

## CAPTEUR SOLAIRE À SURFACE ABSORBANTE EN FORME DE JALOUSIE

### SOLAR COLLECTOR WITH AN ABSORBENT SURFACE IN THE FORM OF A VENETIAN BLIND

J. FLECHON, A. KOTOWSKI†, F. MACHIZAUD\* et M. DERCZYNSKI†

\*Laboratoire de Physique des Dépôts Métalliques, Université de Nancy I, BP 239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cédex (France)

†Laboratoire des Installations Sanitaires, Ecole Polytechnique de Czestochowa, Rue Deglera 35, 42200 Czestochowa (Pologne)

(Reçu le 26 mars 1984; en forme révisée le 24 mai 1984)

#### Résumé

Dans le but d'augmenter le rendement des capteurs plans à air, nous proposons l'emploi de surfaces absorbantes en forme de jalousie, composées de deux plans de lamelles discontinus et parallèles. L'analyse théorique confirmée par les résultats expérimentaux révèle que les paramètres énergétiques résultant de cette construction sont meilleurs que ceux obtenus dans le cas de capteurs possédant une seule surface absorbante plane continue.

#### Summary

In order to increase the efficiency of flat plate air collectors, we propose the use of absorbing areas in the form of a venetian blind and composed of two planes of discontinuous and parallel lamellae. The theoretical analysis confirmed by the experimental results reveals that the energy parameters resulting from this structure are better than those obtained in the case of collectors using a single plane continuous absorbing surface.

---

#### 1. Introduction

Nous recherchons, dans le présent article, quelle géométrie des surfaces absorbantes des capteurs solaires semble la mieux adaptée pour permettre le meilleur rendement thermique sans introduire de grandes pertes de charge. Notre but est la construction de capteurs solaires destinés à fournir de l'air chaud pour les séchoirs agricoles.

Nous proposons l'emploi de surfaces absorbantes en forme de jalousie composées de deux plans de lamelles discontinus et parallèles, distants de 3 cm. Nous avons défini l'influence de la longueur d'échange des lamelles que nous avons fait varier de 1,6 cm à 52 cm et nous avons comparé les résultats expérimentaux à ceux obtenus dans le cas d'un capteur constitué par une seule surface absorbante plane de longueur d'échange 1,04 m égale à la somme de celles des lamelles.

Notre analyse théorique, confirmée par les résultats expérimentaux, révèle que les paramètres énergétiques résultant de cette construction sont meilleurs que ceux obtenus dans le cas de capteurs possédant une seule surface absorbante plane continue.

## 2. Analyse théorique du problème

Nous nous intéressons à l'écoulement longitudinal forcé de l'air sur une surface plane captante dans le cas d'un flux constant de radiations thermiques arrivant sur le capteur.

Les échanges thermiques sont fonction de l'épaisseur de la couche limite  $\delta_x$ . Dans le cas d'un écoulement laminaire ( $Re_x$  (nombre de Reynolds)  $< Re_{critique} = 8 \times 10^4$ ) [1],  $\delta_x$  s'exprime en fonction de la distance  $x$  entre le début de la surface d'échange et le point courant, par la relation:

$$\delta_x = 5x / (Re_x)^{1/2}$$

avec

$$Re_x = vx / \nu$$

$v$  = vitesse d'écoulement de l'air, et  $\nu$  = viscosité cinématique de l'air. Soit

$$\delta_x = 5(\nu/x)^{1/2} x^{1/2} \quad (2)$$

Pour une température moyenne de l'air de 30 °C,  $\nu = 16 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , et pour une vitesse d'écoulement de 0,2 m s<sup>-1</sup> qui correspond à la vitesse maximale observée pendant nos expériences,  $x$  étant au maximum égal à 1,04 m, nous obtenons dans ces conditions une valeur maximum de  $Re_x$  égale à  $1,3 \times 10^4$ , valeur très inférieure à la valeur critique  $8 \times 10^4$  définissant la limite d'un écoulement laminaire, soit  $\delta_x = 5(\nu/\nu)^{1/2} x^{1/2} = 0,045x^{1/2}$ .

Nous représentons sur la Fig. 1 la fonction  $\delta_x = f(x)$  qui traduit la diminution de la couche limite avec la longueur d'échange  $x$ ; nous notons une variation très importante pour les faibles valeurs de  $x$ .

Les échanges thermiques sont caractérisés par le nombre de Nusselt  $Nu$  qui est proportionnel au coefficient d'échange de chaleur  $h$ . Pour un point courant  $x$ :

$$Nu_x = h_x x / \lambda \quad (3)$$

$\lambda$  étant le coefficient de conductance thermique et  $h_x$  le coefficient d'échange de chaleur au point courant  $x$ .

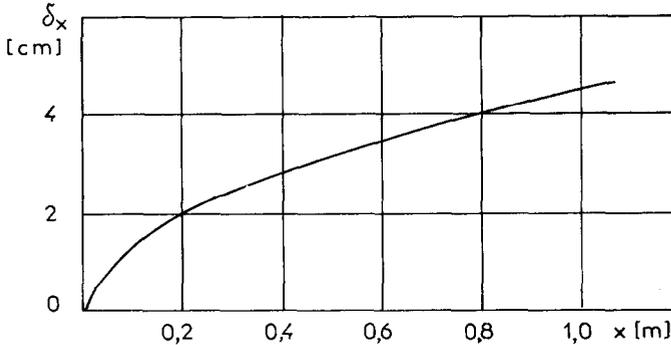


Fig. 1. Epaisseur de la couche limite  $\delta_x$  en fonction de la longueur d'échange  $x$ .  
Fig. 1. Thickness of the boundary layer as a function of the exchange length.

Dans le cas d'un écoulement laminaire sur une surface plane [2]:

$$Nu_x = 0,42(Re_x)^{1/2}(Pr)^{1/3} \quad (4)$$

Pr étant le nombre de Prandtl.

En égalisant les relations (3) et (4):

$$h_x x / \lambda = 0,42(Re_x)^{1/2}(Pr)^{1/3}$$

d'où nous tirons l'expression donnant  $h_x$ ,

$$h_x = 0,42(Re_x)^{1/2}(Pr)^{1/3}\lambda/x \quad (5)$$

Compte tenu de la relation (1), (5) peut s'écrire:

$$h_x = 2,1(Pr)^{1/3}\lambda/\delta_x \quad (6)$$

$h_x$  est donc inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche limite  $\delta_x$ .

Considérant comme précédemment une température moyenne de l'air de 30 °C, le coefficient de conductance thermique  $\lambda$  est égal à  $2,67 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  et le nombre de Prandtl Pr à 0,701. En reportant ces valeurs dans (6):

$$h_x = 4,98 \times 10^{-2} / \delta_x \quad (7)$$

Compte tenu de la Fig. 1 qui exprime la dépendance de  $\delta_x$  avec  $x$ , nous pouvons calculer  $h_x$  pour chaque valeur  $\delta_x$  et exprimer graphiquement les variations de  $h_x$  avec  $x$  (Fig. 2). Il est remarquable d'observer que le coefficient d'échange de chaleur s'accroît de façon importante pour les faibles longueurs d'échange  $x$ .

Ce résultat théorique nous a donc incités à diminuer la longueur d'échange  $x$  et à construire un capteur formé de deux plans de lamelles discontinues et parallèles,  $x$  étant la dimension de chaque lamelle dans le sens du flux d'air (Fig. 5).

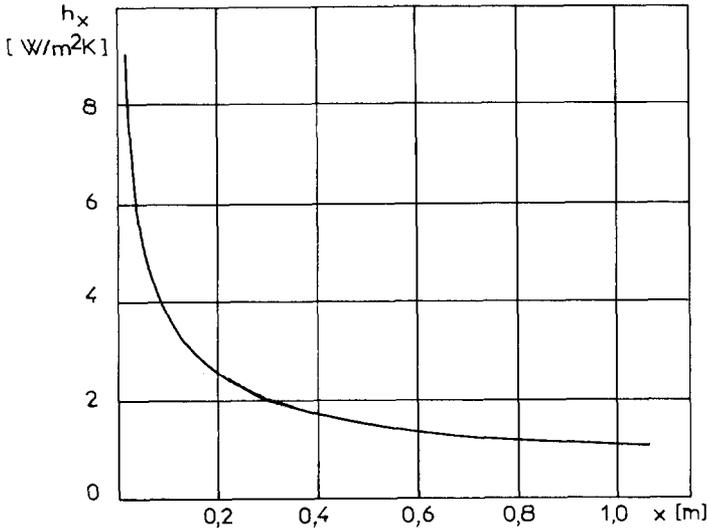


Fig. 2. Coefficient local d'échange de la chaleur par convection forcée  $h_x$  en fonction de la longueur d'échange  $x$ .

Fig. 2. Local heat exchange coefficient by forced convection  $h_x$  as a function of the exchange length.

### 3. Méthodes et techniques expérimentales

#### 3.1. Le simulateur solaire

Le simulateur solaire (Fig. 3) se compose de six lampes à halogène 1 (type LH-41) délivrant chacune une puissance électrique de 1 kW, la température maximum atteinte par le filament étant de 3200 K. Ces lampes ont une forme cylindrique, longues de 25 cm et de 1 cm de diamètre; elles sont placées dans l'axe focal, 2, de six miroirs cylindro-paraboliques, dont la surface réfléchissante est une feuille d'aluminium.

Afin d'atténuer le rayonnement infrarouge du simulateur, nous interposons entre celui-ci et le capteur un filtre optique, 5, constitué d'une vitre absorbante type Antisol N. Un système de refroidissement, 3, permet d'abaisser la température des lampes et du filtre optique.

#### 3.2. Le capteur solaire

Nous avons conçu (Fig. 4) un capteur démontable de façon à pouvoir modifier le type de surface absorbante au cours de nos recherches.

Le coffrage, 1, est en bois plaqué de 2 cm d'épaisseur, le fond et les surfaces latérales sont isolées intérieurement par une plaque de polystyrène expansé de 4 cm d'épaisseur. Deux ouvertures, 4 et 5, de 0,25 m  $\times$  0,06 m sont réalisées dans deux surfaces latérales opposées afin de permettre le passage du flux d'air à travers le capteur; elles définissent la section du flux d'air (Fig. 4).

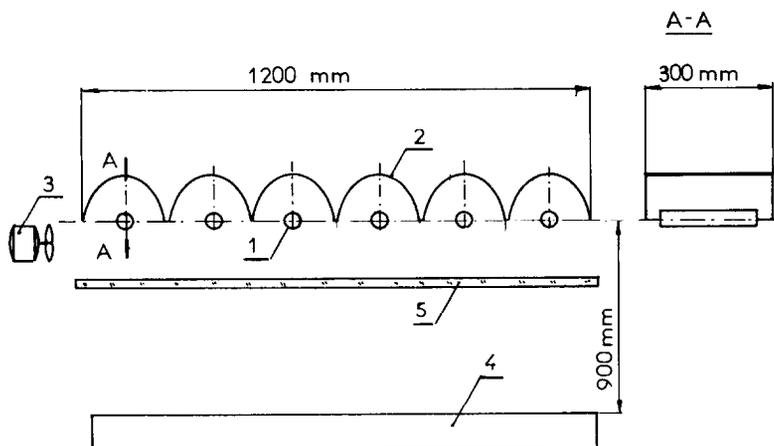


Fig. 3. Schéma du simulateur solaire: 1, lampe halogène; 2, miroir; 3, ventilateur; 4, capteur, 5, filtre.

Fig. 3. Solar simulator diagram.

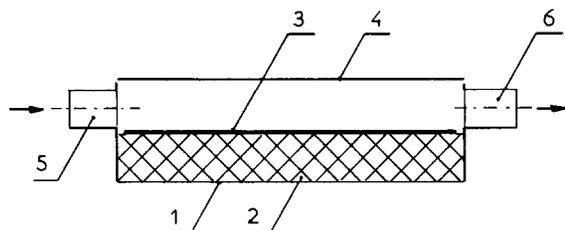


Fig. 4. Principe de la construction de capteur solaire à air: 1, support; 2, isolation thermique; 3, absorbeur; 4, vitre; 5, entrée de l'air; 6, sortie de l'air.

Fig. 4. Principle of the air solar collector structure.

Le coffrage est enfin fermé par une vitre, 3, en polyester de  $1,04 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 2 \text{ mm}$  dont le coefficient de transmission est égal à 0,9.

L'absorbeur, 2, réalisé en aluminium de 0,3 mm d'épaisseur recouvert d'une peinture mate noire, possède un coefficient d'absorption égal à 0,95 déterminé avec un réflectomètre de type RM-1.

Nous avons étudié l'influence d'un absorbeur constitué soit d'une seule plaque soit de deux couches de lamelles distantes de 3 cm (Fig. 5). La longueur d'échange des lamelles exprimée en mètres a été fixée successivement à 1,04, 0,520, 0,260, 0,130, 0,065, 0,032 et 0,016, afin de suivre l'influence de ce paramètre et de confirmer ou d'infirmer le résultat théorique du §2. Le nombre des lamelles est choisi de façon à ce que la longueur d'échange totale soit de 1,04 m.

### 3.3. Appareillage expérimental

L'appareillage expérimental est décrit sur la Fig. 6.

Le simulateur solaire, 2, est alimenté par un autotransformateur variable, 1, qui permet de modifier la puissance du rayonnement.

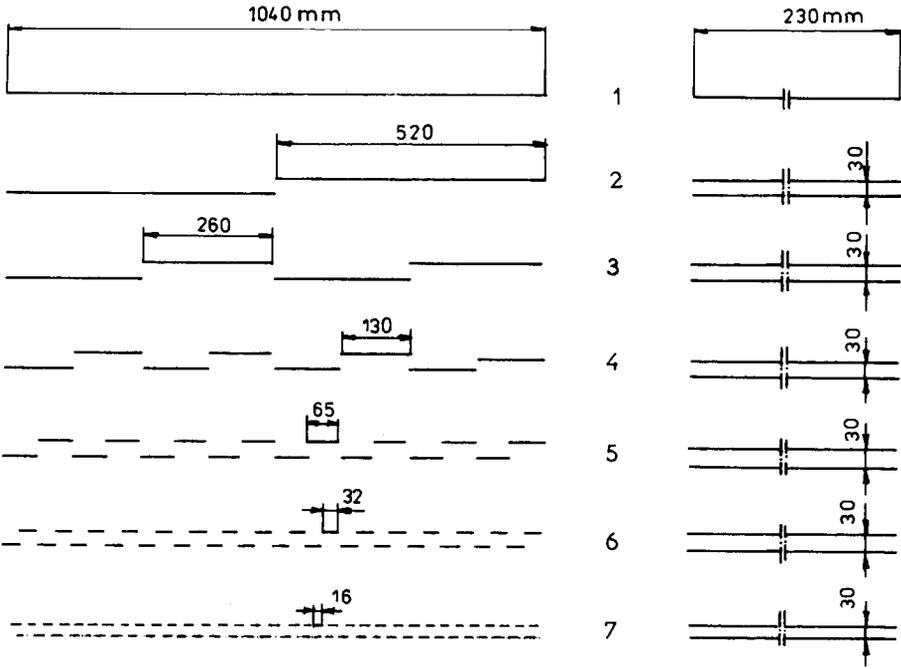


Fig. 5. Schéma des surfaces absorbantes: 1, surface formée par un seul plan; 2 - 7, surfaces en forme de jalousie.

Fig. 5. Diagram of absorbing surfaces.

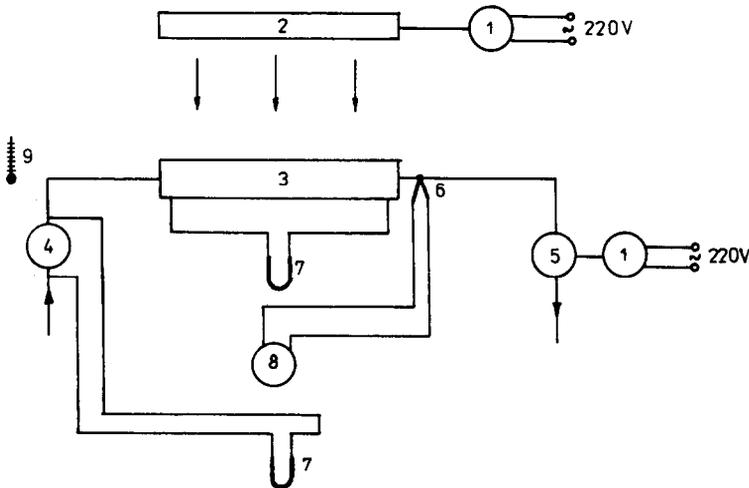


Fig. 6. Schéma de système de mesures: 1, autotransformateur; 2, simulateur solaire; 3, capteur solaire; 4, diaphragme; 5, ventilateur; 6, thermocouple; 7, mamomètre; 8, enregistreur; 9, thermomètre.

Fig. 6. Diagram of absorbing surfaces.

Nos résultats sont relatifs à une puissance du rayonnement maintenue constante et égale à  $600 \text{ W m}^{-2}$  mesurée avec un pyranomètre Kipp, soit une puissance  $J = 150 \text{ W}$  pour la surface utile du capteur.

L'écoulement de l'air est réalisé par un ventilateur, 5 (aspirateur), alimenté par un autotransformateur variable, 1, pour permettre de faire varier le flux volumique de l'air de  $0,001$  à  $0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  environ, ces valeurs étant communément admises dans ce genre de recherche [3]. La détermination du flux volumique est effectuée au moyen d'un diaphragme, 4, type KII d11/022/4/PN-65/M-53950 et d'un manomètre hydrostatique, 7, type MPR-4 étalonnés. Le même type de manomètre est utilisé pour déterminer les pertes de charge dans le capteur, 3.

Un thermocouple Fe/Co, 6, nous renseigne sur la température  $T_s$  de l'air à la sortie du capteur; elle est mesurée sur un enregistreur de type TZ-21. Un thermomètre à mercure, 9, indique la température ambiante que nous avons observée constante et égale à  $T_a = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant les mesures.

#### 4. Traitement mathématique des données

Les mesures expérimentales nous donnent l'accroissement de la température de l'air  $\Delta T = T_s - T_a$ , ainsi que les pertes de charge  $\Delta P$  et le flux volumique  $V$ .

La puissance utile  $Q$  se calcule par la relation:

$$Q = V\rho c \Delta T$$

$\rho$  étant la densité de l'air et  $c$  sa chaleur spécifique. Nous avons retenu pour  $\rho$  et  $c$  les valeurs correspondant à la température moyenne  $(T_s + T_a)/2$ .

Le facteur énergétique  $E$  s'exprime comme le rapport de la puissance utile  $Q$  à la perte de puissance correspondant à  $\Delta P$ :

$$E = Q/V \Delta P$$

et le rendement thermique:

$$\eta = Q/J$$

#### 5. Résultats expérimentaux

##### 5.1. Influence du flux volumique $V$

###### 5.1.1. L'accroissement de température $\Delta T$ de l'air

La Fig. 7 précise l'augmentation de température  $\Delta T$  pour diverses longueurs d'échange des lamelles constituant le capteur.

Nous observons dans tous les cas un accroissement linéaire de température  $\Delta T$  lorsque le flux volumique diminue;  $\Delta T$  est de l'ordre de  $10 \text{ K}$  lorsque le flux volumique passe de  $0,003$  à  $0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

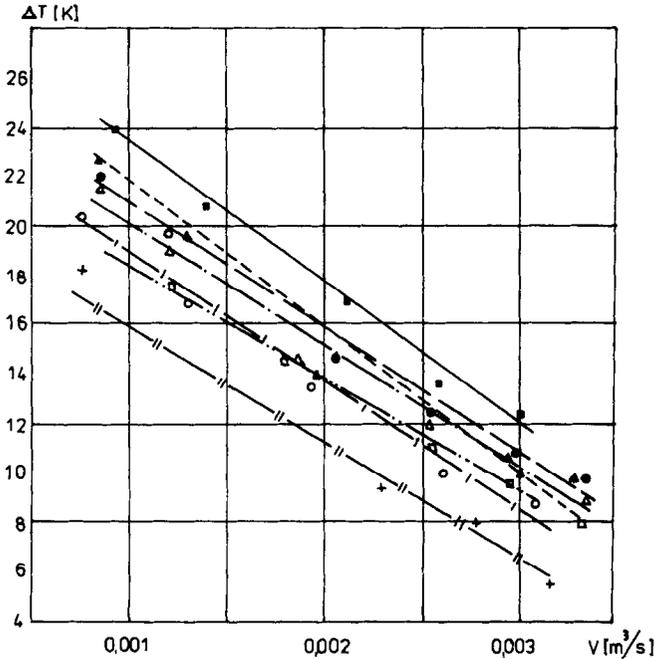


Fig. 7. Accroissement de la température  $\Delta T$  en fonction du flux volumique  $V$ . — || —, +,  $x = 1,040$  m; — | —, o,  $x = 0,520$  m; - · - ·, □,  $x = 0,260$  m; - · - ·, △,  $x = 0,130$  m; - - - , ●,  $x = 0,065$  m; — — , ■,  $x = 0,032$  m; - · - ·, ▲,  $x = 0,016$  m.

Fig. 7. Temperature increase  $\Delta T$  versus flux volume  $V$ .

### 5.1.2. La puissance utile $Q$

Les résultats expérimentaux sont résumés sur la Fig. 8. Pour tous les types de capteurs, la puissance utile  $Q$  augmente avec le flux volumique  $V$  et tend vers une limite pour les fortes valeurs de  $V$ .

### 5.1.3. Les pertes de charge $\Delta P$

Nous observons sur la Fig. 9 une augmentation des pertes de charge  $\Delta P$  avec le flux volumique  $V$ . L'accroissement de  $\Delta P$  est d'autant plus important que le flux volumique est élevé.

## 5.2. Influence de la longueur d'échange $x$ des lamelles constituant le capteur

### 5.2.1. L'accroissement de température $\Delta T$ de l'air

Nous notons, sur la Fig. 10, déduite des résultats de la Fig. 7, établie pour différentes valeurs de  $x$ , une augmentation de  $\Delta T$  lorsque diminue la longueur d'échange  $x$  et ce quel que soit le flux volumique.

### 5.2.2. La puissance utile $Q$

Nous représentons de même sur la Fig. 11 les variations de  $Q$  en fonction de  $x$  à partir de la Fig. 8. Il est observé pour un flux volumique

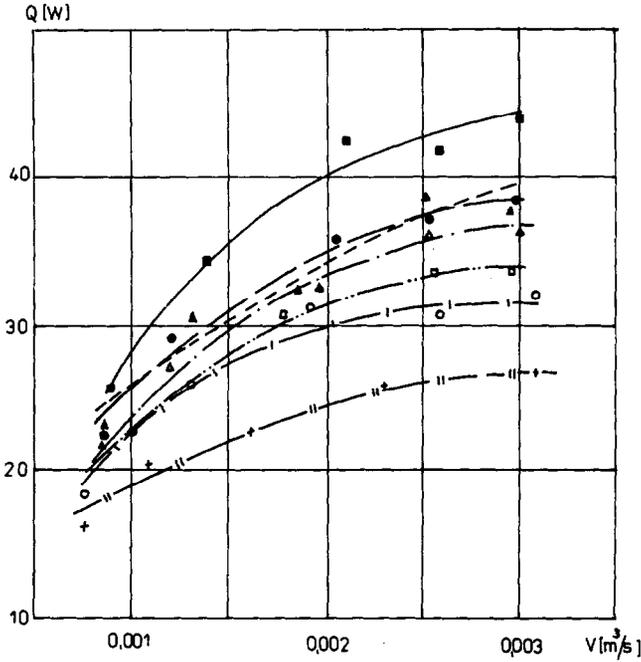


Fig. 8. Puissance utile  $Q$  en fonction du flux volumique  $V$  (notations comme sur la Fig. 7).

Fig. 8. Useful power  $Q$  versus flux volume  $V$ .

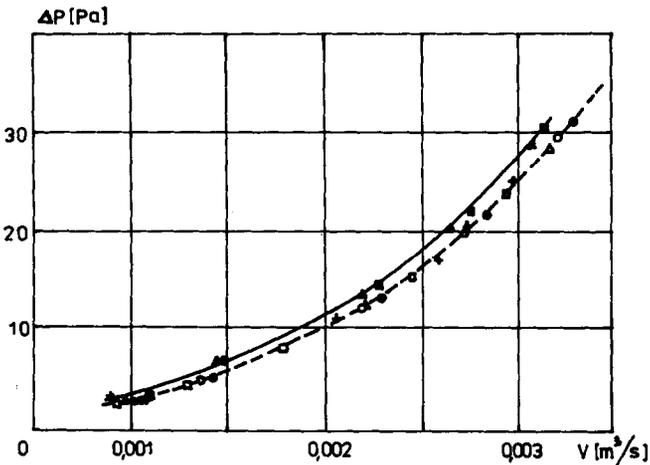


Fig. 9. Pertes de charge  $\Delta P$  en fonction du flux volumique  $V$  (notations comme sur la Fig. 7).

Fig. 9. Charge losses  $\Delta P$  versus  $V$ .

$V$  donné, un accroissement de la puissance utile lorsque diminue la longueur d'échange, et cet accroissement est d'autant plus rapide que  $V$  est grand.

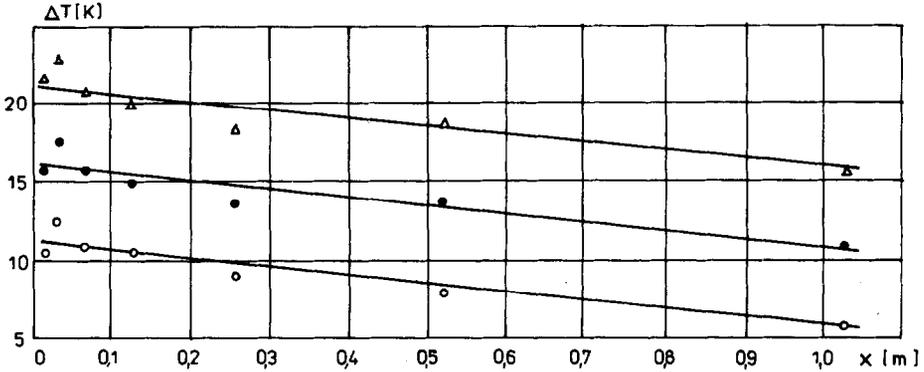


Fig. 10. Accroissement de la température  $\Delta T$  en fonction de la longueur  $x$  des lamelles.  $\Delta$ ,  $V = 0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $\bullet$ ,  $V = 0,002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $\circ$ ,  $V = 0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Fig. 10. Temperature increase  $\Delta T$  versus lamella length  $x$ .

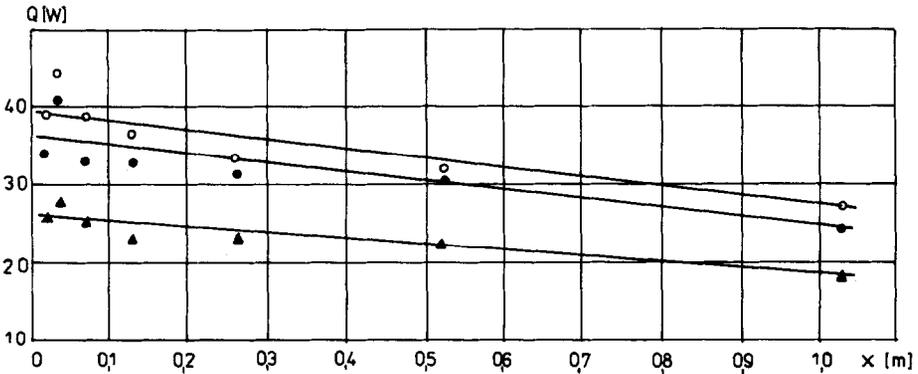


Fig. 11. Puissance utile  $Q$  en fonction de la longueur  $x$  des lamelles (notations comme sur la Fig. 10).

Fig. 11. Useful power  $Q$  versus lamella length  $x$ .

### 5.2.3. Les pertes de charges $\Delta P$

Pour les différentes valeurs de flux volumique étudié, il apparaît sur la Fig. 12 que les pertes de charge sont insensibles à la longueur d'échange  $x$  pour des valeurs de  $0,065 \text{ m} < x < 1 \text{ m}$ . Une légère augmentation de  $\Delta P$  est observée pour  $x < 0,065 \text{ m}$ .

### 5.2.4. Le facteur énergétique $E$

Nous représentons (Fig. 13) pour trois flux volumiques différents, le coefficient énergétique  $E$ .  $E$  s'accroît lorsque la longueur d'échange diminue et d'autant plus que le flux volumique est faible, mais seulement jusqu'à  $x \cong 0,05 \text{ m}$ ; pour des valeurs de  $x$  plus faibles, le facteur  $E$  diminue, en raison de l'augmentation des pertes de charge.

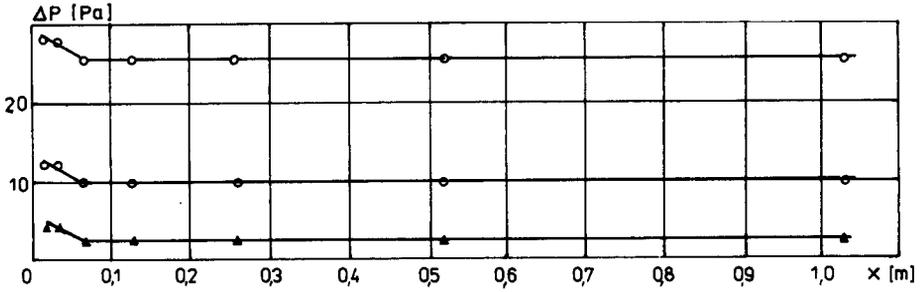


Fig. 12. Pertes de charges  $\Delta P$  en fonction de la longueur  $x$  des lamelles (notations comme sur la Fig. 10).

Fig. 12. Charge losses  $\Delta P$  versus lamella length  $x$ .

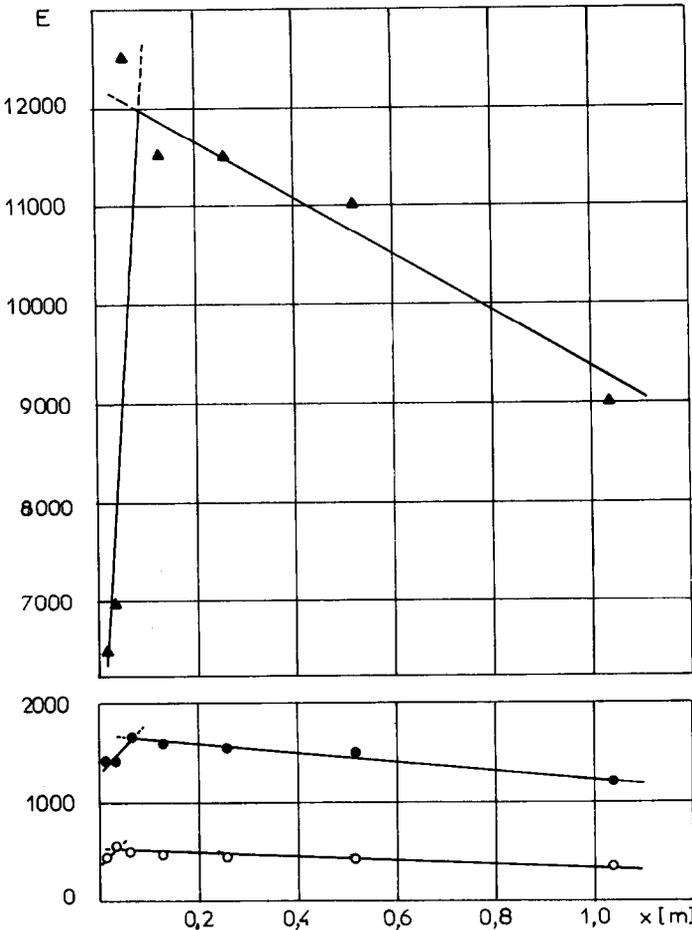


Fig. 13. Facteur énergétique  $E$  en fonction de la longueur  $x$  des lamelles (notation comme sur la Fig. 10).

Fig. 13. Energy factor  $E$  versus  $x$ .

## 6. Discussion des résultats et conclusion

Les résultats expérimentaux confirment notre hypothèse théorique (§2) concernant les avantages apportés par une faible longueur d'échange  $x$  de la chaleur.

En effet, lorsque la longueur des lamelles constituant le capteur (longueur d'échange) diminue, toutes les caractéristiques thermiques principales du capteur sont améliorées:

- accroissement de la température  $\Delta T$  (Fig. 10);
- puissance utile  $Q$  (Fig. 11), et en conséquence le rendement  $\eta$ .

En ce qui concerne les pertes de charge  $\Delta P$  (Fig. 12), nous avons observé que la longueur d'échange  $x$  est pratiquement sans influence. Cependant, les très faibles valeurs de  $x$  provoquent une légère augmentation de  $\Delta P$ , le facteur énergétique  $E = Q/V \Delta P$  diminue quel que soit le flux volumique  $V$  (Fig. 13).

Comme conséquence de nos expériences et dans la perspective d'une utilisation agricole du capteur, nous pouvons considérer comme solution optimale des lamelles de longueur  $x \cong 0,10$  m et un flux volumique  $V$  à  $0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour lequel nous obtenons un accroissement de température  $\Delta T \cong 11$  K (Fig. 10) suffisant pour sécher les produits agricoles.

Nous résumons les résultats expérimentaux relatifs à cette réalisation en les comparant à ceux obtenus pour un capteur plan (Tableau 1):

le capteur en forme de jalousie nous permet de gagner environ 5 K sur l'accroissement de température  $\Delta T$ , 11 W  $\text{m}^{-2}$  sur la puissance utile  $Q$ , soit 7% sur le rendement  $\eta$ ;

- le facteur énergétique  $E$  est multiplié par 1,4;
- les pertes de charges  $\Delta P$  restent sensiblement les mêmes.

TABLEAU 1

Comparaison des résultats obtenus pour le capteur avec la surface absorbante un seul plan et avec la surface absorbante en forme de jalousie ( $x = 0,1$  m;  $V = 0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )  
(Comparison of the results obtained with a single plane collector and with a venetian blind collector)

	Capteur en forme de jalousie	Capteur un seul plan	Augmentation
Accroissement de la température $\Delta T$ (K)	11	6	5
Puissance utile $Q$ (W)	38	27	11
Rendement $\eta$ (%)	25	18	7
Pertes de charge $\Delta P$ (Pa)	25	25	0
Facteur énergétique $E$	500	360	140

## Nomenclature

$c$	chaleur spécifique, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$E$	facteur énergétique
$h$	coefficient d'échange de chaleur, $\text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$J$	puissance du rayonnement, W
Nu	nombre de Nusselt
$\Delta P$	pertes de charge, Pa
Pr	nombre de Prandtl
$Q$	puissance utile, W
Re	nombre de Reynolds
$T$	température, K
$\Delta T$	accroissement de la température, K
$v$	vitesse d'écoulement de l'air, $\text{m s}^{-1}$
$V$	flux volumique de l'air, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$x$	longueur d'échange de chaleur, m
$\delta$	épaisseur de la couche limite, cm
$\eta$	rendement thermique
$\lambda$	conductivité thermique, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\nu$	viscosité cinématique, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

## Indices

e	entrée de l'air
s	sortie de l'air
x	distance du point courant sur la longueur d'échange de la chaleur

## Références

- 1 *Initiation au Transferts Thermiques*, Technique et Documentation, Paris, 1982, p. 223.
- 2 B. Staniszewski, *Echange de Chaleur*, Edition Nationale Scientifique, Varsovie, 1980, p. 265.
- 3 Development of a solar air heater, *Final Report - Phase 1*, Waterloo Res. Inst. Rep. No. 77-04, May 1977, pp. 16, 99.