	665	2,20	0,47
35	85	50	620	2,05	0,44
40	91	54	580	1,92	0,41
45	94	55	550	1,82	0,39
50	80	50	520	1,72	0,36
55	86	50	500	1,66	0,35
60	92	55	475	1,57	0,33
70	93	56	440	1,46	0,30
80	88	58	410	1,36	0,28
90	95	60	395	1,31	0,27
100	90	58	380	1,26	0,26
110	92	60	380	1,26	0,26
125	94	59	360	1,19	0,24
140	95	61	350	1,16	0,23
155	92	58	345	1,14	0,23

Conditions operatoires:

$T_I = 90^{\circ}\text{C}.$

Hauteur du lit : 6 cm.

Vitesse de l'air: $U = 0,74 \text{ m/s}$

Humidité relative de l'air: $\Psi = 80\%$

Caracteristiques du produit:

Charge : 1355 g.

Humidité initiale: $X_0 = 4,34 \text{ kg/kg mat. sèche}$

Humidité finale : $X_{\infty} = 0,02 \text{ kg/kg mat. sèche}$

Matière sèche: $m_s = 312 \text{ g}.$

Resultats experimentaux:

Temps(min.)	$T_I(^{\circ}\text{C}.)$	$T_2(^{\circ}\text{C}.)$	masse produit(g.)	X	$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$
0	90	55	1355	4,34	1,00
5	91	43	1140	3,64	0,83
10	85	41	975	3,11	0,72
15	88	42	855	2,72	0,63
20	90	45	750	2,39	0,55
25	91	49	670	2,13	0,49
30	91	52	620	1,97	0,45
35	92	52	570	1,81	0,41
40	88	53	530	1,68	0,38
50	91	55	470	1,49	0,34
65	91	57	410	1,30	0,30
80	90	59	380	1,20	0,27
95	92	60	355	1,12	0,25
110	91	58	340	1,07	0,25
125	90	58	325	1,03	0,23
130	91	58	320	1,01	0,23
140	91	59	320	1,01	0,23

$$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

1,0

0,9

0,6

0,5

0,4

0,3

0,2

0,1

Influence de la vitesse
de l'agent séchant.
 $T = 50^{\circ}\text{C}$
hauteur du lit : 2cm

Courbes II.1

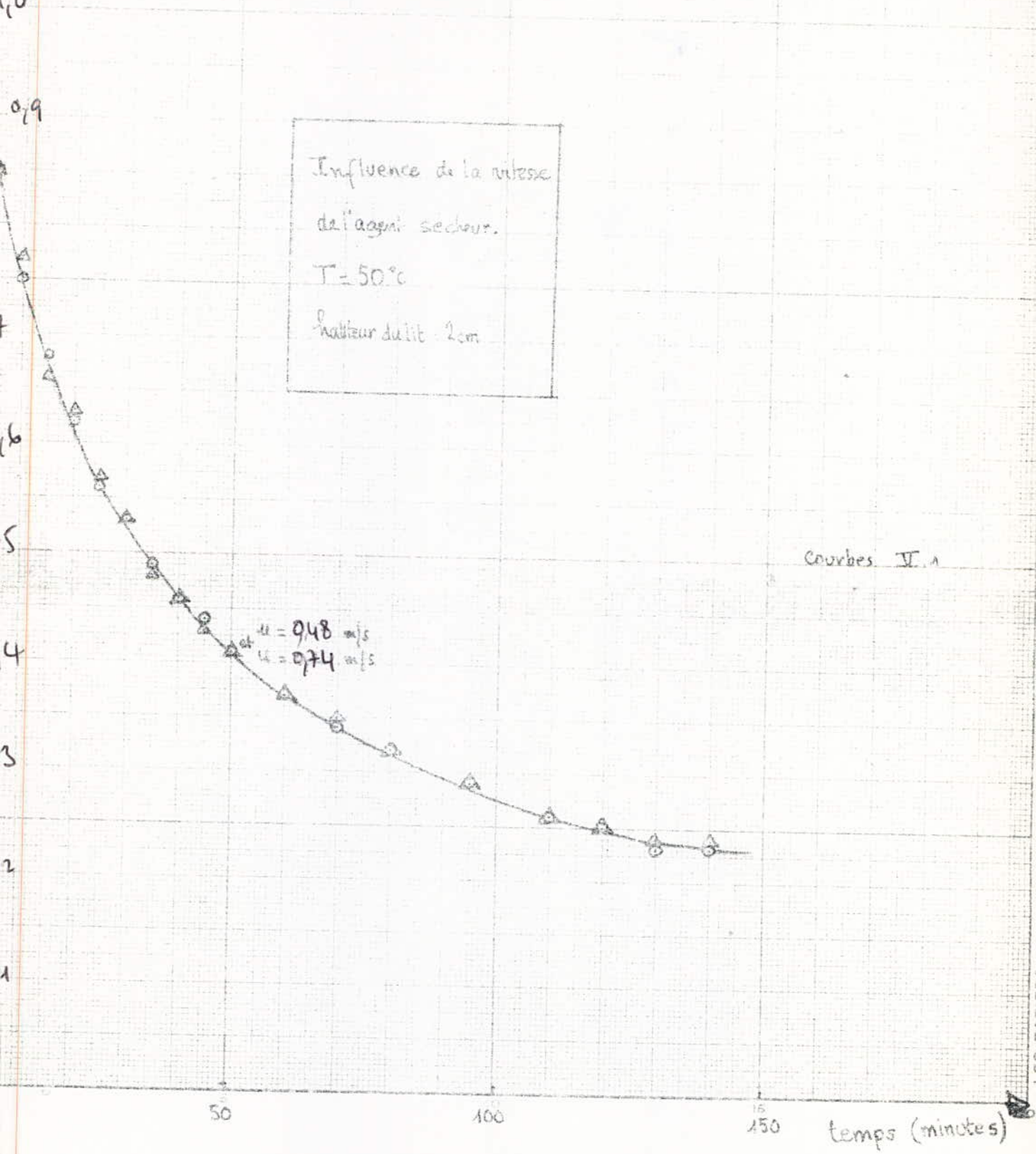
et $u = 0,48 \text{ m/s}$
 $u = 0,74 \text{ m/s}$

50

100

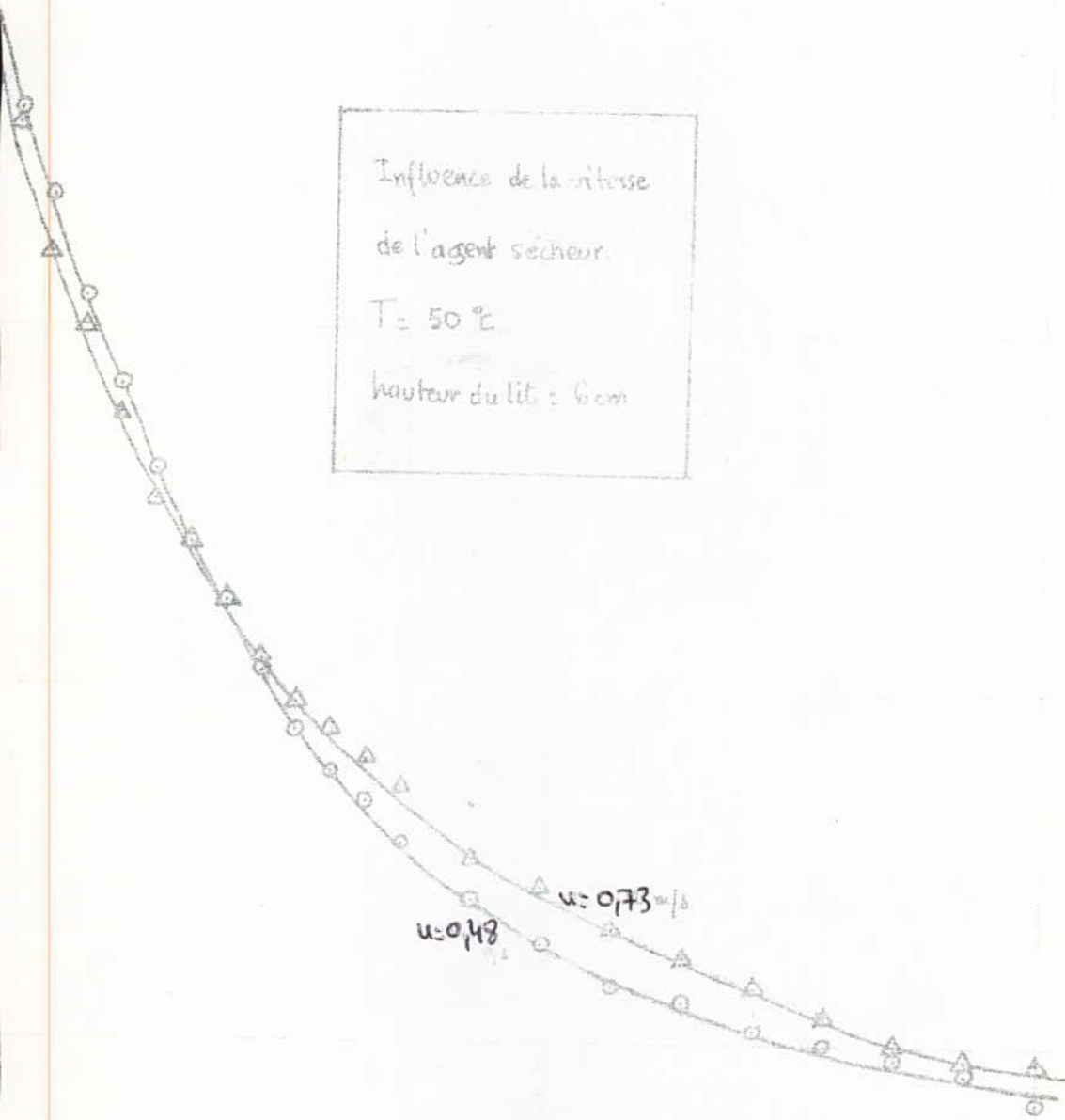
150

temps (minutes)



$$\frac{X_t - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

Influence de la vitesse
de l'agent sécheur.
T = 50 °C
hauteur du lit : 6 cm



Courbes V.2.

50

100

150

(minutes)

$$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

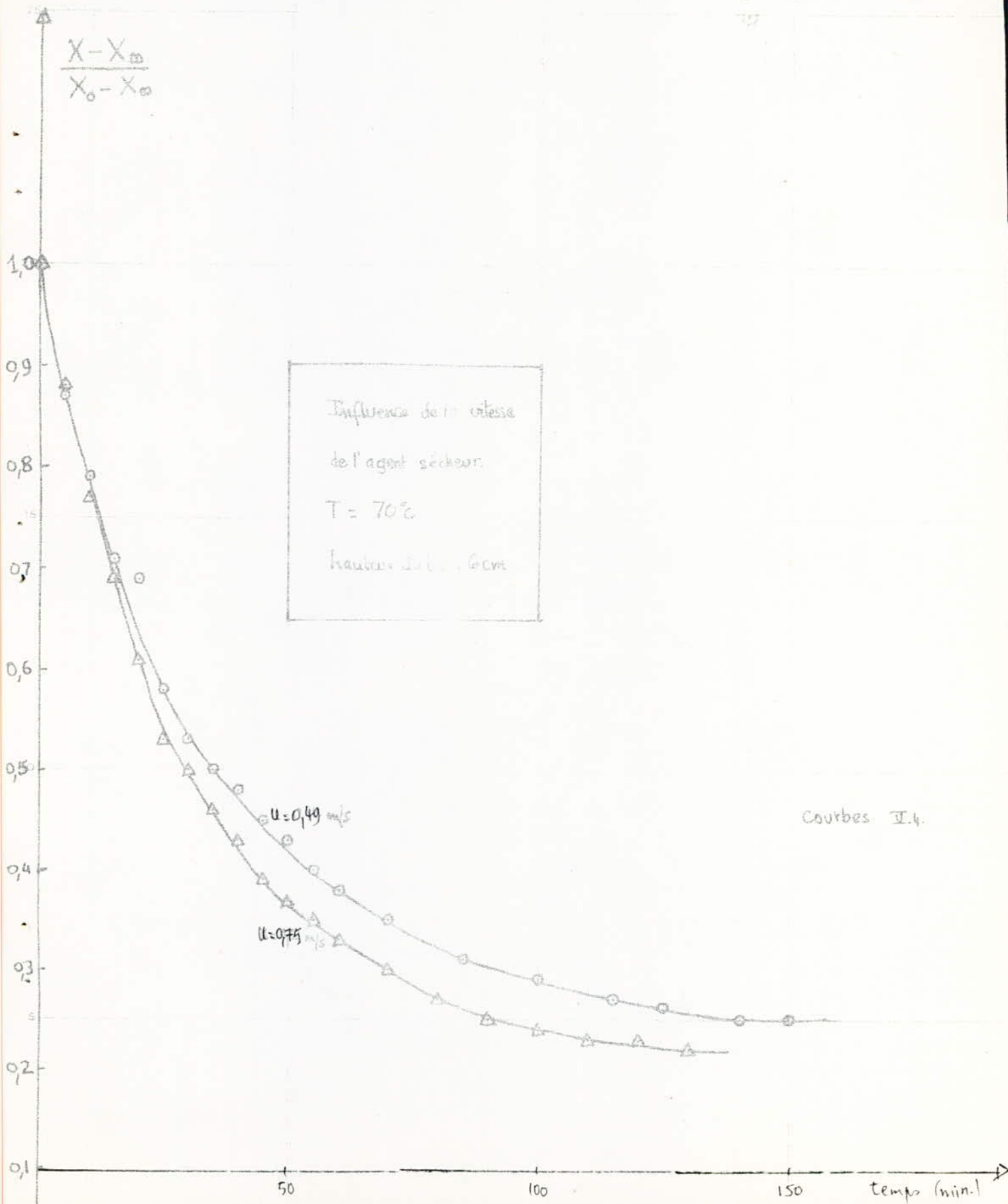
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1

Influence de la vitesse
de l'agent sécheur
T = 70 °C
hauteur du lit = 2 cm

$u = 0,76 \text{ m/s}$
 $u = 0,49 \text{ m/s}$

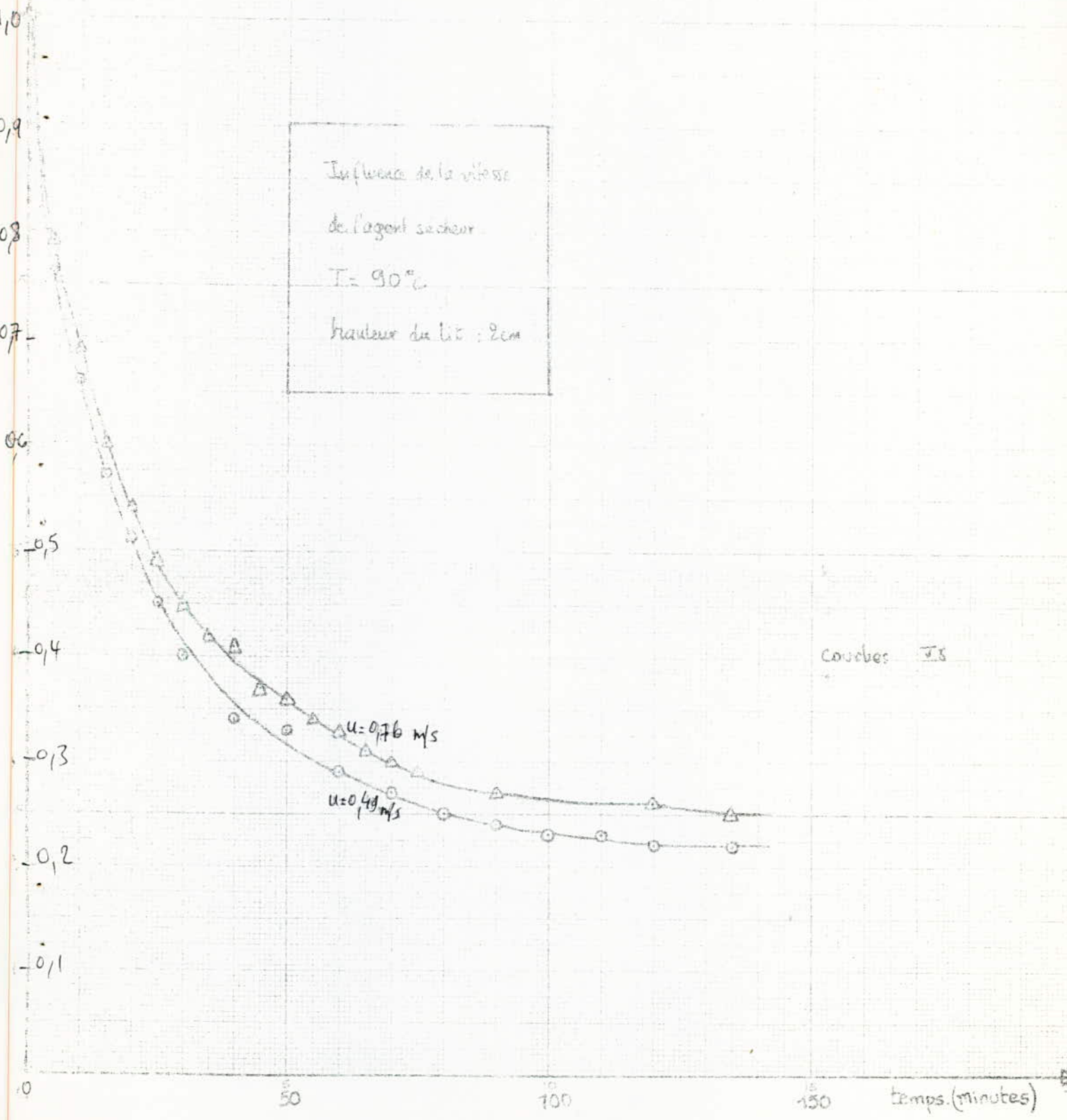
Courbes 2.3.

0 50 100 150 temps (minutes)

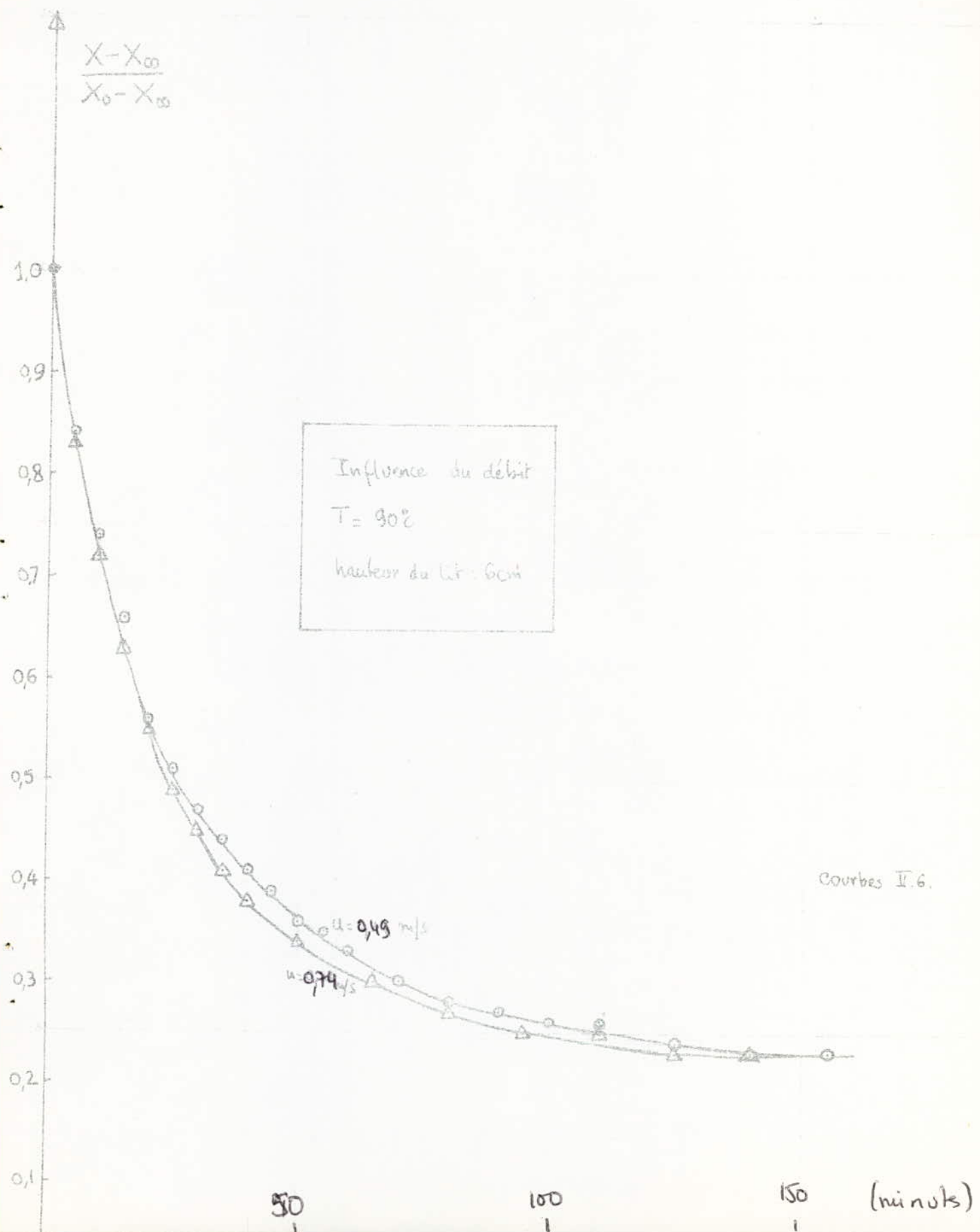


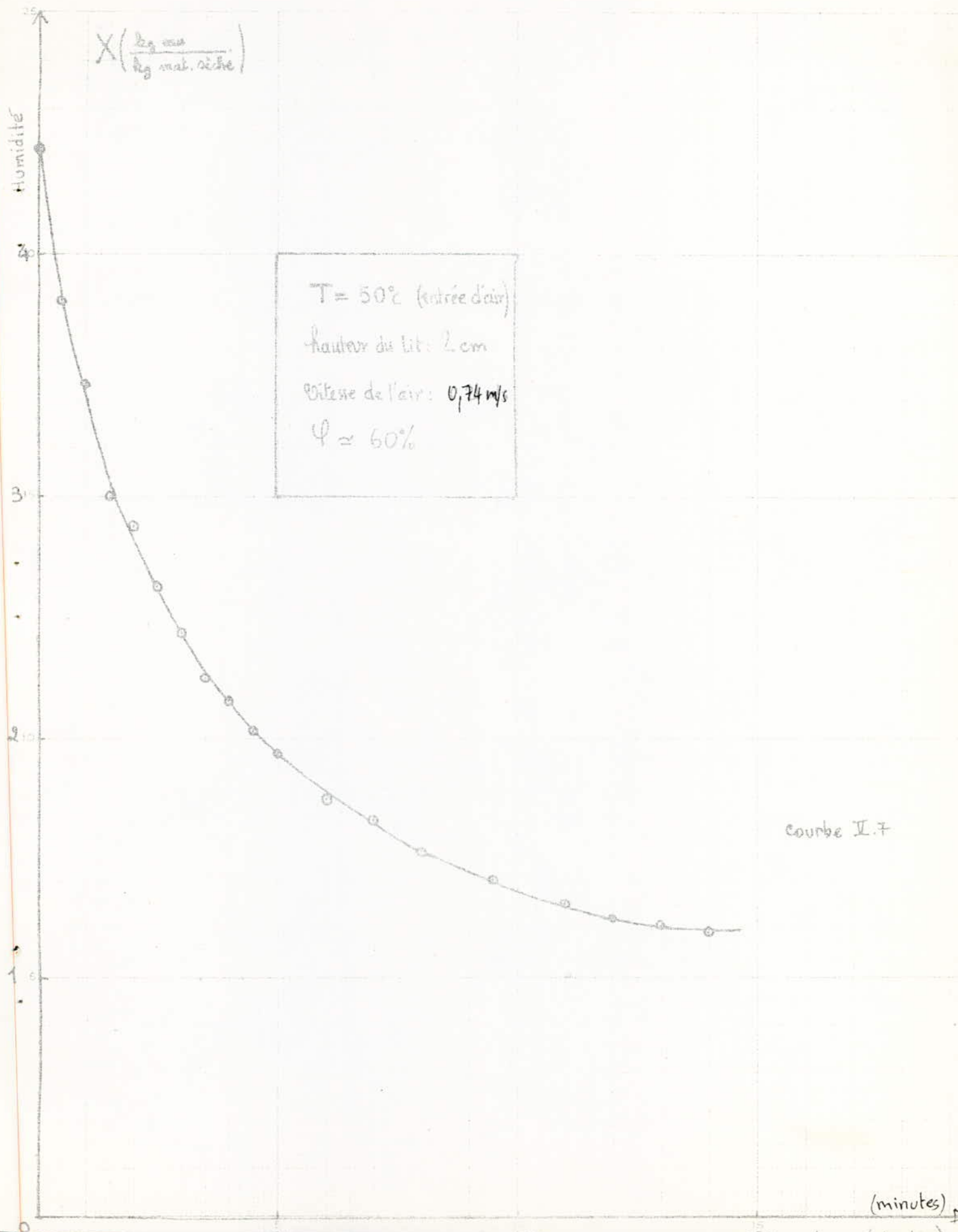
$$\Delta \frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

Influence de la vitesse
de l'agent sécheur
 $T = 90^{\circ}\text{C}$
hauteur du lit : 2cm



courbes JS





$\Delta \frac{dx}{dt}$

0,4

0,3

0,2

0,1

1

$T = 50^\circ\text{C}$

hauteur du lit : 2cm

vitesses de l'air : 0,74 m/s

$\varphi \approx 60\%$

La courbe est caractéristique de la diffusion (Seconde période du séchage).

courbe II'

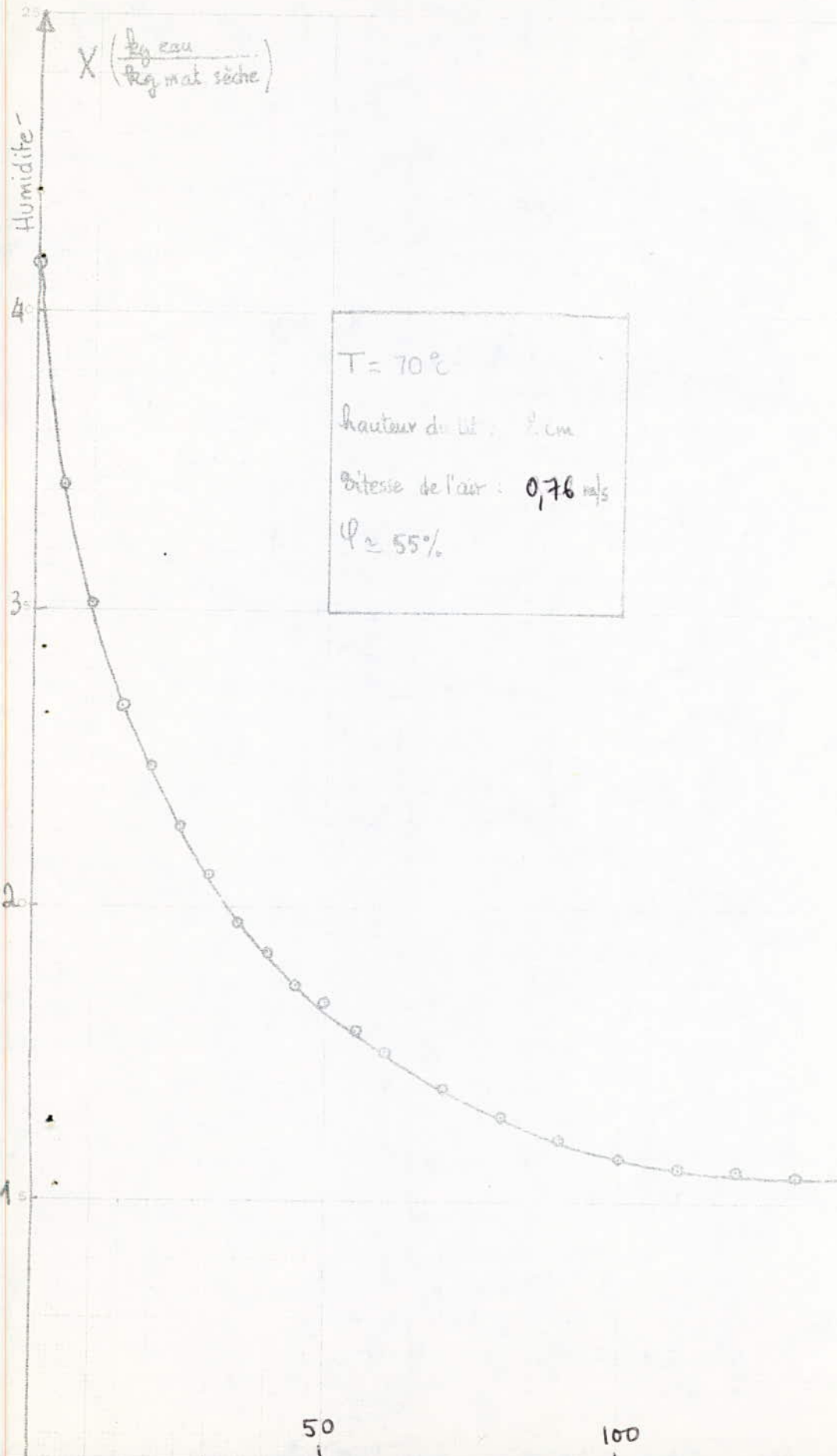
1

2

3

4

X



courbe I 8

(minutes)

$\Delta \frac{dx}{dt}$

0,20

0,15

0,10

0,05

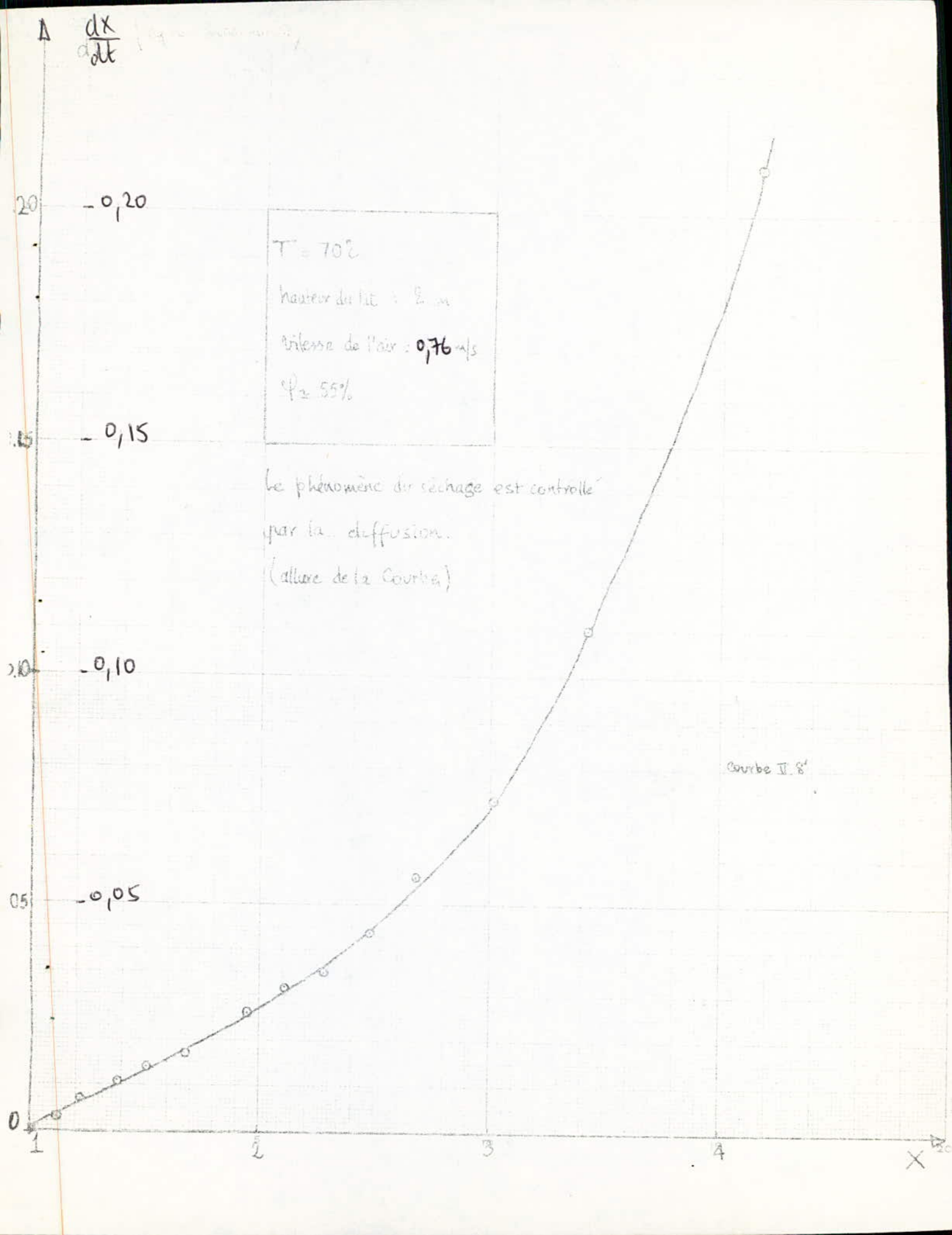
0

$T = 70^{\circ}\text{C}$
hauteur du lit : 2 m
vitesse de l'air : 0,76 m/s
 $\psi = 55\%$

le phénomène de séchage est contrôlé
par la diffusion.
(allure de la Courbe I)

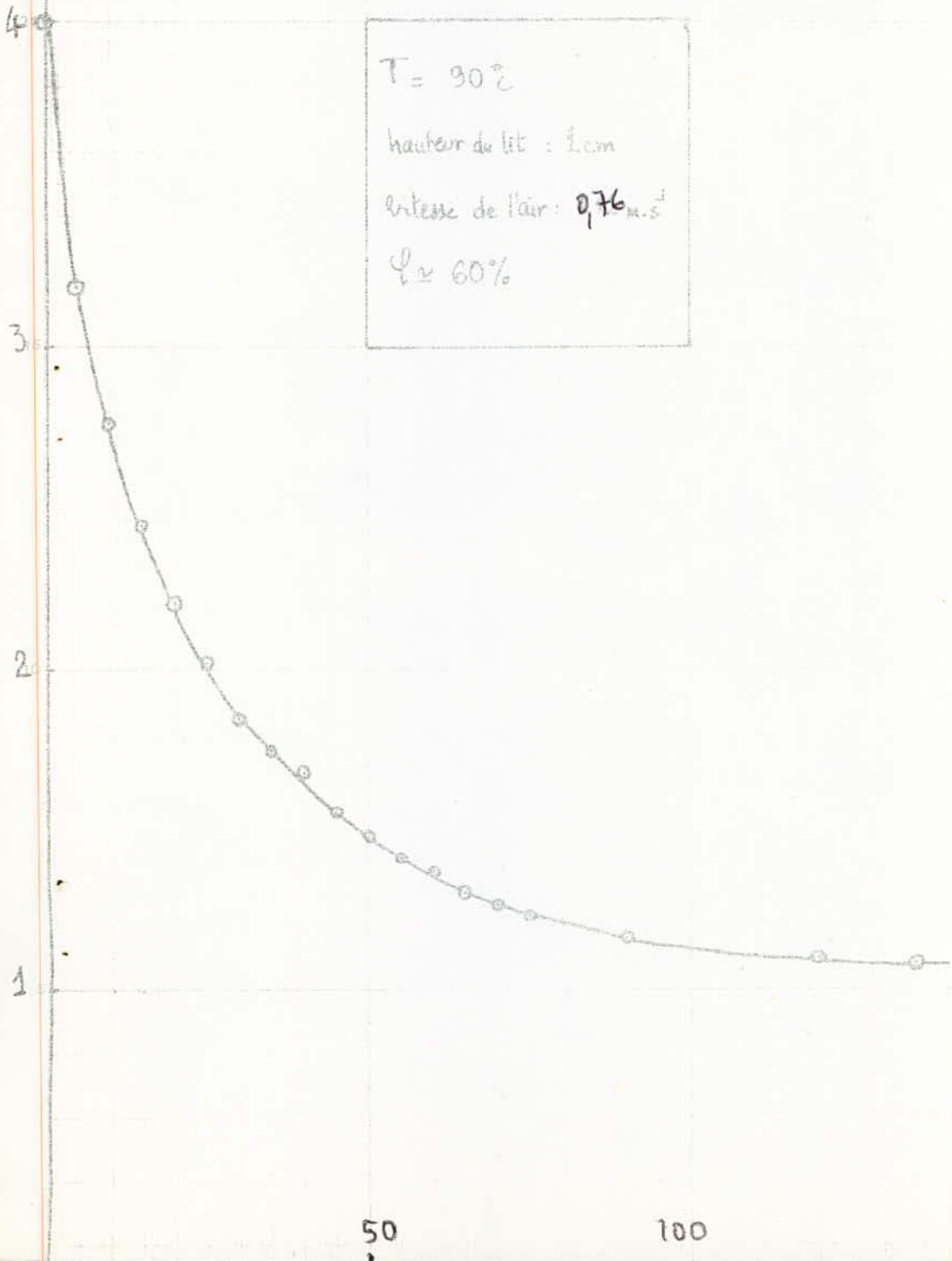
Courbe II. 8'

1 2 3 4 X



$$X = \left(\frac{\text{kg eau}}{\text{kg mat. sèche.}} \right)$$

$T = 30^{\circ}\text{C}$
hauteur du lit : 2cm
vitesse de l'air : $0,76 \text{ m.s}^{-1}$
 $\varphi \approx 60\%$



courbe I 3.

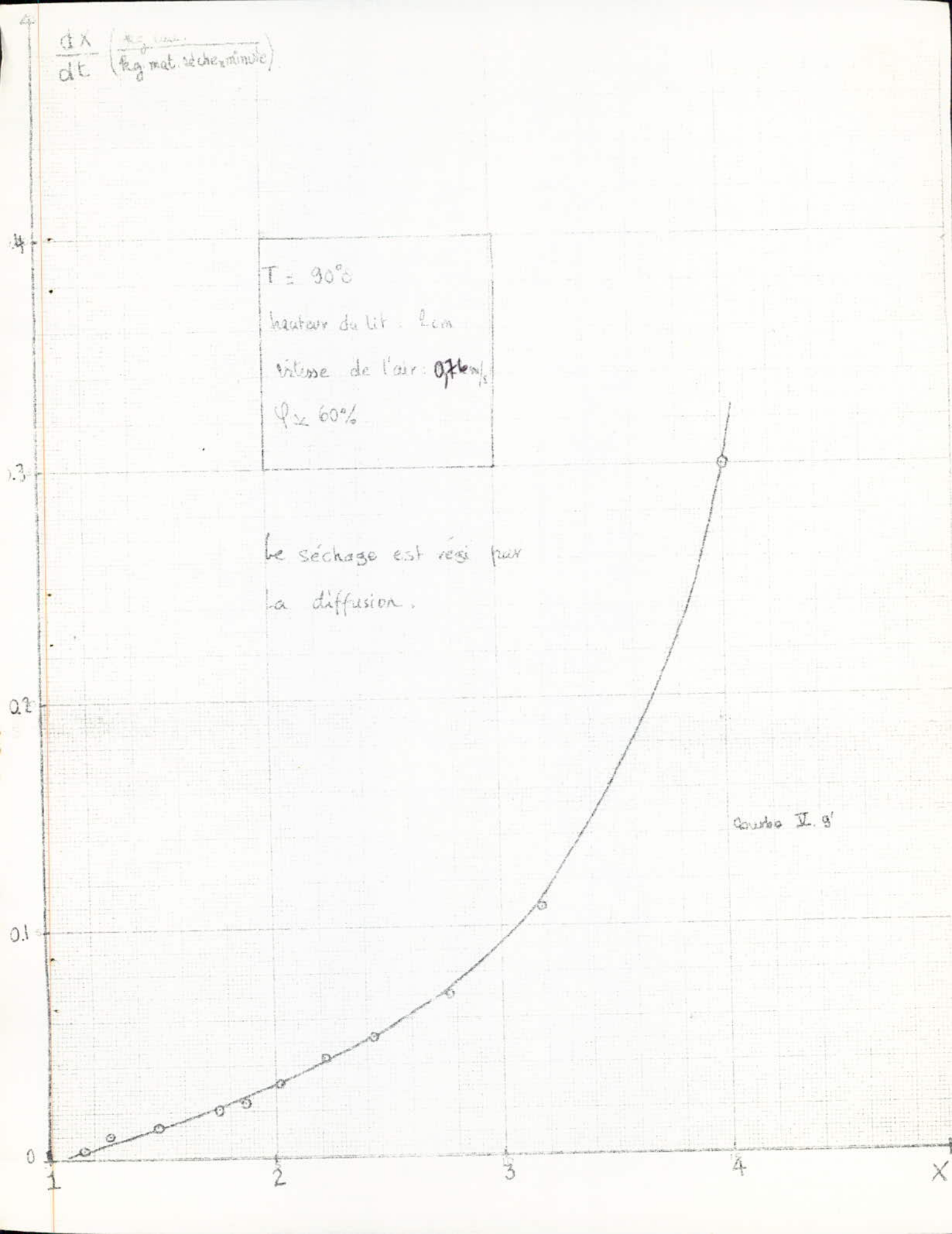
(minutes)

$$\frac{dx}{dt} \left(\frac{\text{kg mat. sèche}}{\text{minute}} \right)$$

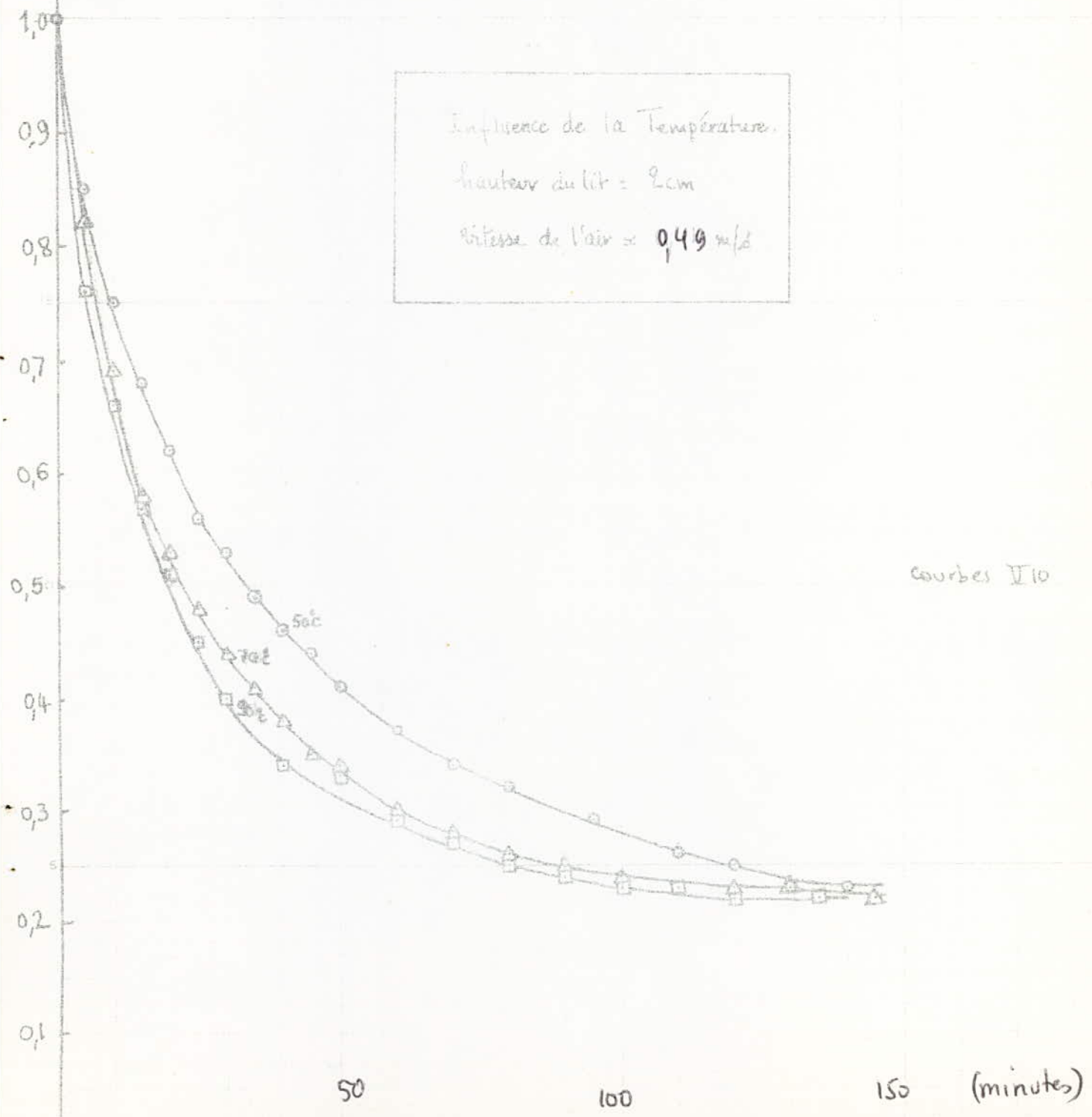
$T = 30^{\circ}\text{C}$
hauteur du lit : 2 cm
vitesse de l'air : $0,76 \text{ m/s}$
 $\varphi = 60\%$

le séchage est régi par
la diffusion.

courbe II. 9'



$$\frac{X - X_0}{X_0 - X_{\infty}}$$



$$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

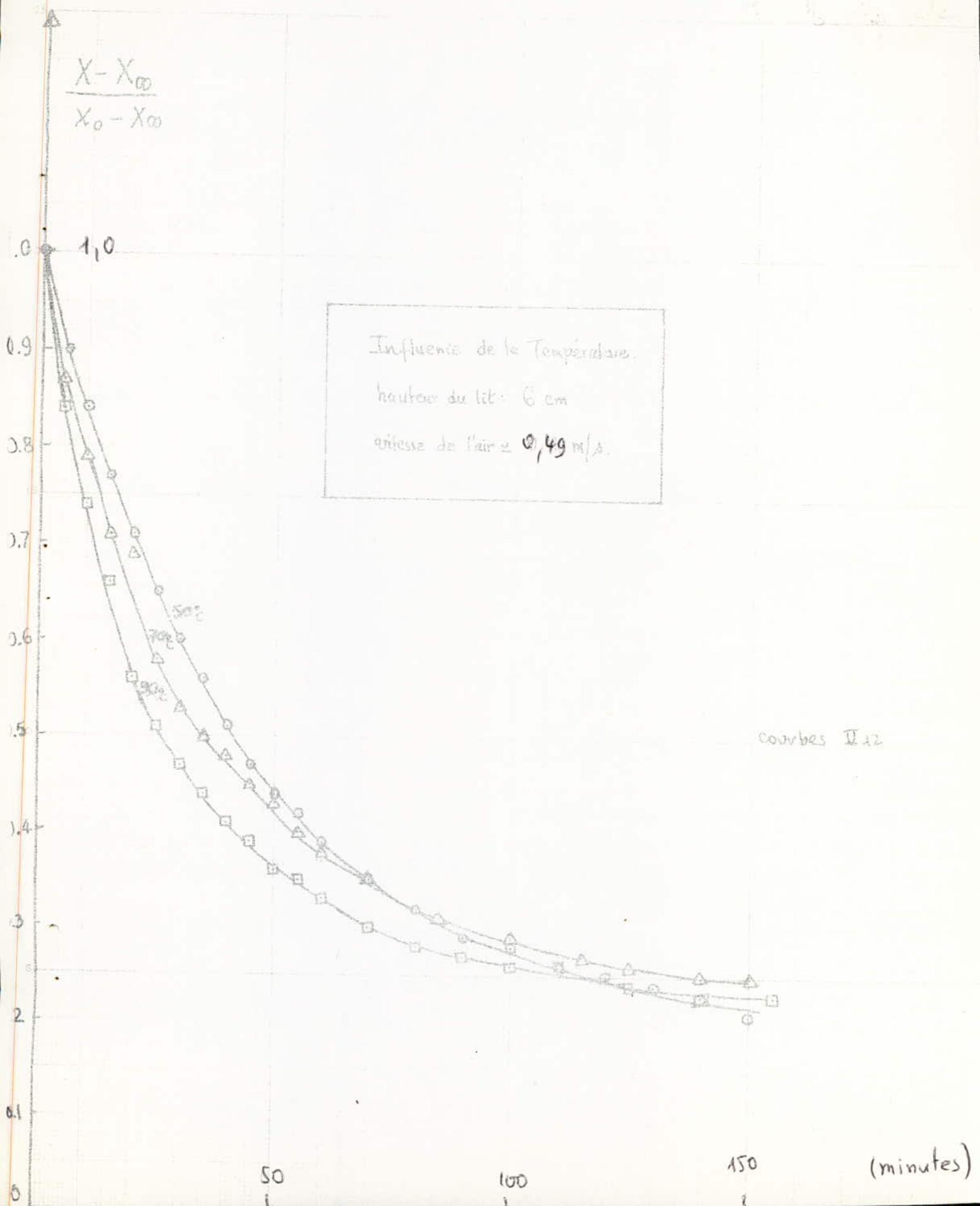
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

Influence de la Temperature.
 hauteur du lit = 2 cm
 vitesse de l'air = 0,76 m/s

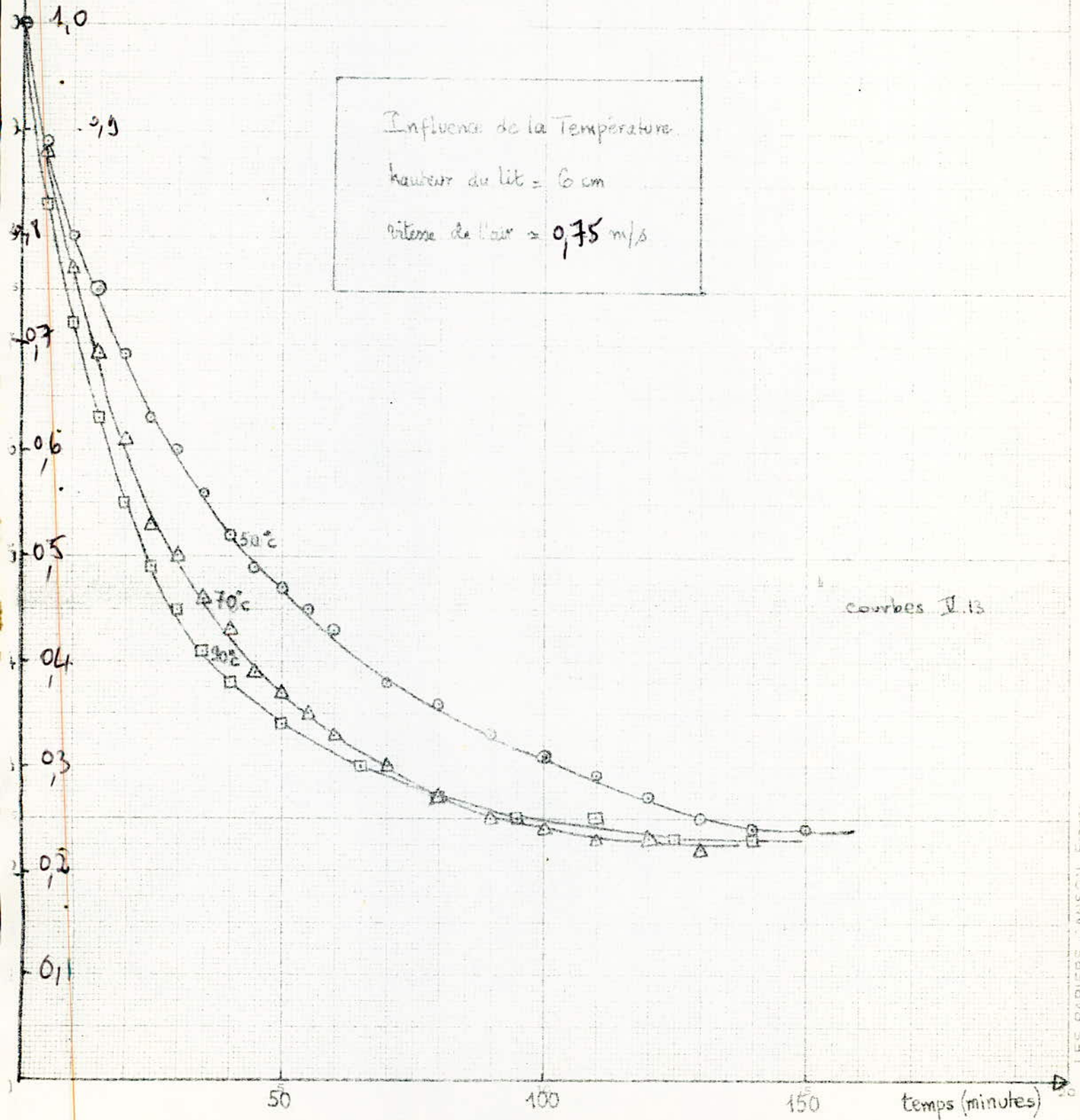
Courbes II. 11

50°C
 40°C
 30°C

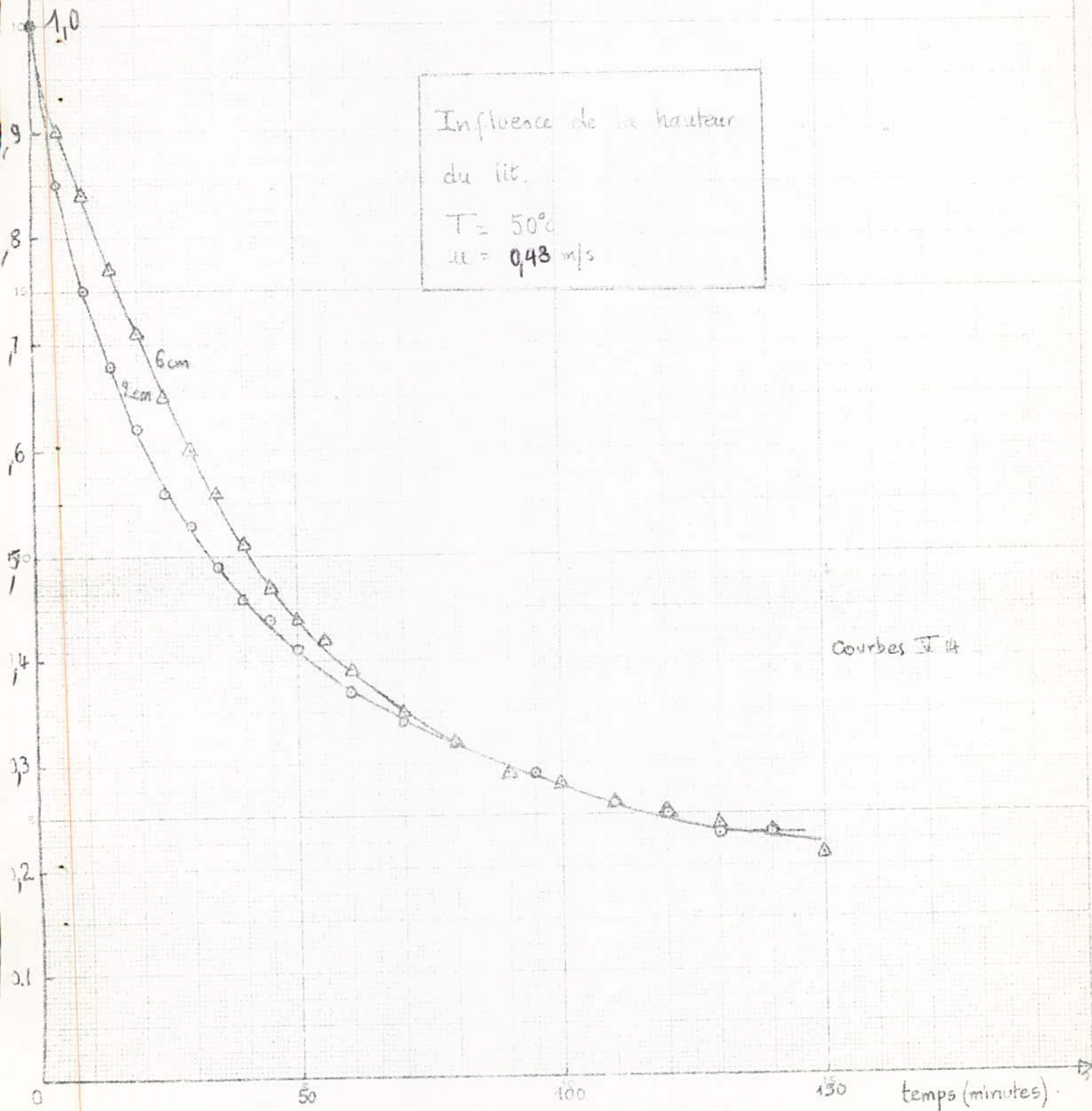
50 100 150 temps (minutes)



$$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$

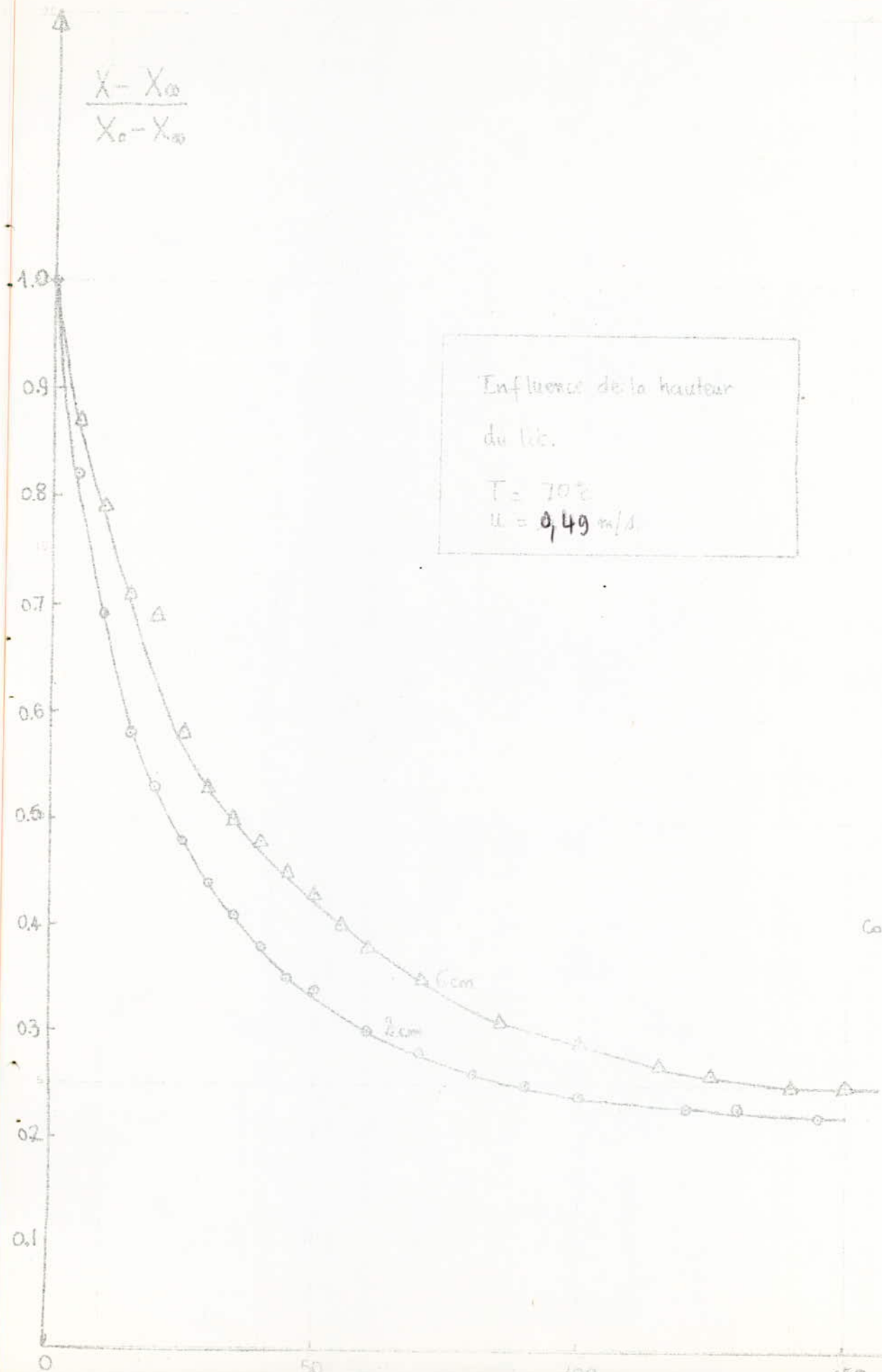


$$\frac{X - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}}$$



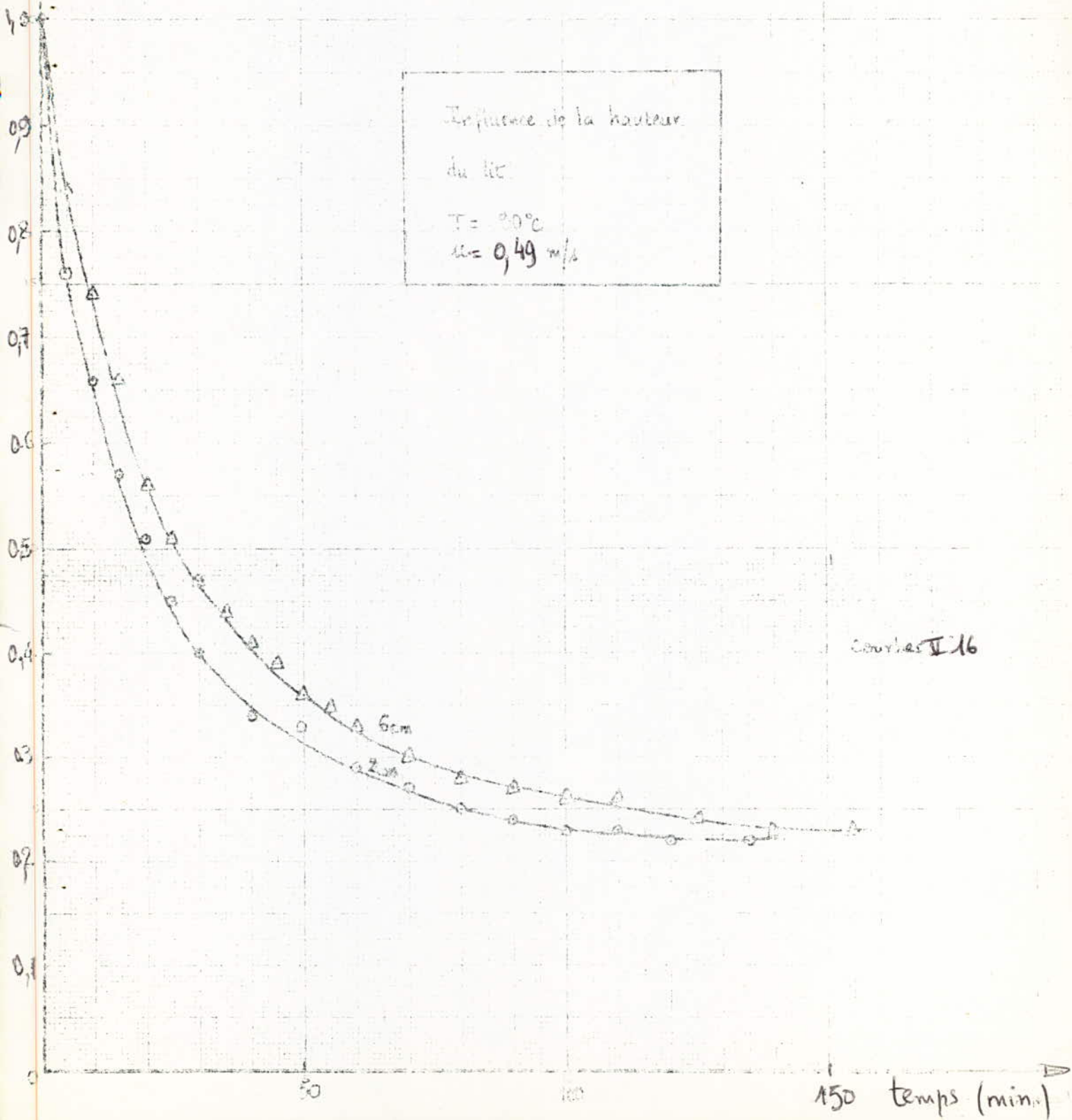
$$\frac{X - X_{\infty}}{X_c - X_{\infty}}$$

Influence de la hauteur
du lit.
 $T = 70^{\circ}\text{C}$
 $u = 0,49 \text{ m/s}$



Courbes V 15

$$\frac{X - X_0}{X_\infty - X_0}$$



V. Influence des divers paramètres sur la vitesse de séchage.

V. I Influence de la vitesse de l'agent sécheur:

Nous avons travaillé avec deux vitesses différentes, l'une proche de 0,5 m/s, l'autre de 0,75 m/s.

Les résultats enregistrés nous permettent de conclure que la vitesse de l'air n'a pas d'influence notable sur la vitesse de séchage, ainsi que le montrent les courbes V.I à V.6.

Ceci suggère que le séchage de la pomme de terre ne présente pas de première période d'évaporation superficielle. En effet, lors de cette évaporation, le transport de l'humidité se faisant par convection, plus la vitesse de l'agent sécheur est grande plus le coefficient de transfert de matière par convection de la surface solide humide au courant gazeux devrait être grand.

Cette suggestion est confirmée par les courbes $\frac{dX}{dt} = f(X)$ (courbes V.7', 8', et 9') dont les allures sont caractéristiques de la 2^{ème} période de séchage (falling rate period) qui est beaucoup plus influencée par la température. Pendant cette période, le mécanisme qui entre en jeu dans le phénomène du séchage est le transport de l'humidité à l'intérieur de la matière solide.

Remarque: Il se peut fort bien que la première période existe mais ne soit pas décelée parce que très brève.

V.2 Influence de la température:

D'après ce qui précède, on s'attend à ce que la température ait une influence notable sur la vitesse de séchage; c'est ce que montrent les courbes V.10 à 13

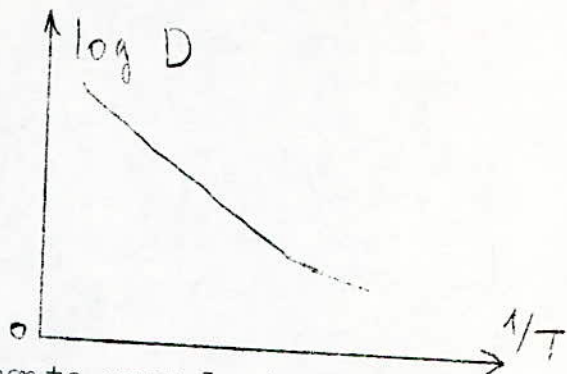
Le transport de l'humidité par le mécanisme de diffusion peut s'exprimer par la loi de Fick

$$\frac{dX}{dt} = D_L \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right)$$

où D_L est le coefficient de diffusion liquide-solide.

or il est bien connu que la variation du coefficient de diffusion D avec la température suit une loi d'Arrhénius: (12)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$



Nous voyons donc que D augmente avec la température. De même, et en accord avec nos résultats, la vitesse de séchage augmente avec la température.

V.3 Influence de la quantité de matière (hauteur du lit)

Les courbes obtenues ne sont pas concluantes.

Pour pouvoir comparer des vitesses de séchage, il faudrait pouvoir évaluer pour chaque cas la surface de contact air-particules solides, ce qui n'est pas pratiquement accessible à la mesure.

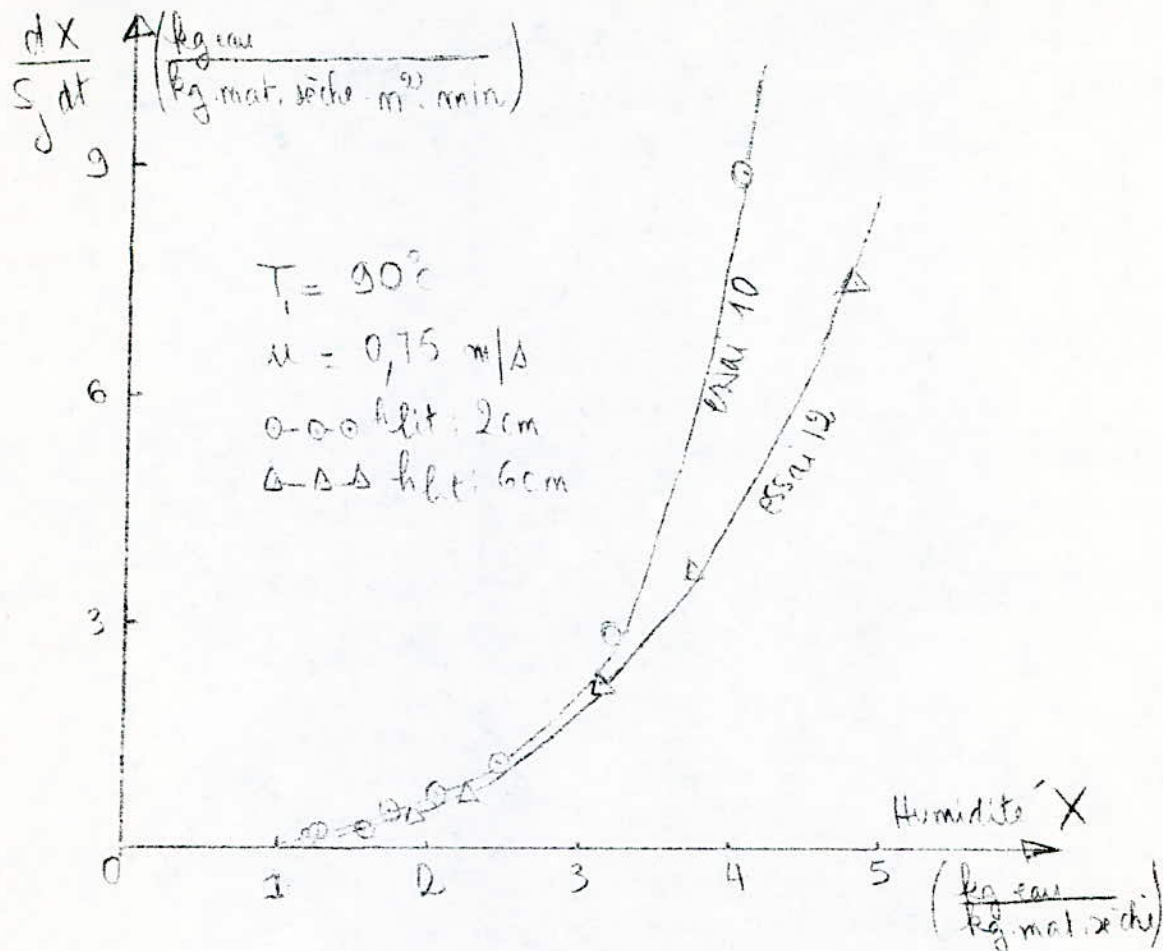
(13)

Nonhebel et Moss suggèrent de comparer des vitesses de séchage rapportées à la section droite du séchoir, c'est à dire à la surface totale de la bande d'un séchoir à bande industriel ou encore, dans notre cas précis, à l'aire de la section droite de la jatte.

Il est possible également de comparer des vitesses de séchage rapportées à l'unité de masse de solide sec. Le plus aisé est de comparer des vitesses de séchage moyennes rapportées soit à l'unité de surface du séchoir soit à l'unité de masse de solide sec. Selon ce mode de comparaison, les résultats que nous avons enregistrés indiquent clairement que plus le lit de particules est haut, plus la vitesse de séchage est grande. Cependant il y a un aspect qu'il ne faut pas perdre de vue: c'est celui de l'hydrodynamique qui imposera une hauteur maximale. En outre l'air a une limite de saturation.

62

Dans la figure ci-dessous, on montre l'influence de la hauteur du lit (ou de la quantité de matière) sur la vitesse de séchage rapportée à l'aire de la section droite de la jatte.



Il est à remarquer que l'humidité relative de l'air lors de l'essai I2 était de 80% alors qu'elle n'est plus que de 60% lors de l'essai I0.

6. Aspect du produit traité : Considérations biochimiques.

Les échantillons traités sont conservés dans des sachets en matière plastique. Quelques semaines après leur traitement, les pommes de terre ont subi des alterations de couleur. IL s'agit pour la majorité, des échantillons ayant été traités à 50°C, pour lesquels l'humidité finale est comprise entre 0,2 et 0,3 kg eau/kg mat. sèche

On peut conclure dès à présent que l'humidité finale est un critère important pour la conservabilité du produit. Plus l'humidité finale est faible, plus le produit est mieux conservé.

Dans la fabrication des pommes de terre déshydratées, la teneur en sucres est liée étroitement à la couleur produite durant le procédé, et dans le cas de produits déshydratés, au brunissement qui peut avoir lieu durant un stockage ultérieur (12)

L'origine de cette couleur jaune-brun de ces produits était naguère attribuée à la caramélisation des sucres. Par la suite, il ^{s'est avéré} devint évident que ce brunissement est dû surtout à la présence de sucres réducteurs. Ceci suggère que le mécanisme de brunissement n'est pas provoqué par la caramélisation, mais plutôt par une réaction de Maillard ou réaction de brunissement non-enzymatique entre les groupements aldéhydes des sucres réducteurs (tels que le glucose et le fructose) et les groupements amino libres des acides aminés et sans doute, à un degré moindre des protéines de la pomme de terre. Par ailleurs, durant le traitement de blanchiment, qui précède celui de la déshydratation, le glucose diffuse vers la périphérie des particules de pommes de terre.

En règle générale, les pommes de terre contenant plus que 2% de sucres réducteurs (% de la matière sèche) sont considérées impropres au traitement.

Un certain nombre d'autres facteurs peuvent être également à l'origine du brunissement du produit traité. Parmi eux les acides organiques, le pH, des traces de métaux tels que le fer et le manganèse (Bohart et Carson, 1955).

Des mesures efficaces pour prévenir le brunissement de la pomme de terre déshydratée comprennent le contrôle de l'humidité, de la température et du pH ainsi que l'application de SO₂ ou de sulfite. (12)

Un pH plus faible défavorise les réactions de brunissement. C'est ainsi qu'on utilise un traitement combiné d'acide citrique et de sulfite.

Composition biochimique et structure de la pomme de terre.

Le tableau ci-dessous donne la composition moyenne de la pomme de terre d'après Tabust et Smith (IAA.1968)

Constituants	valeurs moy.	val.extrêmes % mat.fraîche	val.moy. % mat.sèche	val.extr mg/kg de produit.
Eau	77,5	63,2 - 86,9	0	
mat.sèches	22,5	13,1 - 36,8	100	
glucides totaux	19,4	13,3 - 30,5		
mat.azotées	2,0	2,0 - 4,6	8,9	
Cellulose	0,6	0,17 - 3,48	2,7	
Lipides	0,1	0,02 - 0,96	0,4	
Cendres	1,0	0,44 - 1,90	4,4	
Amidon		65 - 85	7,7	
Sucres		traces - 10	1,5	
Vit. C				100-400
B _I				0,50-1,20
Carotène				0,1-0,6
Vit. K				1,0

Bien entendu, la liste des substances contenues dans la pomme de terre est encore plus longue; c'est ce qui fait que celle-ci possède une très bonne valeur alimentaire et pourrait être assimilée à un aliment complet. Ainsi, dans 100 g. de produit consommable, on a 85 Kcal utilisables dont 79,9 Kcal sont assimilables par l'organisme. (10)

L'amidon, qui entre pour 65 à 80% de la matière sèche retient particulièrement notre attention.

Les caractéristiques physiques, chimiques et histologiques de ce produit sont non seulement liées à la qualité du produit final (déshydraté) mais aussi dictent les conditions opératoires du procédé.

Dans la matière fraîche, l'amidon se présente sous forme de granules microscopiques dans les leucoplastes des cellules. ~~ces~~

66

Lorsque la température de la pomme de terre est élevée jusqu'à 122°F (50°C), l'eau migre vers l'intérieur des granules d'amidon qui se mettent alors à enfler. L'amidon commence à se gélatiniser entre 147 et 160°F (64 - 71°C) (Roberts & Proctor, 1955).

Si la teneur en amidon est importante, les cellules se séparent par suite du gonflement des grains d'amidon.

Une rupture excessive des cellules est la cause de l'aspect pâteux et collant du produit traité. Or, pour ces substances (gels) on sait que le mouvement de l'humidité est lent et se fait probablement par diffusion du liquide.

Comme conséquence, -et nous l'avons observé- les courbes de séchage ne présentent pas ou alors présentent une très brève période d'évaporation superficielle, et donnent lieu à des humidités critiques relativement élevées.

EN CONCLUSION :

Le séchage des particules de pommes de terre décrites plus haut et ayant subi le traitement au bisulfite de Na:

- est peu influencé par la vitesse de l'agent sécheur;
- plutôt influencé par la température;
- ne présente pas de 1^{ère} période d'évaporation superficielle
- devra se faire à des températures supérieures ou égales à 70°C pour assurer une meilleure longévité du produit.

VII. Calcul d'un séchoir industriel

On se propose de calculer les dimensions d'un séchoir à bandes pouvant assurer une production de 200 kg/heure de pommes de terre séchées, contenant $X_{0s} = 8\%$ d'humidité (% par rapport à la masse humide) à partir du produit humide. ($X_0 = 82\%$).

Caractéristiques du produit:

Temperature initiale: 20°C .

$C_p(\text{sec})$ capacité calorifique de la mat. sèche: $= 0,44 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

Paramètres de l'air ambiant:

$T = 15^\circ\text{C}$.

$\Psi = 60\%$ (humidité relative)

soit $Y_I = 0,007 \text{ kg. d'eau/kg. d'air sec}$

L'air entre dans le séchoir à 70°C et sort à 46°C avec une humidité relative de 80% soit $Y_2 = 0,054 \text{ kg. d'eau/kg. mat. sèche}$.

ON suppose que l'air n'est pas préchauffé. En outre, on choisira un hauteur du lit de particules égale à 6 cm. On se basera ainsi sur les résultats obtenus durant l'essai N°8. pour résoudre le problème.

Solution :

Appelons X_i la teneur initiale en eau (en % par rapport à la masse humide) du produit.

X_f la teneur finale en eau du produit

x_i le titre initial en eau (en %/mat. sèche)

x le titre final en eau du produit.

G_i la masse du produit humide

G_f la masse du produit après séchage.

G_{fo} la masse du produit séché à sec.

Nous avons les relations:

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

$$X = \frac{x}{100 + x} \quad \text{et} \quad x = \frac{G_i - G_f}{G_{fo}}$$

Nous avons donc $G_f = 200$ kg (par heure)

Débit de produit sec (séché à sec):

$$G_{fo} = G_f (1 - X_f)$$

$$G_{fo} = 200(1 - 0,08) = 184 \text{ kg mat. sèche/heure}$$

Débit de produit humide:

$$G_i = G_{fo} (1 + x_i)$$

$$\text{avec } x_i = \frac{X_i}{100 - X_i} = \frac{82}{100 - 82} = 4,555$$

$$G_i = 184 (1 + 4,555) = 1022 \text{ kg/heure}$$

D'où la quantité d'eau à évacuer par heure:

$$Q_{\text{eau}} = 1022 - 200 = 822 \text{ kg d'eau/h.}$$

BILAN THERMIQUE :

a) Quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer le produit de 20 à 46°C:

$$Q_1 = 0,44 \times 184 (46 - 20) = 2105 \text{ kcal/h.}$$

b) Quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer l'eau se trouvant dans le produit:

$$Q_2 = 1022 \times 82 / 100 \times (46 - 20) = 21789 \text{ kcal/heure.}$$

c) Quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau contenue dans le produit:

$$Q_3 = 822 \times 540,5 = 444291 \text{ kcal/heure.}$$

d) Pertes calorifiques:

On les suppose égales à 10% de la somme $Q_1 + Q_2 + Q_3$ (14)

$$Q_4 = 468190 \text{ kcal/h.}$$

SURFACE TOTALE de la bande:

D'après l'essai N°8, où l'on avait utilisé une hauteur du lit de 6 cm. la quantité de matière sèche par m^2 est:

$$L = \frac{G_{fo}}{S_j} = 1,260 \times 0,18 / 0,033 = 6,87 \text{ kg } \frac{\text{mat. sèche}}{m^2}$$

POUR $G_{fo} = 184$ kg et pour un temps de séchage de 150 min. nous aurons une surface totale S

$$S = \frac{184}{6,87} \times \frac{150}{60} = 67 \text{ m}^2.$$

Nous augmentons cette surface de 20% à cause de toutes les incertitudes sur les résultats obtenus au laboratoire; finalement:

$$S_{\text{bande}} = 67 + 67 \times 0,20 = 80 \text{ m}^2.$$

Cette surface peut être réalisée à l'aide de deux séchoirs à bandes placés en série et dont les dimensions seraient les suivantes:

Largeur de la bande : 2 m.

Longueur de la bande: 5 m.

Nombre de sections : 4 par séchoir.

QUANTITE D'AIR NECESSAIRE au transfert de l'humidité/

1 kg d'air transporte $Y_2 - Y_1$ kg d'humidité

$$Y_2 - Y_1 = 0,054 - 0,007 = 0,047 \text{ kg d'humidité}$$

D'où la quantité d'air sec nécessaire:

$$M_{\text{air}} = 822 / 0,047 = 17489 \text{ kg d'air sec /h.}$$

Comme dans l'air ambiant il arrive $Y_1 = 0,007$ kg d'eau/kg d'air sec la quantité d'air qu'il faudra souffler sera égale à:

$$M'_{\text{air}} = 17489(1 + 0,007) = 17611 \text{ kg d'air ambiant}$$

Volume massique de l'air humide:

$$V_m = 22,4 (1/29 + Y_1/18) \times T/273.$$

Pour $T = 288^\circ\text{K}$ et $Y_1 = 0,007$

$$V_m = 0,824 \text{ m}^3/\text{kg d'air}$$

DEBIT VOLUMIQUE DE L'AIR:

$$Q_v = M'_{\text{air}} \times V_m = 17611 \times 0,824 = 14511 \text{ m}^3/\text{h.}$$

QUANTITE DE CHALEUR nécessaire pour réchauffer cet air:

$$Q_5 = Q_v C_H T$$

Avec $C_H =$ chaleur humide de l'air $= 1,0057 + 1,859 \times 0,007 = 1,019 \text{ KJ/kg}^\circ\text{C}$

$$Q_5 = 14511 \times 1,019 \times (70 - 15) = 81326 \text{ KJ/h.}$$

QUANTITE DE CHALEUR TOTALE nécessaire au séchage de 200 kg de pomme de terre par heure:

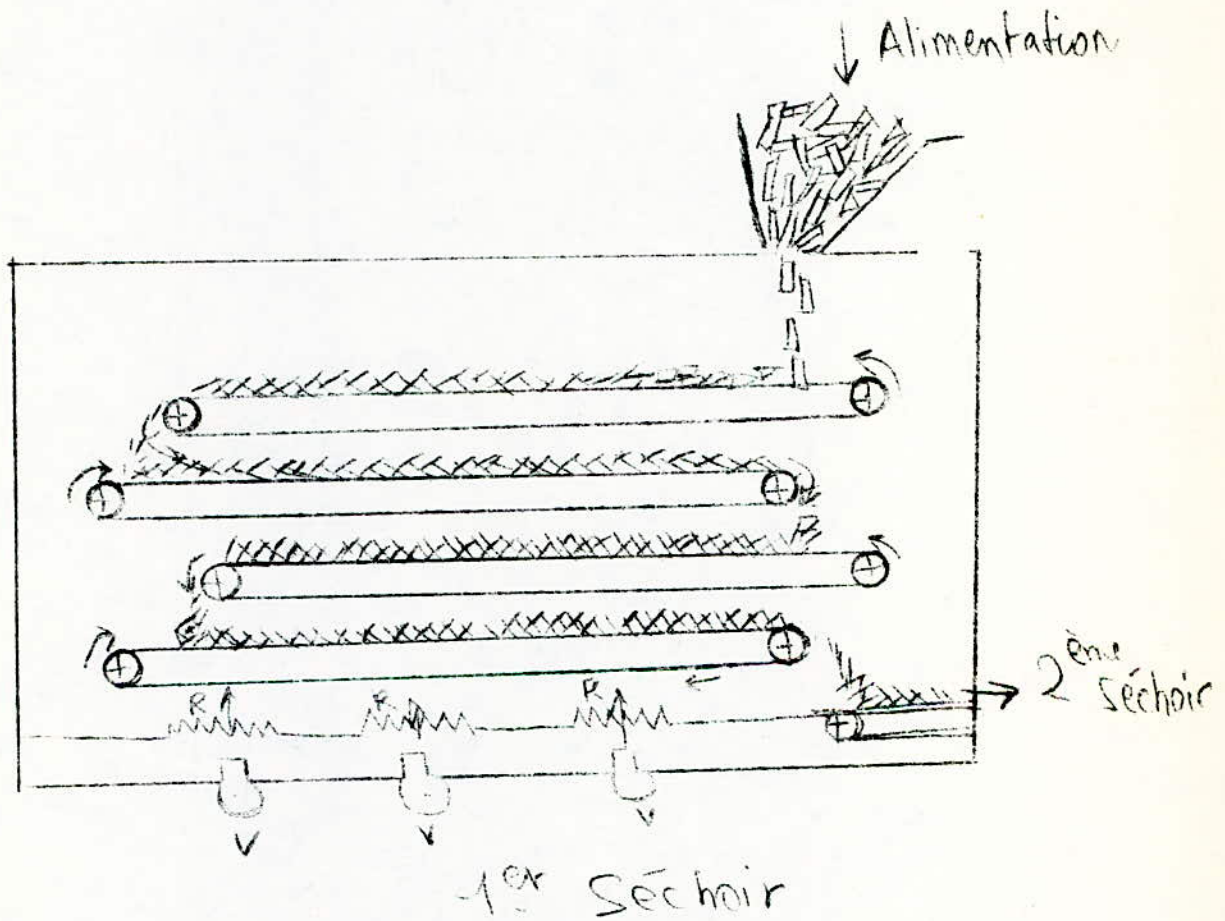
$$Q_{\text{totale}} = (468190 + 46819) \times 4,184 + 813269$$

$$Q_{\text{tot.}} = 2968067 \text{ KJ/h.}$$

soit 824 KW.

Ce chauffage peut être assuré par des résistances électriques.

SCHEMA DE CE SECHOIR A BANDES MULTIPLES



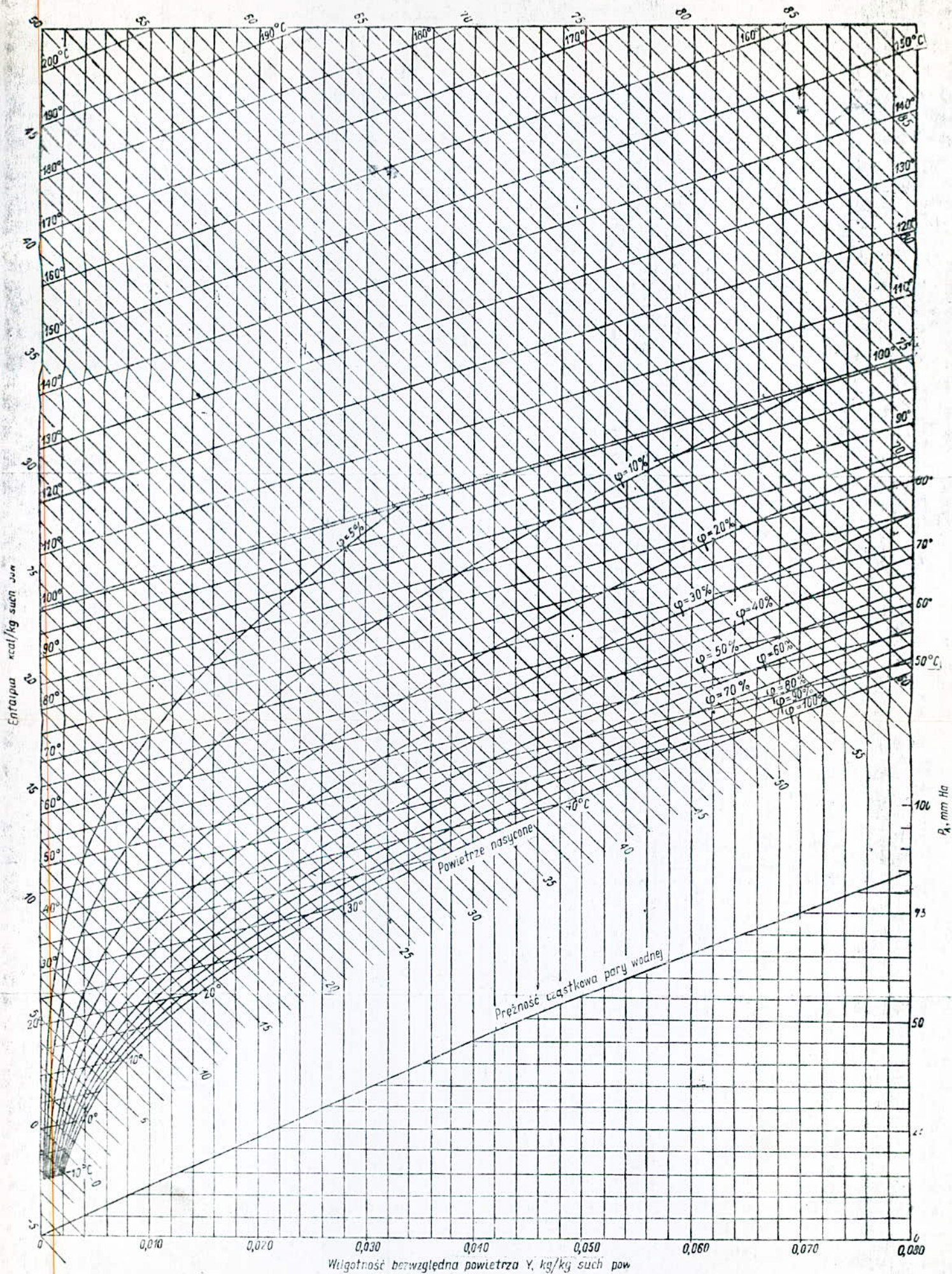
R: Résistance chauffante

V : Ventilateur

- 1 Le séchage par F. Kneule, Ed. Eyrolles 1959
- 2 Le séchage et ses applications industrielles.
par A. Dăscălescu, Dunod 1969.
- 3 Technologie chimique industrielle (tome 3)
par Georges Arditti, Ed. Eyrolles 1972.
- 4 Fluidization Engineering par D. Kunii & O. Levenspiel
Ed. John Wiley and Sons, 1969.
- 5 Principles of unit operations. par alan S. Foust & Wenzel.
Ed. John Wiley & Sons 1960.
- 6 Chemical engineers' Handbook. par Perry & Chilton
5th edition Mac Graw Hill, 1973
- 7 Generalized drying curves for porous solids.
par Bilgink, R.E. Peck & T. Çakaloğlu.
The Canadian Journal of Chem. Eng. vol. 53 FEB. 1975
- 8 Effect of resonant acoustic vibrations on drying rates
of potato cylinders.
par Linda G. Bartolome, Johan E. Hoff & Kenneth R. Purdy.
Food Technol. vol. 23. 321 Mars 1969.
- 9 Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie.
(tomes I et 2) par J. Burton. Dunod, 1966.
- 10 Evolution de la peroxydase de la p. de t. - Effets du froid sur
la conservation de la valeur alim. de la p. de t.
par M^{lle} H. Cherifa, 1979 (thèse d'ingénieur agronome).
- 11 The nutritive value of potatoes.
par M. Mac Cay & Jeanette B. Mac Cay.
- 12 Structure and chemical composition of the potato tuber.
Par Sigmund Schwimmer & Horace K. Burr.
- 13 La diffusion dans les solides
par Adda Y. et Philibert J. P.U.F. 1966.
- 14 Podstawy Teorii i Techniki Suszenia
par Czesław Strumiłło. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
Warszawa, 1975.

T A B L E D E S M A T I E R E S .

		page
Chapitre I	Introduction	I
Chapitre II	Le séchage	3
	II.1 Généralités	"
	II.1.1 Humidité d'un solide	"
	II.1.2 Teneur en humidité	"
	II.1.3 Hygroscopicité	"
	II.1.4 Courbes d'équilibre ψ, X_{eq}	4
	II.2 LE séchage: El ^{ts} de théorie	6
	II.2.1 Courbes de séchage	6
	II.2.1.1 I ^{ère} période du séchage	7
	II.2.1.2 Le point d'inflexion.	8
	II.2.1.3 Seconde période du séchage	8
	II.2.1.4 Vitesse de séchage	8
	II.2.1.5 Durée de séchage	9
	II.2.1.6 Courbes généralisées de séchage	10
	II.2.2 Séchage en lit fixe	11
	II.2.3 Séchage en lit fluide	12
	II.2.3.1 Application du séchage en couche fluidisée	14
Chapitre III	Appareillage et accessoires	15
	III.1 Classification des séchoirs	15
	III.2 Exemples de séchoirs industriels	16
	III.3 Séchoir APEX utilisé.	18
	III.3.1 Caractéristiques de l'appareil	18
	III.3.2 Description de l'appareil	18
	III.4 Schéma de l'appareil	19
	III.5 Accessoires	19
	III.5.1 Venturi	19
	III.5.2 Hygromètre à condensation	21
Chapitre IV	Partie expérimentale	24
	IV.1 Essai à vide	24
	IV.2 Etalonnage de thermomètres	25
	IV.3 Planification des expériences	25
	IV.4 Essai préliminaire	27
	IV.5 Détermination de l'humidité hygroscopique des produits	29
	IV.6 Essais et tracés des courbes	30
Chapitre V	Influence des divers paramètres	61
	V.1 Infl. de la vitesse	61
	V.2 INFL. de la température	61
	V.3 Infl. de la quantité de matière	62
Chapitre VI	Aspet du produit traité	64
Chapitre VII	Calcul d'un séchoir industriel	67
	Bibliographie	71



Rys. II. Wykres i - Y dla wilgotnego powietrza dla ciśnienia barometrycznego 750 mm Hg w obszarze średnich temperatur



