

ETUDE EXPÉRIMENTALE DE CAPTEURS SOLAIRES À AIR: LE SÉCHAGE DE LA FIGUE.

A. ABENE, V. DUBOIS, A. OUAGUED, M. SI-YOUCHEF, M. LERAY

Laboratoire d'Aérodynamique, d'Energétique et de l'Environnement,
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,
Le Mont Houy, B.P. 311 - 59304 Valenciennes, France

Résumé

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques réalisés avec l'air dans la veine dynamique du capteur solaire. Ces échanges ne permettent pas d'obtenir de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique de ces systèmes. Par contre, l'introduction de chicanes (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de ces systèmes améliore nettement les transferts thermiques. L'étude expérimentale menée consiste en la simulation de cette énergie solaire. Le but recherché est d'améliorer le couple Température-Rendement du capteur solaire plan à air et d'appliquer ce dernier pour l'amélioration du temps de séchage de la figue.

Mots clés: énergie solaire, simulation, capteurs solaires plans à écoulement d'air, effets des obstacles dans la veine d'écoulement, couple température-rendement du capteur solaire, séchage, figue.

Experimental Study of Air Solar Collectors: drying of the fig.

Abstract

One of the essential problems concerning the use of solar energy is the small thermal exchange realized with the air in the dynamic vein of the solar collector. These exchange does not allow the best performance or the best thermal efficiency of these systems. On the other hand, the introduction of obstacles arranged in rows in the ducts of these systems improves clearly the thermal transfer. The experimental study consists of the simulation of this solar energy, the aim is to improve the couple Temperature-Output of the air plan solar collector and to apply the later for the improvement of drying time of figs.

Keywords: solar energy, simulation, air flow solar plans collectors, effects of obstacles in the vein, solar collector couple temperature-output, drying, fig.

Nomenclature

- A_c : surface active du capteur solaire plan [m²]
 b : largeur des chicanes à la base
 b' : coefficient de blocage
 C_p : capacité thermique de l'air [J/Kg.K]
 d : distance entre l'absorbeur et la couverture ou l'isolant
 E : espace longitudinal entre rangées de chicanes
 E' : espace transversale entre deux chicanes de la même rangée
 h : hauteur initiale des chicanes
 h_1 : hauteur de la pointe des chicanes par rapport à l'isolant
 h_{cfd} : coefficient d'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbeur [W/K.m²]
 I_{GS} : flux solaire horaire global de simulation [W/m²]
 K_a, K_{is} : conductivité thermique de l'absorbeur et de l'isolant [W/m.K]
 L : longueur du lieu [degrés]
 Z : altitude du lieu [Km]
 l : largeur de la veine [m]
 m_e : vitesse de séchage [Kge/s]
 N_{cr}, N_r : nombre de chicanes par rangée et nombre de rangées
 P_{mc} : puissance mécanique consommée du ventilateur [W]
 $P_o, P(Z)$: pression atm au niveau de la mer (10.13 10⁵ Pa) et à l'altitude Z du lieu [Pa]
 Q_{va} : débit volumique de l'air dans le capteur [m³/h]
 Q_v : débit volumique de l'air par unité de surface [m³/h.m²]
 Q_u : quantité de chaleur utile à la sortie du capteur [MJ]
 Q_s : quantité de chaleur de séchage du produit [MJ]
 r : rayon de cintrage des chicanes
 Re : nombre de Reynolds
 S_{mini} : section de passage minimale de l'air dans la veine [m²]
 T_{sv}, T_a : température à la sortie du ventilateur et de l'air ambiant [°C]

T_e, T_{SC} : température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur [°C]
 T_{Pr} : température au niveau de la surface du produit [°C]
 V_m : vitesse maximale de l'écoulement de l'air dans la veine [m/s]
 X_{bs} : teneur en eau à base sèche du produit [Kge/KgMS]
 X_{obs}, X_{ibs} : teneur en eau initiale et finale à base sèche [Kge/KgMS]

Lettres grecques

α : angle d'inclinaison du capteur par rapport au sol [degrés]
 β : angle d'apex (ou au sommet) des chicanes [degrés]
 ε_c : coefficient d'émissivité de la couverture
 φ : latitude du lieu [degrés]
 ν : viscosité cinématique de l'air [m²/s]
 ρ_0, ρ : masse volumique de l'air au niveau de la mer et à l'altitude Z du lieu [Kg/m³]
 η, η_t : rendement du capteur solaire plan et rendement thermique du système de séchage [%]
 τ_c : coefficient de transmission de la couverture
 ζ : facteur de friction caractérisant les rugosités artificielles (obstacles)
 Δi : angle de cintrage des chicanes [degrés]
 ΔM : perte de masse du produit [%]
 ΔP : pertes de charge dans la veine du capteur [Pa]
 ΔQ : quantité de chaleur excédentaire [MJ]

Notations

DCL1, OCL1 : Forme des chicanes dans la veine d'air mobile: Delta et Ogivales Cintrées Longitudinalement avec l'écoulement attaquant par la pointe
 SC, TL : Sans Chicanes et chicanes Transversales-Longitudinales
 η_S : Rendement du capteur SC
 η_D : Rendement du capteur muni de chicanes DCL1
 η_{TL} : Rendement du capteur muni de chicanes TL
 $X_{bs, TL13}$: Teneur en eau à base sèche dans le cas du capteur muni de chicanes TL, au niveau de la 1^{ère} claie, utilisant le débit de 31.3 m³/h.m²
 $\Delta MD13$: Perte de masse du produit dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1, au niveau de la 1^{ère} claie, utilisant le

débit de 31.3 m³/h.m²
 $T_{pr, S17}$: Température du produit dans le cas du capteur SC, au niveau de la 1^{ère} claie, utilisant le débit de 70 m³/h.m².
 $m_e, D47$: Vitesse de séchage dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1, au niveau de la 4^{ème} claie, utilisant le débit de 70 m³/h.m²
 $Q_u, S3$: Quantité de chaleur utile, dans le cas du capteur SC, utilisant le débit de 31.3 m³/h.m²
 $Q_s, D7$: Quantité de chaleur de séchage, dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1, utilisant le débit de 70 m³/h.m².

Introduction

L'amélioration des performances des capteurs solaires consistait à limiter les déperditions thermiques entre l'absorbeur et l'ambiance avec un choix judicieux des composants des capteurs. Ces derniers temps, l'optimisation des performances porte plus particulièrement sur la circulation du fluide caloporteur. Plusieurs méthodes ont traité de ce problème. Zugary et Vullière [1] ont proposé de limiter les pertes vers l'avant du capteur. D'autres auteurs [2,3] se sont intéressés plus particulièrement à l'absorbeur (partie active du capteur). Enfin, l'introduction des obstacles dans la veine d'air dynamique du capteur permet d'obtenir un écoulement turbulent qui favorise l'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbeur [2-8].

L'adjonction de chicanes nécessite un choix judicieux du mode de fixation. Cette dernière peut se faire soit sur l'isolant, soit sous l'absorbeur soit par la combinaison des deux. Dans tous les cas, les résultats sont améliorés à cause de la réduction du diamètre hydraulique (D_h) par comparaison au capteur solaire sans chicanes. Dans la veine d'écoulement de l'air, le nombre de Reynolds est calculé à partir de la vitesse maximale (V_m) correspondant au minimum de la section de passage (S_{min}) et il s'exprime par:

$$Re = \frac{V_m \cdot D_h}{\nu} = \frac{Q_v \cdot D_h}{\nu \cdot S_{min}} \text{ avec } D_h = \frac{2dl}{d+l}$$

Ayant $d \ll l \Rightarrow d+l \approx l$ alors $D_h = 2d$

$$\text{En posant } b' = 1 - \frac{S_{min}}{dl} \text{ on a } Re = \frac{2Q_v}{\nu \cdot l \cdot (1-b')} \quad (1)$$

D_h : diamètre hydraulique du conduit.

b' : coefficient de blocage dans la veine d'air.

Le coefficient d'échange thermique convectif h_{ccf} entre l'absorbeur et le fluide caloporteur dépend du nombre de Reynolds ; il est une fonction croissante de Re , sinon h n'augmente pas. On déduit que, lorsque b' augmente, Re et, par conséquent, h_{ccf} augmente. La section minimale de passage (S_{min}) est fonction de la forme des chicanes, de leurs dimensions et de leur disposition les unes par rapport aux autres. En outre, nous distinguons trois cas possibles pour la fixation de ces chicanes :

- les chicanes sont fixées sur l'isolant. en fonction de la forme choisie, l'écoulement est perturbé et l'éclatement des tourbillons a lieu très près de l'absorbeur. l'air est orienté vers ce dernier et l'échange de chaleur se trouve amélioré.
- les chicanes sont fixées sous l'absorbeur. en plus de l'effet aéroulrique, celles-ci ont un effet d'ailettes, ce qui signifie que la surface d'échange thermique de l'absorbeur augmente et ce qui contribue aussi à l'amélioration du rendement du capteur. Pour certaines des formes déjà étudiées [2], les résultats obtenus montrent qu'à faible débit le rendement augmente, par contre, pour les débits supérieurs à une certaine valeur donnée il y a plutôt une baisse du rendement. A grands débits, l'écoulement est beaucoup plus perturbé du côté de l'isolant. avec cette configuration les résultats sont moins intéressants. En effet, à l'extrémité des ailettes la température de l'air est plus faible que celle de l'absorbeur.
- Pour apporter des améliorations à cette deuxième solution certaines chicanes intermédiaires peuvent être fixées sur l'isolant pour renvoyer l'air vers l'absorbeur [2]. Dans ce cas, les pertes de charge dans le capteur sont plus élevées et l'inertie thermique de ce dernier augmente.

Pour ces différentes raisons nous avons opté pour la fixation des chicanes sur l'isolant.

Le choix de la forme géométrique utilisée doit satisfaire certains critères. En effet, la forme et la disposition des chicanes influent sur l'écoulement de l'air durant sa trajectoire. Les chicanes assurent une bonne irrigation de l'absorbeur, réduisent les zones mortes, créent la turbulence et rallongent le parcours de l'air en augmentant le séjour de ce dernier dans le capteur. Nous avons entamé l'étude minutieuse et systématique de plusieurs configurations différentes de veines d'écoulement dans les capteurs solaires.

Dans la première partie de cet article, nous présentons une comparaison des résultats obtenus d'abord avec le capteur plan solaire sans chicanes (SC), puis avec le capteur muni de chicanes. Les deux types de chicanes choisis sont de la forme Delta Cintrée Longitudinalement (DCL1), puis Ogivale Cintrée Longitudinalement (OCL1). Dans la deuxième partie, nous présentons les résultats issus de l'application du capteur sans chicanes, puis muni de chicanes DCL1 pour le séchage de l'oignon. Par ailleurs, pour mettre davantage en évidence l'intérêt des obstacles, nous avons procédé au séchage du produit en utilisant le capteur muni de chicanes Transversales-Longitudinales (TL) du même type que celles déjà étudiées [4].

La comparaison des résultats obtenus montre que le capteur muni de chicanes est bien meilleur que celui sans chicanes.

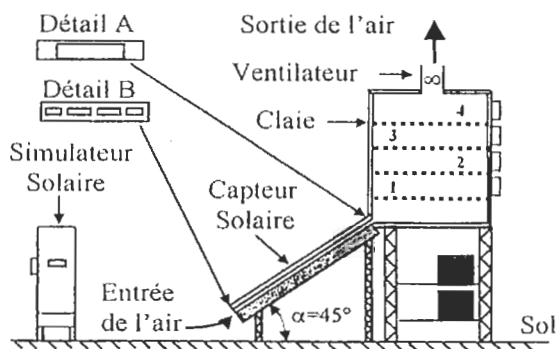


Figure 1. Dispositif expérimental

1. Dispositif expérimental

Le capteur solaire à simple passage d'air (Fig.2) est constitué de :

- une couverture en polycarbonate de 1 cm d'épaisseur, alvéolée et transparente. Les coefficients de transmission (τ_c) et d'émissivité (ε_c) sont respectivement de 83% et 90% pour des longueurs d'onde différentes.
- un absorbeur en tôle d'aluminium de 0,4mm d'épaisseur et peinte en noir mat du côté de l'insolation. Les coefficients d'absorption (α_a) et de conductivité thermique (K_a) sont de respectivement de 95% et 205W/m.K. La distance (d) de part et d'autre de l'absorbeur est de 0,025 m.
- un isolant en polystyrène de 5 cm d'épaisseur pouvant résister à des températures supérieures à 90°C. Son coefficient de conductivité thermique (K_s) est égale à 0.04 W/m.K.

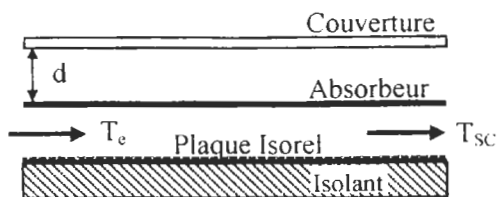


Figure 2. Capteur solaire plan à air sans chicanes.

Aussi, la forme de l'entrée (détails A) et de la sortie (détails B) du capteur doit être bien choisie afin d'éviter les zones mortes dans ce dernier. Les chicanes sont fixées sur une plaque d'isorel déposée juste au-dessus de la plaque de polystyrène.

Les expérimentations ont eu lieu sur le site de la ville de Valenciennes (Nord de la France):

latitude: $\varphi = 50.3^\circ$
 altitude: $Z = 60$ m
 longitude: $L = 3.5^\circ$

Nous avons considéré la journée caractéristique du mois de juillet dont la valeur moyenne du flux solaire horaire (Fig.3) correspond à la moyenne des années 1993, 94 et 95 [9].

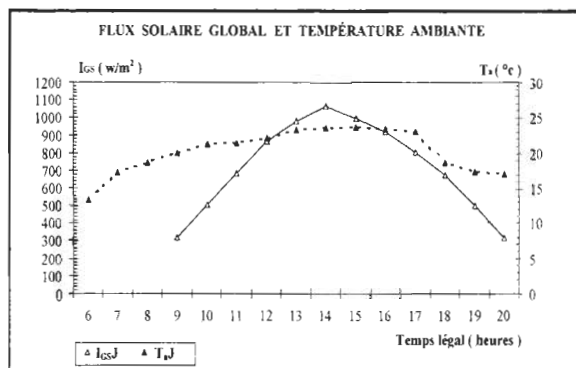


Figure 3. Variation de la température ambiante et du flux solaire durant la journée caractéristique du mois de juillet, moyenne des années 1993, 1994 et 1995, Ville de Valenciennes.

—▲— flux solaire; —▲— température ambiante

2. Résultats et discussions

2.1 Amélioration du couple Température - Rendement

Afin d'extraire le maximum de chaleur emmagasinée dans l'absorbeur, la solution appropriée est d'introduire des chicanes dans la veine d'air mobile. Ces obstacles peuvent être fixés soit sur la face intérieure à l'absorbeur, soit sur l'isolant ou

par la combinaison des deux. L'objectif est d'augmenter davantage la température de sortie (T_{sc}) du capteur donc de son rendement avec le minimum de pertes de charge [2-4, 6-8].

Nous présentons les résultats obtenus avec le capteur plan à air d'une part sans chicanes et, d'autre part muni de chicanes DCL1 puis OCL1 (Photos 1 et 2). Ces chicanes sélectionnées parmi l'ensemble des formes de déjà utilisées [10] sont construites par cintrage des ailes delta et ogivales droites (Fig.5a et 5b) [10-12] et fixées sur l'isolant (Fig. 4). L'angle d'apex de ces chicanes est pris égal à 45° (*Angle Privilégié*) [13].



Photo 1: Présentation des chicanes du type DCL1.

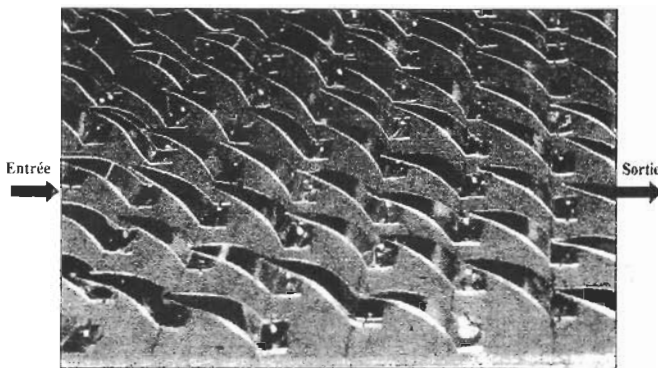


Photo 2: Présentation des chicanes du type OCL1.

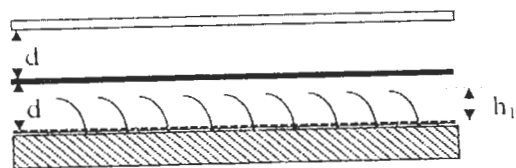


Figure 4. Capteur solaire muni de chicanes.

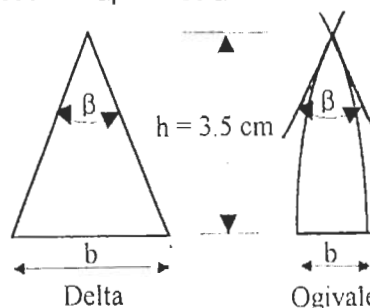


Figure 5a. Présentation des chicanes Delta et Ogivale, avant cintrage.

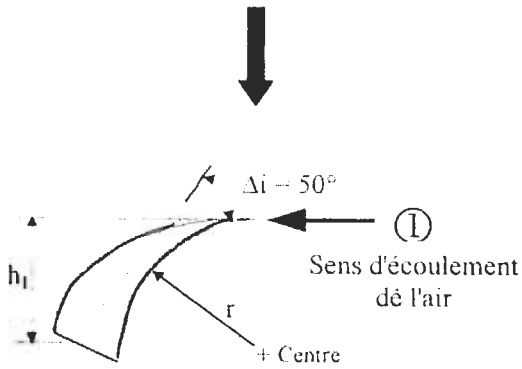


Figure 5b. Présentation des chicanes Delta et Ogivale, après cintrage.

L'indice (1) dans l'appellation des chicanes DCL1 et OCL1 indique que l'écoulement de l'air se fait du côté de la pointe (Fig.5b).

Les expériences effectuées en soufflerie [14] ont montré que l'augmentation de l'incidence permet d'avoir une progression continue de l'éclatement tourbillonnaire sur l'extrados de l'aile cintrée. L'écoulement se termine par une désorganisation totale des systèmes tourbillonnaires au bord de fuite de l'aile, ce qui favorise la création d'un écoulement de grande

turbulence et, en conséquence, un meilleur échange thermique convectif améliorant le couple Température-Rendement. L'éclatement total des tourbillons a lieu pour une incidence supérieure à 65°. La nature de l'écoulement obtenue lors des visualisations en soufflerie est mise en évidence (Photos 3a et 3b). D'autres visualisations ont confirmé ces différentes observations concernant l'éclatement progressif des tourbillons sur d'autres formes d'ailes [15].

	DCL1	OCL1
β	45°	45°
H_i (cm)	1.47	1.47
E_t (cm)	2.3	2.0
E_z (cm)	3.5	3.5
b (cm)	3.0	1.4
r (cm)	4.0	4.0
N_{cr}	15	22
N_r	44	44

Tableau 1. Caractéristiques des chicanes DCL1 et OCL1.

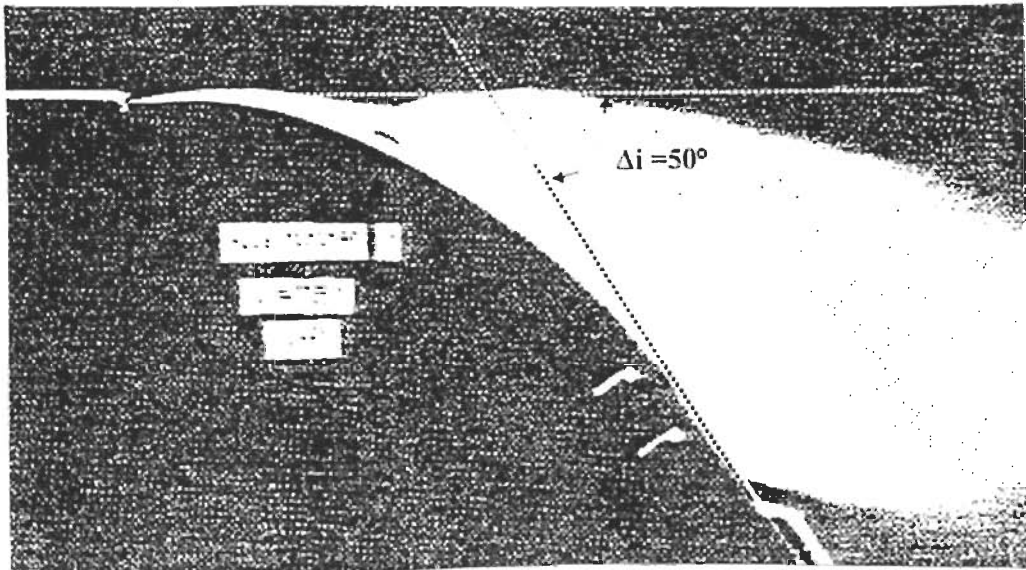


Photo 3a. Visualisation de l'écoulement à l'extrados de l'aile cintrée, vue de profil.

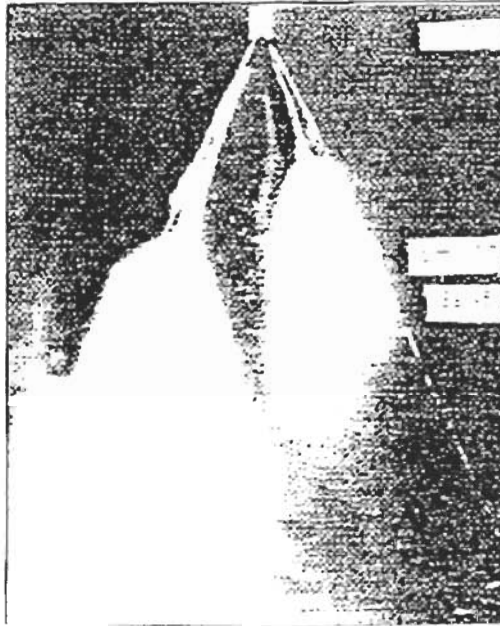


Photo 3b. Visualisation de l'écoulement à l'extrados de la chicane Delta Cintrée Longitudinalement pour une incidence i de 60° , vue de dessus.

Avant d'exposer les résultats obtenus dans cette première partie, nous présentons l'expression utilisée pour le calcul du rendement. Il s'agit du modèle de Letz [16]. Ce dernier est l'un des plus récent et le plus complet, car il tient compte non seulement de l'humidité relative de l'air et du débit de fuite d'air entrant dans le capteur par aspiration du ventilateur mais aussi des températures d'entrée et de sortie de ce dernier. Après bilan enthalpique des différents noeuds choisis par l'auteur, le rendement (η) est donné par :

$$\eta = \frac{\rho \cdot C_p \cdot Q_{V_a} \cdot (T_{sc} - T_e)}{I_{GS} \cdot A_c} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\rho \cdot C_p \cdot Q_v \cdot (T_{sc} - T_e)}{I_{GS}} \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + T_{SV}} \frac{P(Z)}{P_0} \quad (4)$$

avec $P(Z) / P_0 = (0.88)^Z$ et pour Valenciennes $P(Z) / P_0 \approx 1$
 $\rho_0 = 1.293 \text{ Kg/m}^3$ et $C_p = 1005 \text{ J/Kg.K}$.

La surface captive A_c est de 1.28 m^2 . Dans notre cas, le rendement (η) est déterminé pour le flux solaire global (I_{GS}) constant de 1063.5 W/m^2 correspondant au midi solaire.

Ainsi, pour un débit spécifique de $35 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ nous avons obtenu, dans le cas du capteur

muni de chicanes DCL1, un rendement de 55%. En augmentant le débit à $70 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, le rendement atteint la valeur de 81%. Dans le cas du capteur sans chicanes, avec ces deux débits, les rendements respectifs ne sont que de 36% et 56% (Fig.6) pour des températures de sortie (T_{sc}) de 61.7°C et 53.3°C contre 82.8°C et 66.3°C en utilisant les chicanes DCL1. Cependant, dans les mêmes conditions précédentes, avec l'introduction des chicanes OCL1, nous constatons que les résultats sont légèrement inférieurs à ceux obtenus dans le cas des chicanes DCL1. Ceci peut s'expliquer par le fait que la section de passage de l'air est différente et surtout l'éclatement progressif des tourbillons se fait un peu plus tôt avec ces dernières. En effet, pour les mêmes débits, les rendements respectifs sont de 54% et 78% et correspondent à des températures (T_{sc}) de 82.4°C et 65.9°C . Avec ces configurations utilisant les obstacles DCL1 et OCL1, le rendement de 50% est obtenu respectivement avec les débits de 32 et $33 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ contre $58 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ dans le cas du capteur SC, soient respectivement des réductions relatives de débit de 45.7% et 44.2%. Les températures respectives (T_{sc}) sont de 84.8 et 82.3°C contre 56°C . Ces dernières correspondent à des élévations ($\Delta T = T_{sc} - T_e$) respectives de 56.3 et 54.2°C contre 27.5°C . Dans tous les deux cas, les pertes de charge sont acceptables.

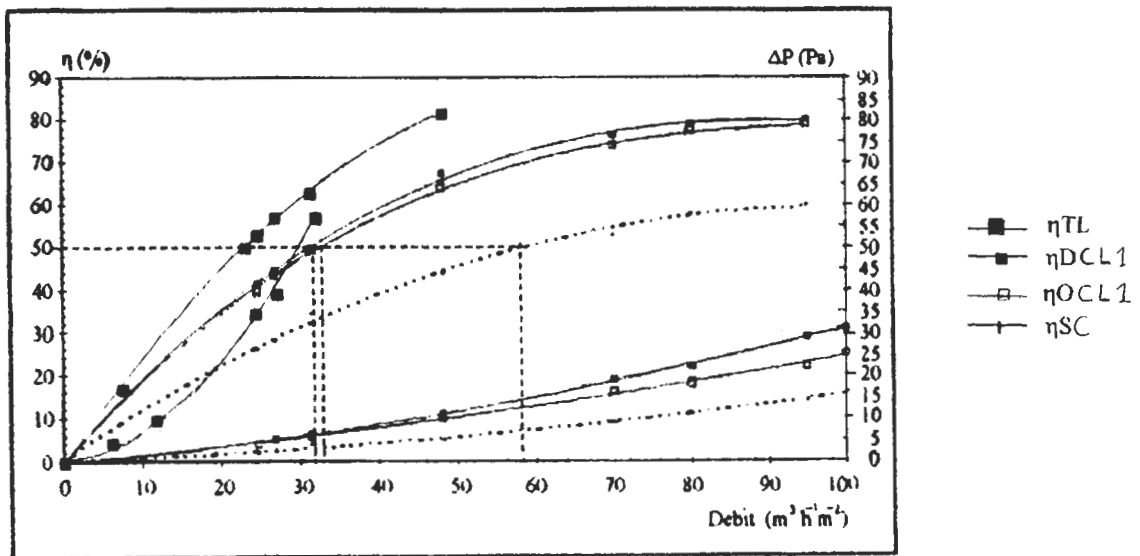


Figure 6. Evolution du rendement (avec $I_{gs}=1063.5 \text{ W/m}^2$) et des pertes de charge en fonction du débit, cas du capteur SC et du capteur muni de différents types de chicane (DCL1, OCL1 puis TL), site de Valenciennes.

Cependant, l'effet de barrage des chicane TL permet la création d'un écoulement très turbulent et, par conséquent, un très bon échange thermique. Notons que, les pertes de charges occasionnées sont très élevées car la section de passage de l'air dans le conduit est très faible comparée au cas des chicane précédentes. Le rendement de $23 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ correspond à une température (T_{sc}) de 105°C , soit une amélioration de 76°C de la température d'entrée (T_e) du capteur. Ces résultats sont donc nettement meilleurs comparés à ceux obtenus en utilisant les chicane DCL1 et OCL1. L'allongement du trajet parcouru par l'air dans le conduit du capteur permet davantage un meilleur échange de chaleur entre l'air caloporteur et l'absorbeur.

2.2 Amélioration du temps de séchage

Depuis les premiers travaux de Lewis en 1921 [17] et Sherwood en 1925 [18], la technique de séchage a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques et demeure encore un domaine de recherche privilégié, notamment dans les pays où l'utilisation des méthodes traditionnelles s'imposent toujours. L'énergie solaire étant gratuite par rapport à d'autres sources d'énergie, telles que les résistances électriques [19], nous l'avons utilisée pour procéder à une application du séchage de la figue. Afin d'opérer par simulation de cette énergie solaire, nous avons considéré la

journée caractéristique du mois de juillet.

Pour que le séchage solaire s'impose, certaines difficultés sont à surmonter à l'aide des systèmes fiables techniquement et rentables économiquement. Le choix du type de séchoir est l'opération envisagée suivant que le produit supporte ou non le rayonnement solaire. Ce choix s'oriente vers les séchoirs directs ou indirects mais dépend aussi de la valeur commerciale du produit. Les performances des absorbeurs sont supérieures au pouvoir de conversion thermique des produits, alors l'utilisation d'un séchoir indirect est plus efficace. Le système étudié est un séchoir solaire indirect fonctionnant par convection forcée.

La construction d'une installation de séchage est très complexe et exige la prise en compte d'un certain nombre de paramètres et la maîtrise de beaucoup de phénomènes pour qu'elle puisse s'améliorer. Afin de mener à bien cette construction, il faut tout d'abord estimer les quantités des produits à traiter puis procéder à l'étude approfondie de la conception du système. Pour optimiser du point de vue thermique les organes de l'installation, il est important d'évaluer les différents modes de transfert et le bilan énergétique en tenant compte du couplage entre le générateur d'air chaud et l'unité de séchage en vue de son dimensionnement. Dans notre cas, l'installation (Fig.1) étant constituée seulement d'un capteur solaire plan et d'une armoire de séchage à 4 claies (version simplifiée) est conçue pour

traiter de faibles quantités et, par conséquent, la mise en place d'un stockage d'énergie, d'un chauffage d'appoint et d'un dispositif de recyclage de l'air n'est donc pas nécessaire. Les quantités de chaleur (Q_u) récupérées par le fluide caloporteur au niveau de l'absorbeur dépendent des bonnes performances du capteur solaire utilisé. Ces quantités étant proportionnelles à l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur, les résultats présentés plus haut montrent que le capteur muni de chicanes est plus intéressant et même indispensable. En conséquence, les temps de séchage sont améliorés.

Dans nos travaux expérimentaux, l'objectif est le séchage par simulation de l'énergie solaire. Cependant, pour un débit d'air donné, nous avons voulu étudier la variation de certains paramètres de séchage durant la journée considérée. Pour une application réelle du système étudié, vu les dépenses importantes occasionnées dans certains cas, le fonctionnement par convection forcée est moins adapté. Cependant, il est plus intéressant d'en bénéficier de la convection naturelle par effet de cheminée. Ceci est d'autant plus valable dans les zones dépourvues d'énergie électrique. Le choix de l'une ou l'autre solution dépend de plusieurs facteurs, en particulier de la quantité du produit à traiter, de sa structure capillaire, de sa valeur nutritive et des dépenses souhaitées. Le temps de séchage est donc un facteur très important. Dans les grandes opérations (industries), il y a nécessité de disposer d'une source extérieure d'énergie. Lorsque l'énergie électrique est disponible, faible et à un prix abordable, il est logique de l'utiliser pour actionner les ventilateurs, les soufflantes ou autres dispositifs nécessaires pour augmenter les performances du système. Dans le cas du système fonctionnant avec la convection naturelle à effet de cheminée, la force motrice de pesanteur est créée par différences de masse volumique de l'air entre l'extérieur (milieu ambiant) et l'intérieur de la cheminée. La hauteur de cette cheminée dont dépend le soutirage de l'air doit être convenablement étudiée. Pasumarthi N. et Sherif S.A. [20] ont montré que, pour une hauteur donnée et un flux solaire croissant, la température en un même point donné de la cheminée augmente. L'échange thermique s'améliore mais les pertes de charge totales du système qui sont proportionnelles à la hauteur et à la différence des masses volumiques de l'air augmentent. Leur accroissement est non négligeable.

Avant de présenter les résultats issus de nos expérimentations, nous donnons quelques

indications sur les chicanes TL utilisées. Ceci dit, les hauteurs respectives des grandes chicanes (Transversales) et des petites chicanes (Longitudinales) sont de 2.5cm et 2cm (Fig.7). la surface A_c est de $1.28m^2$.

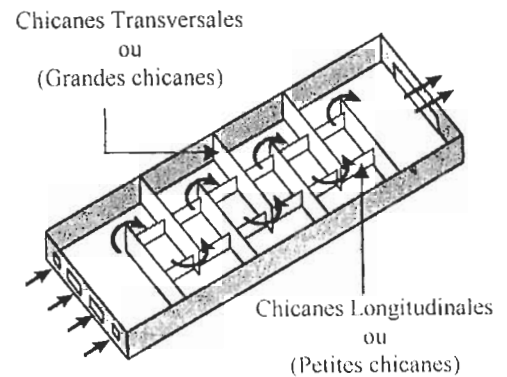


Figure 7. Présentation du capteur solaire muni des chicanes du type TL.

Pour chaque expérimentation, la masse initiale du produit est égale à 1034 grammes par claie, avec une teneur en eau initiale à base sèche (X_{obs}) de 7.34Kge/KgMS [10, 21]. En fin de séchage, la teneur en eau finale à base sèche (X_{bs}) doit être de 0.04Kge/KgMS. [Kge/KgMS : Kilogrammes d'eau par Kilogramme de Masse Sèche du produit.]

Pour étudier l'influence du débit d'air asséchant sur le temps de séchage, nous avons jugé intéressant d'utiliser les deux débits de 31.3 et $70m^3/h.m^2$. Ce réglage se fait à l'aide d'un ventilateur (simulateur solaire). La mesure du débit d'air se fait à l'aide d'un anémomètre à hélice de diamètre 10cm « Jules et Richard ». Avec le débit de $31.3m^3/h.m^2$, le temps de séchage au niveau de la 1^{ère} claie est plus long dans le cas du capteur SC mais il est respectivement de 7 heures 10 mn et 6 heures dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1 puis TL. Il y a donc des réductions relatives des temps de séchage de 50% et 59% par rapport au capteur SC. La teneur en eau finale n'est atteinte qu'après 13 heures 40 mn de séchage pour ce dernier (Fig. 8). L'air provenant de la 1^{ère} claie est chargée d'humidité, en conséquence, pour ce même débit d'air le temps de séchage au niveau de la 4^{ème} claie est plus élevé pour les trois différents capteurs. En augmentant le débit à $70m^3/h.m^2$ pour un capteur solaire donné, le temps de séchage diminue. Le séchage s'effectuant par entraînement, la vitesse d'écoulement de l'air correspondante à ce débit augmente se traduisant par l'évacuation rapide de l'air humide.

Dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1, en passant du débit de $31.3\text{ m}^3/\text{h.m}^2$ au débit de $70\text{ m}^3/\text{h.m}^2$, le temps de séchage est réduit de 1 heure au niveau de la 1^{ère} claie, soit une réduction relative de 16.3%. Dans le cas du capteur muni de chicanes TL, l'augmentation du débit conduit à une réduction relative de 15.8%. Au

niveau de la 4^{ème} claie, les temps de séchage sont de 9 heures et 7 heures respectivement dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1 puis TL. Par comparaison avec le capteur sans chicanes, avec le débit de $70\text{ m}^3/\text{h.m}^2$, les réductions respectives du temps de séchage au niveau de la 1^{ère} claie sont de 27% et 39.5%.

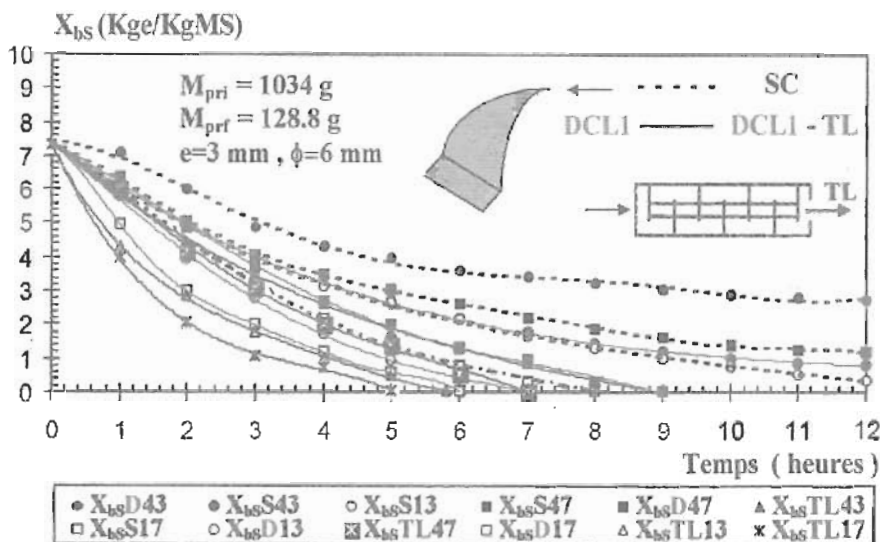


Figure 8. Evolution de la teneur en eau (X_{bs}) en fonction du temps, claies extrêmes 1 et 4, débits de 31.3 et $70\text{ m}^3/\text{h.m}^2$, (SC-DCL1-TL), journée caractéristique du mois de juillet, site de Valenciennes.

La figure 9 représente l'évolution de la perte de masse (ΔM) dans le cas des deux débits et pour les différents systèmes. La figure 10, montre l'évolution de la température du produit (T_{pr}) en fonction du temps pendant le processus de séchage. Nous rappelons qu'avec les différents

systèmes utilisés, le séchage s'est effectué avec la température variable suivant le flux solaire horaire de la journée considérée. Dans tous les cas, la phase constante de séchage n'existe pas (Fig.11).

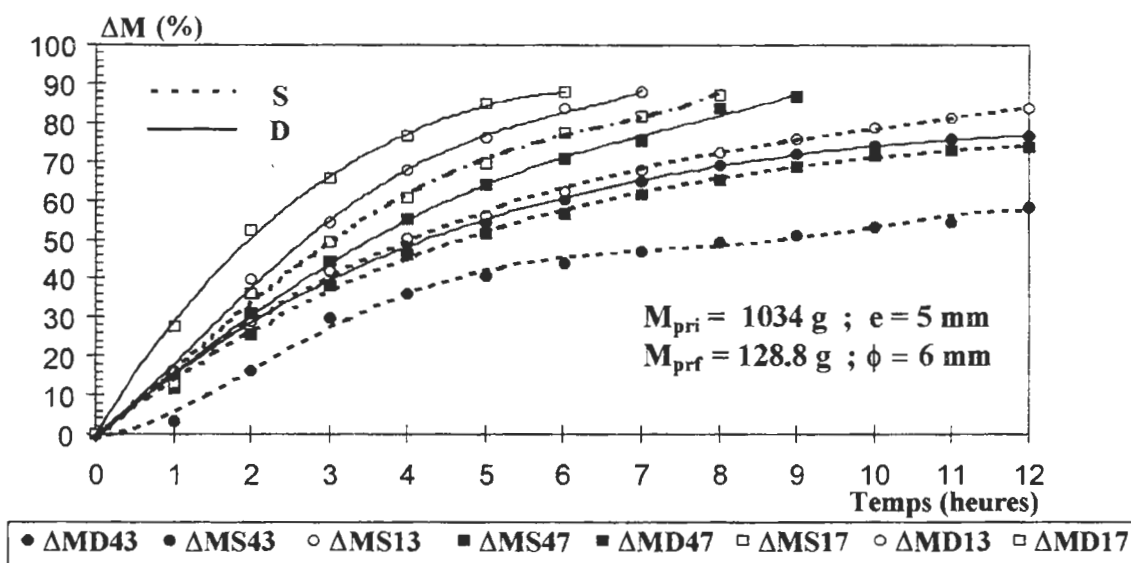


Figure 9. Evolution de la perte de masse (ΔM) de la figure en fonction du temps de séchage, claies extrêmes 1 et 4, débits de 31.3 et $70\text{ m}^3/\text{h.m}^2$, (SC-DCL1), journée caractéristique du mois de juillet, site de Valenciennes.

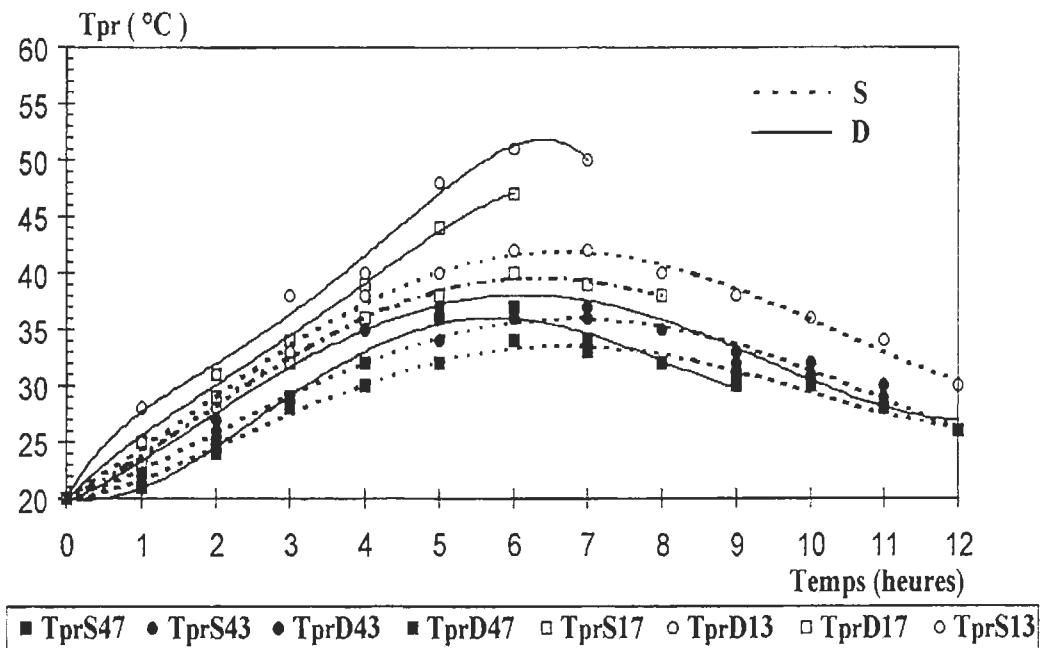


Figure 10. Evolution de la Température de la fige en fonction du temps, claies extrêmes 1 et 4, débits de 31.1 et 70 m³/h.m², (SC-DCL1-TL).

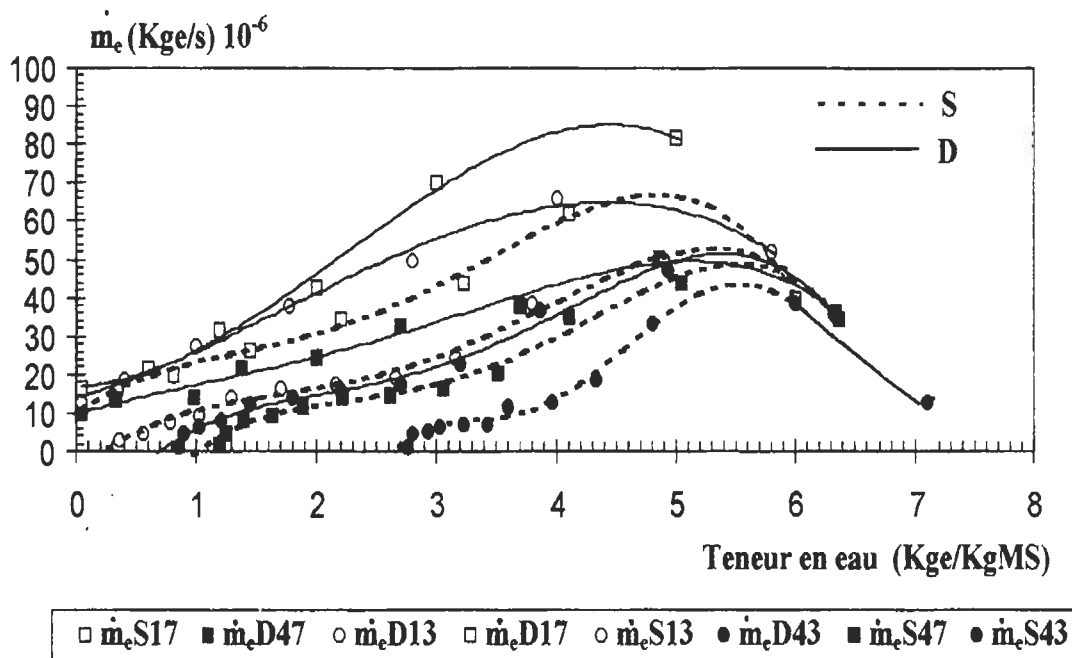


Figure 11. Evolution de la vitesse de séchage (m_e) en fonction de la teneur en eau à base sèche, débits de 31.3 et 70 m³/h.m², cas du capteur SC et du capteur muni des chicanes DCL1.

Par comparaison au cas du capteur sans chicanes, nous constatons qu'il est beaucoup plus intéressant d'opérer avec un faible débit d'air, car l'amélioration du temps de séchage est plus intéressante. La puissance mécanique consommée (P_{mc}) par le ventilateur est propor-

tionnelle aux pertes de charge et au débit d'air dans la veine d'air dynamique. Cette même puissance se présente sous la forme suivante:

$$P_{mc} = \Delta P \cdot Q_v = \zeta \cdot Q_v^3 \quad (5)$$

Avec ζ : Facteur de friction caractérisant les rugosités artificielles (obstacles).

Le rapport entre les deux débits étant de 2.24, cette puissance est donc accrue d'un facteur de 11.24. Ce qui met en évidence encore une fois l'intérêt de travailler avec un faible débit.

Malgré les recommandations de certains auteurs, de ne pas dépasser la température de 55°C de l'air de séchage, nous avons opéré avec des températures supérieures (au voisinage du midi solaire). Au-delà de 71°C, nous constatons des taches de roussissement (signes de brûlure) du produit. En effet, la qualité, la couleur, la saveur et la valeur nutritive du produit sont étroitement liées au processus thermique. Pour sécher dans des conditions idéales, avec des températures inférieures à celle recommandée pour le produit considéré, quelques solutions peuvent être envisagées :

- installer un indicateur de température à l'entrée de l'armoire de séchage et utiliser un débit d'air plus élevé si nécessaire. Rappelons, cependant, que si l'augmentation du débit spécifique devenait indispensable en milieu de journée, elle ne le serait pas pour des soleils moins hauts et plus obliques par rapport au capteur en début ou en fin de la même journée.

- installer un régulateur de température de l'air de séchage avec un point de consigne fixé à 55 °C.

Les quantités de chaleur utile récupérées à la sortie du capteur sont nettement supérieures dans le cas du capteur muni de chicane TL, puis DCL1. Sur les figures 12 et 13, nous avons représenté pour le séchage avec le capteur sans chicane puis muni de chicane DCL1, les variations des quantités de chaleur utile (Q_u), des quantités de chaleur de séchage globales (Q_s) et de leur différence ($\Delta Q = Q_u - Q_s$). Nous pouvons constater que les quantités de chaleur utile sont accrues d'un facteur de 1.65 environ par rapport au cas du capteur SC. Ces quantités de chaleur excédentaires (ΔQ), comparées aux quantités réellement nécessaires pour le séchage, sont très significatives et leur stockage est d'une grande importance pour une utilisation pendant les nuits ou les journées médiocres [22-25]. Ce stockage de chaleur peut se faire en sous-sol à l'aide de conduits.

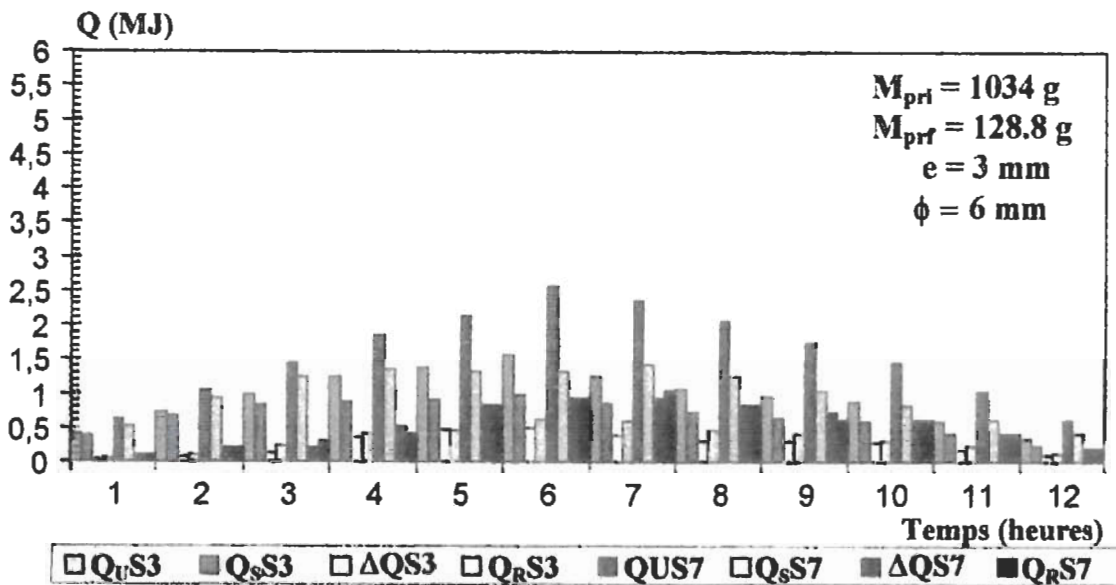


Figure 12. Variation des Quantités de Chaleur (Q) en fonction du temps, débits de 31.3 et 70 $\text{m}^3/\text{h}.\text{m}^2$, cas du capteur SC.

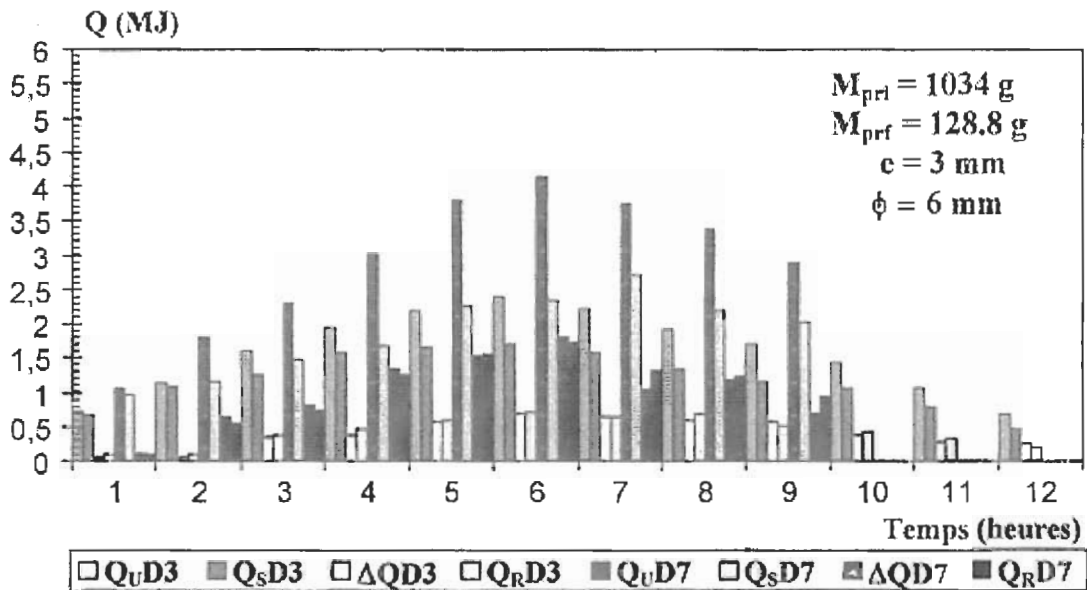


Figure 13. Variation des Quantités de chaleur (Q) en fonction du temps, débits de 31.3 et 70 m³/h.m², cas du capteur muni des chicanes DCL1.

Avec les deux débits d'air considérés, les rendements thermiques moyens (η_t) du système de séchage étudié sont respectivement de 28% et 26% dans le cas du capteur muni de chicanes DCL1 contre 34% et 29% dans le cas du capteur (SC). Cela signifie que les quantités de chaleur Q_u sont très importantes comparées à celles nécessaires à l'évaporation de l'eau du produit.

Conclusion

Les résultats obtenus à partir des différents types de capteurs solaires considérés permettent de déduire que l'introduction de chicanes dans la veine d'air est un facteur très important pour l'amélioration des performances d'un capteur. Cette adjonction nécessite, bien entendu, la prise en considération de la forme, des dimensions, du nombre de rangées et de la disposition de ces chicanes. L'étude a montré qu'un capteur solaire plan muni d'obstacles apporte une amélioration très appréciable du couple Température-Rendement et des temps de séchage du produit. Notons que la réduction des espaces transversal (E_t) et longitudinal (E_l) apporte une nette amélioration à la qualité des résultats. En outre, l'augmentation de l'angle Δi conduit à des résultats encore nettement meilleurs. Cependant, l'utilisation des températures idéales de l'air asséchant est indispensable pour tenir compte de certaines contraintes (qualité, saveur, couleur et valeur nutritive) imposées par le produit fini.

Références Bibliographiques

- [1] Zugary M.R., Vullierne J.J., "Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire par l'utilisation d'une structure à lamelles", Entropie, n°176, (1993), pp 25-30.
- [2] Ouard S., "Optimisation des formes et disposition d'obstacles dans la veine mobile du fluide des capteurs solaires plans à deux couches d'air en vue de la maximisation du couple rendement et température", thèse doctorat, Valenciennes, (1989).
- [3] Moumni N., "Prévisions systématiques et optimisation des performances des capteurs solaires plans à air dans divers sites de climats Méditerranéens ou sahariens et avec ou sans altitudes", thèse doctorat, Valenciennes, (1994).
- [4] Ben Slama R., "Contribution à l'étude et au développement de pompes et capteurs solaires", thèse doctorat, Valenciennes, (1987).
- [5] Choudhury C., Gary H.P., Performance of air heating collectors with packed airflow passage", Solar Energy, V 50,3, (1993), pp 205-221.
- [6] Gbaha P., "Etude et optimisation des échanges thermiques et des performances des capteurs solaires plans à deux veines d'air", thèse doctorat, Valenciennes, (1989).

- [7] Hachemi A., "Contribution à l'optimisation des performances thermiques des insolateurs plans à air à lit garni de rangées d'obstacles aux pas serrés, amélioration du rendement par interaction entre rayonnement et convection", thèse doctorat, Valenciennes (1992).
- [8] Moumni A., "Etude globale et locale du rôle de la géométrie dans l'optimisation des capteurs solaires plans à air", thèse doctorat, Valenciennes, (1994).
- [9] Météo France, Direction Régionale, Villeneuve d'Ascq, Lille, (1996).
- [10] Ahmed-Zaid A., "Optimisation des capteurs solaires plans à air. Application au séchage de produits agricoles et de la pêche", thèse doctorat, (1998)
- [11] Messaoudi H., Ahmed-Zaid, Le Ray M. "Le rôle de la géométrie dans l'amélioration ou la diminution des échanges thermiques turbulents dans les capteurs solaires à air", 3^{ème} congrès de mécanique, Société Marocaine des Sciences Mécaniques et de l'université Abdelmalek Essaadi, Faculté Science deTétouan, VI, (22-25 avril 1997), pp 637-644.
- [12] Ahmed-Zaid A., Messaoudi H., Benyounes R., Le Ray M, "Etude expérimentale de l'effet des chicanes sur les capteurs solaires plans à air, par simulation de l'énergie solaire", 3^{èmes} Journées Maghrébines sur la Mécanique, Institut de Mécanique, Guelma (Algérie), VI, (29-30 avril 1997), pp 212-218.
- [13] Le Ray M., Deroyon J.P., Deroyon M.J., Minair C., "Critères angulaires de stabilité d'un tourbillon hélicoïdal ou d'un couple de tourbillons rectilignes, rôle des Angles Privilégiés dans l'optimisation des ailes, voiles, coques des avions et navires", Communication à l'Association Technique Maritime et Aérodynamique, Bulletin de l'ATMA, Paris, (avril 1985), pp 511-529.
- [14] Messaoudi H., "Structures tourbillonnaires induites par des obstacles triangulaires complexes et interactions Ailes Delta minces - Corps de Révolution. Application des Angles Privilégiés, en Aérodynamique et Energétique", thèse doctorat, Valenciennes, (1996).
- [15] Abene A., "Etude systématique des positions et de la stabilité des structures tourbillonnaires au-dessus d'ailes ogivales et de cônes", thèse doctorat, Valenciennes, (1990).
- [16] Letz T., "Modélisation et dimensionnement économique d'un système de chauffage domestique biénergie", thèse doctorat, INSA Lyon, (1985).
- [17] Lewis W.K., "The rate of drying of solid materials", Journal of. Ind and Eng. Chem, Vol 13, 5, (1921), pp 427-432.
- [18] Sherwood T.K., "The drying of solid", V 21, 10, (1929), pp 12-16.
- [19] Kondé G., "Résolution des équations de Luikov appliquée au séchage de l'oignon en vu de la réalisation de séchoirs solaires dans les pays sahéliens", thèse doctorat, Perpignan, (1983).
- [20] Pasumarthi N., Sherif S.A., "Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-part II : Experimental and theoretical results & economic analysis", Internat Journal Of Energy Research, 22, (1998), pp 443-461;
- [22] Desmons J.Y., "Formulation et résolution numérique des problèmes aux limites appliquées, aux générateurs de chaleur tubulaires enterrés", thèse doctorat, Valenciennes, (1984).
- [23] Benyounes R., "Prévision numérique et expérimentale de la réponse intrinsèque d'un échangeur bitubulaire enterré en régime continu", thèse doctorat, Valenciennes, (1993).
- [24] Portales B., "Etude et expérimentation du chauffage solaire des serres à stockage thermique souterrain", thèse doctorat, Valenciennes, (1984).
- [25] N'Dongo M.M., "Etude théorique d'un générateur solaire à air chaud constitué d'une serre agricole et d'un stockage de chaleur en sous-sol à l'aide de conduits. Application au séchage", thèse doctorat, Clermont-Ferrand II. Blaise Pascal, (1989).

Légendes des figures

(Fig.3)	\triangle I_{GS} \blacktriangle T_a	(Fig.6)	\boxtimes η_{TL} \blacksquare η_D \square η_O \vdash η_S
(Fig. 8)	\circ X_{bsD13} \bullet X_{bsD43} \square X_{bsD17} \blacksquare X_{bsD47} \circ X_{bsS13} \bullet X_{bsS43} \square X_{bsS17} \blacksquare X_{bsS47} \triangle X_{bsTL13} \blacktriangle X_{bsTL43} \bullet X_{bsTL17} \blacksquare X_{bsTL47}	(fig. 9)	\circ $\Delta MD13$ \bullet $\Delta MD43$ \square $\Delta MD17$ \blacksquare $\Delta MD47$ \circ $\Delta MS13$ \bullet $\Delta MS43$ \square $\Delta MS17$ \blacksquare $\Delta MS47$
(Fig. 10)	\circ T_{prD13} \bullet T_{prD43} \square T_{prD17} \blacksquare T_{prD47} \circ T_{prS13} \bullet T_{prS43} \square T_{prS17} \blacksquare T_{prS47}	(fig. 11)	\circ m_eD13 \bullet m_eD43 \square m_eD17 \blacksquare m_eD47 \circ m_eS13 \bullet m_eS43 \square m_eS17 \blacksquare m_eS47
(Fig. 12)	\boxtimes Q_uS3 \boxplus Q_sS3 \boxtimes $\Delta QS3$ \boxplus Q_uS7 \boxtimes Q_sS7 \blacksquare $\Delta QS7$	(Fig. 13)	\boxtimes Q_uD3 \boxplus Q_sD3 \boxtimes $\Delta QD3$ \boxplus Q_uD7 \boxtimes Q_sD7 \blacksquare $\Delta QD7$