

Classification

Physics Abstracts

86.104 — 86.305 — 47.25Q

## Analyse du comportement dynamique et thermique d'un séchoir solaire constitué d'un capteur à matrice poreuse couplé à une cheminée solaire

J. R. Puiggali

Laboratoire Energétique et Phénomènes de Transfert (\*),  
ENSAM, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France

et F. Penot

Laboratoire d'Energétique Solaire (\*\*),  
40, avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France

(Reçu le 21 octobre 1982, révisé le 28 avril 1983, accepté le 16 juin 1983)

**Résumé.** — Dans cet article, on présente les résultats de l'analyse du comportement dynamique et thermique d'un séchoir solaire à fruits, couplé à une cheminée solaire. Cette analyse est basée sur des mesures effectuées lors d'une campagne *in situ* complétées par une étude systématique en laboratoire. On montre en particulier l'amélioration des performances du dispositif par l'introduction de thermosiphons superposés résultant du couplage séchoir-cheminée.

**Abstract.** — We present in this paper results concerning the dynamical and thermal behaviour of a solar fruit dryer, made up with a porous solar collector coupled to a solar chimney. The analysis is based on measurements obtained during and *in situ* experiment, followed by a systematic laboratory study. It's shown that the efficiency of the dryer is increased through the superposed thermosiphons resulting from coupling dryer-chimney.

### Introduction.

La coïncidence période de récolte-période d'ensoleillement important, fait du séchage solaire un outil intéressant et ce d'autant plus que les séchoirs seront simples et performants et donc facilement transposables à des zones où l'on rencontre des problèmes d'approvisionnement énergétique et des besoins cruciaux de conservation de produits agricoles.

Nous effectuons tout d'abord une brève description du séchoir étudié puis nous rappelons quelques résultats obtenus lors des campagnes de séchage. Dans une deuxième partie, après avoir décrit le protocole expérimental, nous présentons les séries d'essais effectuées. Ils consistent en une expérimentation sur le terrain du séchoir en conditions réelles de fonctionnement. Ces essais sur le terrain nous ont permis d'étudier la faisabilité et les particularités du séchage solaire avec des séchoirs autonomes et de petite capacité mais aussi d'apporter des informations thermiques et hydrodynamiques sur le fonctionnement de tels systèmes. Ces essais sont complétés par une brève étude, au

laboratoire, de sensibilité de paramètres, en simulant de façon reproductible des conditions extérieures aléatoires.

### 1. Description du séchoir.

Une vue du séchoir est donnée figure 1. Les détails de sa réalisation sont présentés dans la référence 1.

#### 1.1 CARACTÉRISTIQUES ET CONSTITUTION DU SÉCHOIR.

— Nous rappelons simplement ici ses caractéristiques générales et nous le décrivons sommairement. La conception a été faite pour répondre à des objectifs précis :

- une vocation essentiellement agricole (fruits, légumes, cultures vivrières...),
- une utilisation sur les lieux de récolte,
- une production séchée d'ampleur modeste (15 kg de produit frais par cycle).

En plus de ces spécificités, nous avons imaginé et expérimenté des appareils simples et rustiques, de mise en oeuvre locale tant du point de vue des matériaux que de celui de la construction, d'une maintenance aisée.

(\*) ERA CNRS 1026.

(\*\*) L.P. CNRS n° 8531.

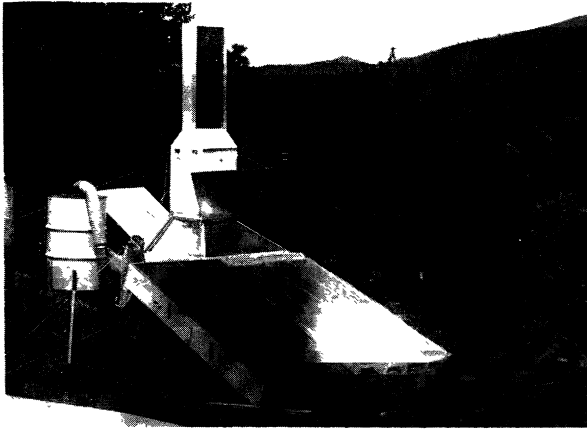


Fig. 1. — Vue générale du séchoir sur le terrain.

[General view of the dryer.]

Nous avons alors opté pour des systèmes où les différentes fonctions captation solaire, dessiccation proprement dite, mise en mouvement de l'agent séchant sont séparées. La chaîne de séchage étudiée est formée des éléments suivants :

- générateur d'air chaud,
- stock thermique (élément d'auto-régulation),
- enceinte de séchage,
- cheminée solaire (dispositif de tirage).

L'assemblage de ces différents éléments est réalisé de façon à réduire au maximum les déperditions de chaleur et à donner au système un aspect compact. En plus de ceci, un panneau réflecteur permet un léger réchauffage de l'air d'entrée pour contrer l'évaporation matinale du sol environnant. Trois autres panneaux destinés à protéger le stock durant la nuit permettent un renfort de la captation sur cet élément pendant le jour. L'orientation préférentielle de l'ensemble est le sud.

## 1.2 DESCRIPTION SOMMAIRE DES DIVERS COMPOSANTS.

— Une coupe du séchoir est donnée figure 2. On trouve successivement :

— le générateur d'air chaud qui est un capteur plan dont l'absorbeur est une matrice poreuse cloisonnée, le fond du coffre est aussi une partie absorbante. La couverture est du polyane en simple épaisseur, il en est de même pour toutes les autres parties captantes. Ce capteur s'articule directement sur l'élément de stockage qui apparaît ici comme un module tampon entre le générateur d'air chaud et le caisson de séchage proprement dit ;

— l'élément sensible du stock est constitué de bidons métalliques peints en noir et remplis d'eau. Son chargement s'effectue à la fois par rayonnement direct au travers des parois transparentes de l'étuve et par récupération sur les gaines collectant l'air chaud en sortie du capteur. Son déchargement s'effectue par refroidissement des bidons à l'aide d'un courant d'air que l'on crée entre le plancher perforé du caisson de stockage et une bouche haute centrale ;

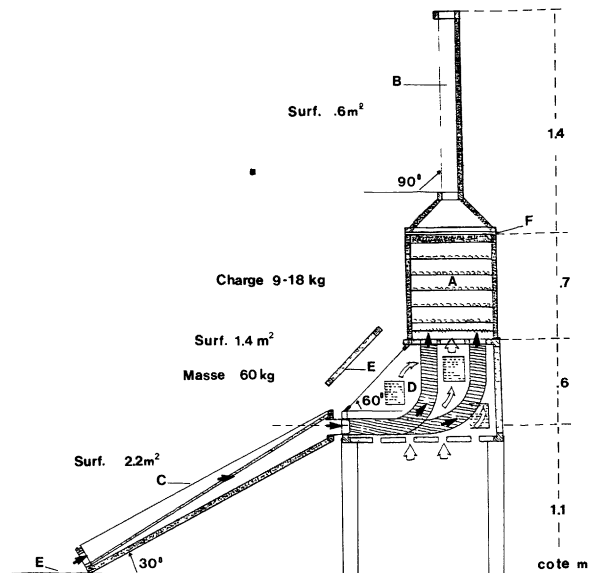


Fig. 2. — Vue en coupe du séchoir. A : Caisson de séchage. B : Cheminée solaire. C : Capteur à matrice poreuse. D : Stock thermique. E : Panneaux réflecteurs-protecteurs. F : Trappe de tirage. Circulation de l'air : → jour, ⇌ nuit.

[Schematic view of the dryer. A : Drying case. B : Solar chimney. C : Porous material solar collector. D : Thermal storage. E : Reflecting-protecting panels. F : Draught orifice. Air ways : → day, ⇌ night.]

— le caisson de dessiccation comprend six claies utiles, une claie basse de répartition dont la fonction est d'homogénéiser les flux d'air chaud entrant ;

— la cheminée qui surmonte le caisson est un capteur plan vertical, à la jonction caisson-cheminée se trouve une trappe qui permet une admission d'air. Comme on le verra par la suite, la cheminée et sa trappe de « tirage » assurent le fonctionnement hydrodynamique de la chaîne.

## 2. Quelques résultats de séchage.

Nous ne reviendrons pas sur les détails concernant les caractéristiques cinétiques du séchage, de divers produits dans ce dispositif ; elles sont présentées dans les références 1 et 2. Nous rappelons brièvement (Fig. 3), l'évolution dans le temps de la masse réduite  $(m/m_i)_{pro}$  du produit à sécher.

Sur un cycle complet de séchage, nous obtenons en moyenne un pouvoir évaporateur de 1 kg d'eau/jour/m<sup>2</sup> de surface captante. Cependant c'est au cours de la 1<sup>re</sup> journée que pour la majorité des produits séchés, plus de 50 % de l'eau est évaporée. On a ainsi abaissé fortement la disponibilité en eau du produit en un temps court. Ce résultat est particulièrement intéressant dans la mesure où l'on peut recharger le séchoir au bout de vingt-quatre heures, la phase finale de séchage pouvant se faire dans le local de conservation.

Certains produits tels que le raisin ou la prune (produits à peau épaisse, séchés entiers) échappent à cette règle. Ils ne conviennent pas à ce type de séchoir.

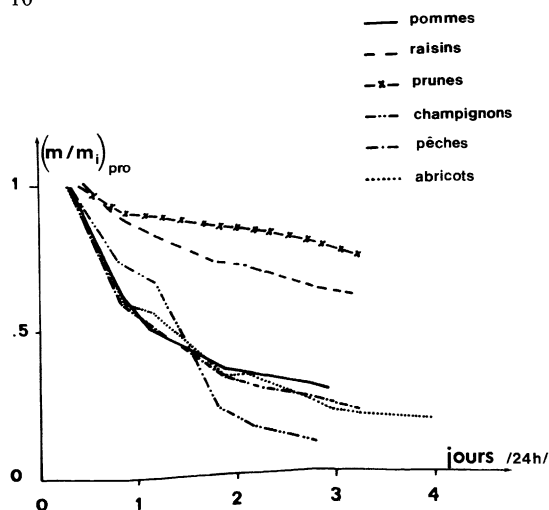


Fig. 3. — Evolution de la masse réduite de divers produits en fonction du temps pour des conditions climatiques favorables.

[Reduced mass evolution of various products versus time (climatic conditions : clear days).]

### 3. Performances dynamiques et thermiques.

**3.1 RÈGLES EXPÉRIMENTALES.** — Nous décrivons deux types d'expérimentations, celles réalisées sur le site, dans des conditions réelles de fonctionnement qui impliquent une métrologie assez rustique et celles effectuées en laboratoire, en conditions simulées et facilement reproductibles qui permettent d'utiliser une métrologie plus fine.

**3.1.1 Sur le site.** — Afin de caractériser les différents éléments et leur contribution au bilan énergétique de la chaîne de séchage, nous nous sommes intéressés :

- aux conditions expérimentales environnantes, taux de nuages, éclairage d'une surface horizontale, vitesse et direction du vent moyen, température, humidité relative et pression de l'air ambiant ;
- aux caractéristiques de l'agent de séchage à divers niveaux de la chaîne : température sèche, température humide et vitesse moyenne ;
- au niveau thermique du stockage en fonction de son utilisation ;
- à la perte de masse du produit.

Pour mesurer la perte de masse, nous avons utilisé un capteur de déplacement en continu ainsi que des pesées. Pour les conditions environnantes une microstation météorologique a été installée sur le site. Les températures sèches ont été relevées à l'aide de thermocouples de type K munis d'une plaquette de cuivre (précision de l'ordre de 0,5 °C). Enfin, pour les vitesses, nous avons utilisé l'indication donnée par un manomètre différentiel de type Fortier ; différence faite entre des prises de pressions dans des sections calibrées (bouche de sortie capteur et au 2/3 de la hauteur de la cheminée) et la pression ambiante. Ce dispositif permet d'obtenir des informations plus que qualitatives sur

l'amplitude de la vitesse dans le séchoir. Bien que peu précis dans cette gamme de vitesses faibles, cet appareil est peu sensible aux différences de températures et est robuste.

**3.1.2 En laboratoire.** — Nous nous sommes attachés à effectuer des essais reproductibles et dans le domaine des températures de capteur rencontrées *in situ*. On substitue à la matrice poreuse des capteurs un réseau de résistances électriques pour obtenir une énergie incidente équivalente. Aucun apport énergétique n'a été considéré, ni dans le stock, ni dans la cheminée. Des mesures ponctuelles de températures sont effectuées et les vitesses ont été mesurées en différents points, jugés significatifs, à l'aide d'un vélocimètre laser à effet Doppler. Celui-ci donne sans correction ni étalonnage une indication de la vitesse absolue du fluide même dans un écoulement non isotherme.

### 3.2 EXPÉRIMENTATION *in situ*.

**3.2.1 Rendement de la cheminée.** — La cheminée est très sensible à deux paramètres extérieurs le vent et l'éclairage. Son rendement  $\eta_{che}$  peut être défini par :

$$\eta_{che} = D_{che} C_p \frac{(\bar{T}^s - \bar{T}^e)_{che}}{E_{90}} \quad (1)$$

où  $C_p$  est la capacité calorifique de l'air,  $D_{che}$  le débit masse d'air dans le conduit,  $\bar{T}^e_{che}$  et  $\bar{T}^s_{che}$  les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du conduit,  $E_{90}$  l'éclairage du plan captant.

Comme le montre la figure 4, le rendement augmente fortement avec la vitesse du vent. La courbe de rendement ayant été tracée en considérant des essais pour lesquels l'écart de température  $(\bar{T}^s - \bar{T}^e)_{che}$  et l'énergie incidente  $E_{90}/\sigma T_a^4$  étaient constants, cet accroissement est dû à l'augmentation du débit masse d'air dans le séchoir. Cet effet est plus net encore lorsque la trappe d'aspiration est ouverte.

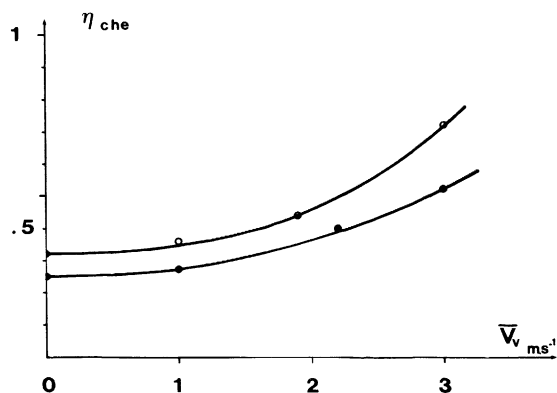


Fig. 4. — Evolution du rendement propre de la cheminée (rapporté au  $\Delta T$  entrée-sortie) en fonction du vent : avec (○) ou sans (●) tirage. Situation sur le terrain.  $E_{90}/\sigma T_a^4 = 0,91$  et  $(\bar{T}^e/\bar{T}^s)_{che} = 0,99$ .

[Self efficiency of the chimney as a function of wind-speed *in situ* experiment with (○) and without (●) draught.]

On constate par contre (Fig. 5) une chute rapide du rendement de la cheminée lorsqu'on augmente l'éclairement (avec ou sans tirage). L'écart de température entre la sortie et l'entrée de la cheminée et la vitesse du vent étant constants, cette décroissance du rendement signifie qu'un apport supplémentaire d'énergie, au niveau de la cheminée, n'entraîne pas une augmentation sensible de la vitesse de l'air traversant le séchoir. Le surplus d'énergie sert surtout à vaincre les pertes de charge dans tout le système de circulation d'air.

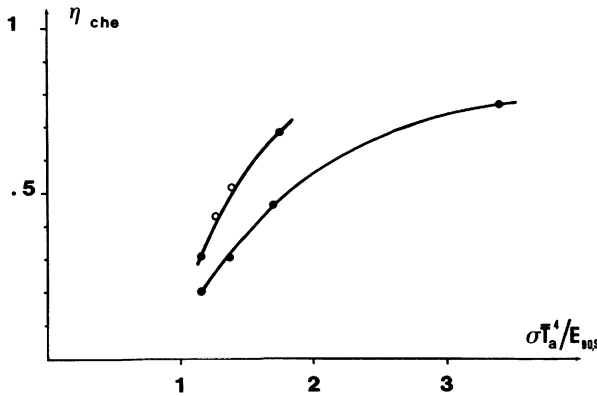


Fig. 5. — Evolution du rendement propre de la cheminée (rapporté au  $\Delta T$  entrée-sortie) en fonction de l'inverse de son éclairement : avec (○) ou sans (●) tirage. Situation sur le terrain ( $\overline{T^e}/\overline{T^s}$ )<sub>che</sub> = 0,99 et  $V_v \simeq 1,2 \text{ m.s}^{-1}$ .

[Self efficiency of the chimney as a function of the reciprocal of the solar radiation, with (○) and without (●) draught.]

**3.2.2 Rendement du capteur.** — La vitesse en sortie du capteur plan est liée directement à la vitesse dans la cheminée par un rapport de section (lorsque la trappe de tirage est fermée), elle subit donc une évolution analogue. La figure 6 montre en effet qu'au-delà d'un certain seuil d'éclairement, la vitesse  $V_{cap}$  dans le capteur ne croît pratiquement plus.

On peut observer de même que la température en sortie du capteur (Fig. 6) atteint une valeur limite qui est due à une forte augmentation des pertes de chaleur vers l'extérieur, en partie haute du capteur.

Il en résulte que le rendement du capteur,  $\eta_{cap}$ , a un comportement identique à celui de la cheminée, à savoir une diminution sensible à fort éclairement. Ce rendement  $\eta_{cap}$  est défini par :

$$\eta_{cap} = D_{cap} C_p \frac{(\overline{T^s} - \overline{T^e})_{cap}}{E_{30}}$$

où  $D_{cap}$  est le débit masse d'air dans le capteur,  $\overline{T^s}_{cap}$ ,  $\overline{T^e}_{cap} = \overline{T^e}_a$  les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur,  $E_{30}$  l'éclairement du plan captant.

Son évolution au cours d'une journée est illustrée sur la figure 7, il est minimum au maximum d'éclairement (en milieu de journée). De plus, nous avons essayé des capteurs munis de matières poreuses d'épaisseurs différentes (0,5 et 1 cm). On peut remar-

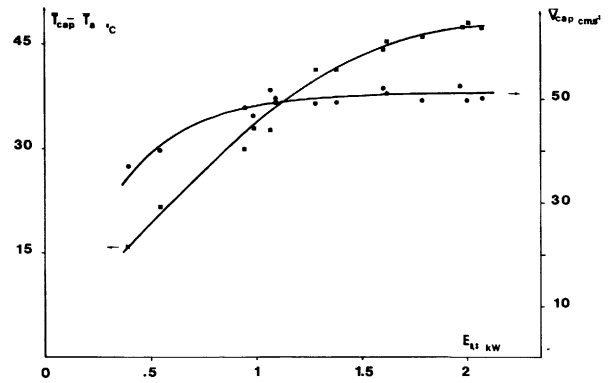


Fig. 6. — Relations du type vitesse-éclairement ou écart de température-éclairement pour le capteur à matrice poreuse. L'ensemble séchoir fonctionne avec tirage. Situation sur le terrain.

[Wind-speed and outlet-inlet temperature difference as functions of solar radiation (*in situ* experiment without draught).]

quer (Fig. 7) que ce paramètre n'a pratiquement pas d'influence sur les performances du capteur. Les rendements moyens sur une journée pour des capteurs pris isolément sont de même ordre de grandeur :

$$\langle \eta_{cap, mince} \rangle = 24 \% \quad \langle \eta_{cap, épaisse} \rangle = 26 \% .$$

Par contre, l'intérêt du couplage cheminée-capteur apparaît très nettement, le rendement moyen sur une

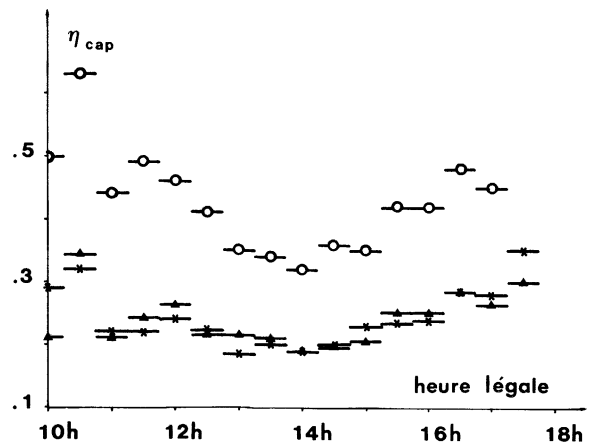


Fig. 7. — Rendement instantané du capteur à matrice poreuse.

* matrice épaisse	$\langle \eta \rangle = 26 \%$	capteur non couplé à la cheminée
▲ matrice mince	$\langle \eta \rangle = 24 \%$	
○	$\langle \eta \rangle = 44 \%$	capteur couplé à la cheminée.

[Efficiency of the porous solar collector

* thick porous material	$\langle \eta \rangle = 26 \%$	solar only
▲ thin porous matrix	$\langle \eta \rangle = 24 \%$	
○	$\langle \eta \rangle = 44 \%$	solar collector + chimney.]

journée est doublé lorsque le capteur est connecté à la cheminée :

$$\langle \eta_{\text{cap,mince}} \rangle = 44 \% .$$

**3.2.3 Comportement dynamique du système.** — Du point de vue séchage, on a montré (§ 2) que le séchoir était particulièrement intéressant lors des premières vingt-quatre heures d'utilisation. (Les produits ayant, en général, suffisamment d'eau pour que son activité soit ralentie). Par ailleurs, c'est l'alternance jour-nuit qui fixe la périodicité dans le fonctionnement dynamique et thermique du système. Nous avons donc choisi de montrer (Fig. 8) l'évolution des paramètres significatifs de la chaîne de séchage, et de son environnement, sur une journée type bien ensoleillée. Des renseignements d'ordre qualitatif peuvent être déduits directement de ces différentes courbes.

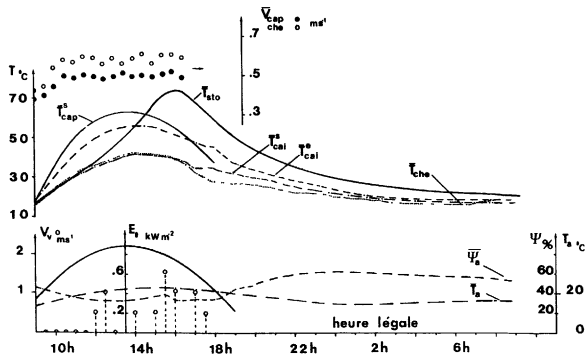


Fig. 8. — Evolution au cours d'une journée type des conditions ambiantes et des paramètres caractéristiques de la chaîne de séchage (séchage d'une couche épaisse, fonctionnement du séchoir avec tirage).

[Evolution of various internal parameters and external conditions on a typical day (drying a thick layer of product.)]

Les variations de la température du stock ( $\overline{T}_{\text{sto}}^s$ ) sont typiques d'un système à chaleur sensible. Du fait de l'apport direct d'énergie sur le caisson de stockage, le maximum de température atteint en fin de journée dans le stock est supérieur à la température ( $\overline{T}_{\text{cap}}^s$ ) en sortie du capteur. On constate de plus, un bon équilibre entre le stock, la surface de captation et le dimensionnement général (pas de surchauffe importante dans le stock, épuisement du stockage au petit matin), créant une période de repos favorable au meilleur redémarrage du séchage au jour suivant.

L'évolution de la température en sortie du capteur ( $\overline{T}_{\text{cap}}^s$ ) suit parfaitement celle de l'éclairement. On n'a pas de phénomène de seuil de température dû à des pertes thermiques trop importantes.

A l'entrée du caisson de séchage le niveau thermique ( $\overline{T}_{\text{cai}}^e$ ) est plus bas qu'en sortie de capteur où que dans le stockage et l'on note un léger déphasage dans le temps vis-à-vis de l'éclairement. Ceci nous montre le rôle de tampon joué par le stockage. Lorsque l'apport éner-

gétique du capteur devient faible, on utilise les calories du stockage, ceci correspond au décrochement sur la courbe de température ( $\overline{T}_{\text{cai}}^e$ ) à l'entrée du caisson.

On pourrait faire les mêmes remarques sur l'évolution de la température ( $\overline{T}_{\text{cai}}^s$ ) à la sortie du caisson de dessiccation, avec cependant, un déphasage un peu plus important et un écrêtage induits par la masse de produit qui sèche.

De jour, la température à la sortie du caisson ( $\overline{T}_{\text{cai}}^s$ ) est à peine inférieure à la température moyenne ( $\overline{T}_{\text{che}}^s$ ) de la cheminée, ceci confirme le faible apport énergétique propre au conduit de sortie.

De nuit, la seule source énergétique est le stockage, ainsi les niveaux de température vont en décroissant à mesure que l'on s'élève dans la chaîne, ils s'égalisent en fin de nuit.

Enfin l'évolution des vitesses suggère que l'on atteint, bien avant le maximum d'éclairement, un régime de vitesse ( $\overline{V}_{\text{cap}}$ ) constante dans le capteur. Au-delà d'un certain débit, les frottements visqueux ou les pertes de charges dans le circuit aérodynamique croissent trop vite pour qu'un apport d'énergie se concrétise par une augmentation de vitesse. La vitesse de l'air dans la cheminée est un peu perturbée par les sautes de vent ambiant.

**3.2.4 Fonctionnement global, étude à partir d'une journée particulière.** — Dans ce paragraphe, l'aspect quantitatif du fonctionnement du séchoir est envisagé à partir des données acquises tout le long d'une journée particulière, mais représentative d'une journée « normale » de séchage.

On raisonne sur les valeurs moyennes intégrées sur la journée. La charge utile du séchoir est de 9 kg de produits frais.

Les conditions atmosphériques sont les suivantes :

- température ambiante  $\langle \overline{T}_a \rangle = 25,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- humidité ambiante  $\langle \psi_a \rangle = 46 \%$ ,
- vitesse moyenne du vent  $\langle V_v \rangle = 1 \text{ ms}^{-1}$ ,
- énergie incidente  $\langle E_i \rangle_{\text{sec}} = 72 \text{ MJ}$ .

● Sur le capteur à matrice poreuse :

$$E_{i,30^\circ,\text{sud}} = 48 \text{ MJ} .$$

● Sur la surface captante du stockage :

$$E_{i,60^\circ,\text{sud,est,ouest}} = 20 \text{ MJ} .$$

● Sur la surface captante de la cheminée :

$$E_{i,90^\circ,\text{sud}} = 4 \text{ MJ} .$$

Les vitesses moyennes mesurées dans le capteur et dans la cheminée sont respectivement :

$$\langle \overline{V}_{\text{cap}} \rangle = 0,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\langle \overline{V}_{\text{che}} \rangle = 0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

et des débits massiques correspondants de 770 kg/j et 1 360 kg/j d'air ce qui correspond à un apport de 530 kg par la trappe de tirage à une vitesse moyenne

de  $1,2 \text{ m.s}^{-1}$  (du même ordre de grandeur que la vitesse du vent ambiant).

Le bilan énergétique de chaque élément du séchoir (Fig. 9) est obtenu à partir des moyennes suivantes de température :

— *capteur* :

$$\langle \bar{T}_{\text{cap}}^e \rangle = \langle \bar{T}_a \rangle = 25,2 \text{ °C} \quad \langle \bar{T}_{\text{cap}}^s \rangle = 52 \text{ °C}$$

soit une énergie captée

$$\langle R_{\text{cap}} \rangle = 20,6 \text{ MJ}$$

et un rendement moyen

$$\langle \eta_{\text{cap}} \rangle = 0,43$$

— *stockage* :

$$\langle \bar{T}_{\text{sto}}^e \rangle = 24 \text{ °C} \quad \langle \bar{T}_{\text{sto}}^s \rangle = 80 \text{ °C}$$

d'où une énergie emmagasinée dans les 60 kg d'eau  $\langle R_{\text{sto}} \rangle = 14 \text{ MJ}$ . Cette énergie est récupérée directement par les surfaces captantes de l'élément de

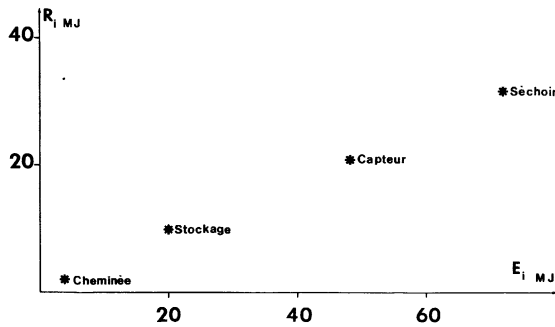


Fig. 9. — Energie récupérée par chaque élément ( $R$ ) en fonction de l'énergie incidente ( $E$ ).

[Splitting of the incident energy between the components of the dryer.]

stockage mais aussi prise à l'air chaud qui provient du capteur. Cette dernière partie a été évaluée à 4,4 MJ, en tenant compte des températures de sortie de capteur et d'entrée dans le caisson de stockage :

$$\langle \bar{T}_{\text{cap}}^s \rangle = 52 \text{ °C} \quad \langle \bar{T}_{\text{cai}}^e \rangle = 46,3 \text{ °C}.$$

Il reste donc 9,6 MJ captés directement au niveau de l'élément de stockage d'où un rendement moyen :  $\langle \eta_{\text{sto}} \rangle = 0,48$

— *caisson de séchage* :

$$\langle \bar{T}_{\text{cai}}^e \rangle = 46,3 \text{ °C} \quad \langle \bar{T}_{\text{cai}}^s \rangle = 38,3 \text{ °C}$$

soit une énergie cédée par l'air pour le séchage

$$\langle F \rangle_j = 6,2 \text{ MJ}$$

— *cheminée* :

$$\langle \bar{T}_{\text{che}}^e \rangle = 36,8 \text{ °C} \quad \langle \bar{T}_{\text{che}}^s \rangle = 38,3 \text{ °C}$$

d'où une énergie récupérée

$$\langle R_{\text{che}} \rangle = 4 \text{ MJ}$$

et un rendement moyen

$$\langle \eta_{\text{che}} \rangle = 0,50$$

— *séchoir* : le bilan énergétique du séchoir complet peut alors s'établir comme suit :

énergie incidente totale 72 MJ

énergie contenue dans le système 32,2 MJ

soit un rendement thermique global  $\langle \eta_{\text{sec}} \rangle = 0,45$ .

Si l'on s'intéresse à la distribution de l'énergie recueillie (Fig. 10) :

— 6,2 MJ, soit 19 % de l'énergie contenue dans le système, servant à l'évaporation de jour,

— 14 MJ, soit 43,5 % sont stockés,

— 12 MJ, soit 37,5 % sont perdus sous forme de rejets d'air chaud pour assurer le fonctionnement dynamique du système.

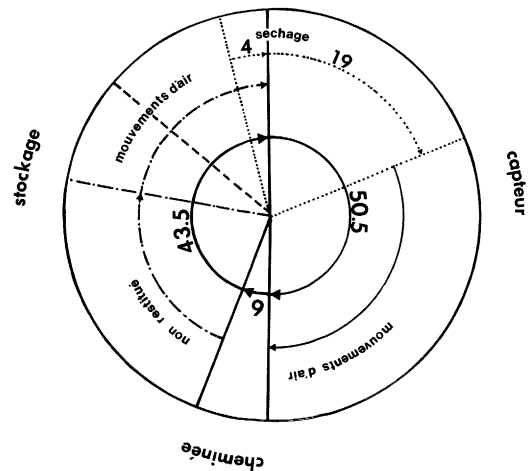


Fig. 10. — Répartition (en %) des 32,2 MJ contenus dans le système.

[Splitting (in %) of the total energy of the system (32.2 MJ)].

Dans le type de stockage envisagé pour le séchoir on a pu montrer [3] qu'environ 50 % de l'énergie stockée pendant le jour était perdue directement vers l'extérieur pendant la nuit. Le restant est transmis à l'air de circulation pour le séchage nocturne.

Pour évaluer la part d'énergie stockée servant effectivement à l'évaporation de nuit, on est amené à considérer le coefficient d'efficacité du caisson de séchage,  $e_{\text{sec}}$ .

Il est défini comme étant le rapport entre l'énergie réellement perdue pour évaporer une masse  $m_{\text{eau}}$  d'eau et la chaleur latente nécessaire à l'évaporation de la même masse d'eau.

Ce coefficient  $e$ , est propre à chaque dispositif, et dans notre cas :

$$e_{\text{sec}} \approx 1,3.$$

Ainsi dans l'exemple décrit, une masse  $\langle m_n \rangle_{\text{eau}}$  de 443 g a été évaporée pendant la nuit; l'énergie  $\langle F_n \rangle$  nécessaire à l'évaporation est donc de l'ordre de 1,3 MJ

$$\langle F_n \rangle = \langle m_n \rangle_{\text{eau}} \times \text{lat} \times e_{\text{sec}} .$$

On peut donc conclure que sur les 43,5 % de l'énergie contenue dans le système et qui a été stockée pendant le jour, 21 % est restitué de façon active pendant la nuit dont 4 % pour le séchage.

Ce résultat peut paraître bien faible, cependant l'énergie réservée au séchage nocturne est particulièrement appréciable : le produit sèche encore pendant toute la nuit, il n'y a pas de risque de détérioration, la migration de l'eau à l'intérieur du produit est facilitée.

C'est un facteur de qualité important qui contribue pour un point non négligeable à l'intérêt de ce dispositif.

Ainsi sur une période de 24 h, 7,5 MJ sont utilisés en moyenne pour évaporer de l'eau, soit 22 % de l'énergie contenue dans le système ou encore 10,5 % de l'énergie reçue.

**3.2.5 Remarque sur les performances idéales du séchoir.** — Une des critiques majeures que l'on pourrait formuler à propos du fonctionnement thermodynamique du séchoir concerne l'état de saturation de l'air servant à l'évaporation.

Lors des essais sur le terrain, pour lesquels la température ambiante était de l'ordre de 25 °C avec une humidité relative de 50 %, la masse de 770 kg d'air circulant dans le caisson de séchage absorbe sur vingt-quatre heures 2,4 kg d'eau environ. En sortie du caisson de séchage, l'air n'est donc pas saturé (l'humidité relative y est de l'ordre de 30 % à 38 °C). Ainsi le comportement dynamique de ce séchoir nous permet d'envisager des charges de produits frais nettement supérieures. Le cas limite, supposant un séchage isenthalpique jusqu'à saturation, permettrait d'évaporer 7 kg d'eau.

**3.3 EXPÉRIMENTATION EN LABORATOIRE.** — Nous avons étudié le système avec comme seule source le capteur muni de résistances électriques et nous avons fait une étude de sensibilité aux paramètres :

- puissance thermique injectée,
- dimension verticale de la cheminée,
- tirage,
- vent extérieur.

**3.3.1 Puissance thermique injectée.** — Compte tenu de la difficulté de faire des mesures de débits d'air en écoulements non isothermes de faible vitesse, nous avons pensé prendre comme référence, la mesure de la vitesse en un point seulement.

Deux stations de mesure ont été utilisées : l'une est située dans la cheminée à 80 % de sa hauteur et dans son axe, l'autre au centre du caisson de séchage. On a pu vérifier que les débits massiques obtenus étaient parfaitement corrélés entre eux (lorsqu'il n'y avait pas

d'apport d'air par la trappe de tirage) et que l'ordre de grandeur des vitesses mesurées correspondait bien à celui obtenu par un bilan calorifique au niveau des résistances chauffantes du capteur.

L'évolution du débit massique d'air dans le séchoir, en fonction de la puissance électrique injectée dans les résistances électriques du capteur, est donnée figure 11.

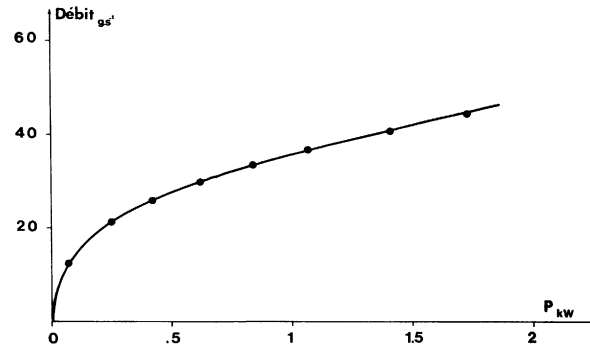


Fig. 11. — Evolution du débit-masse d'air traversant le séchoir en fonction de la puissance thermique injectée au niveau du capteur. Essais en laboratoire (cas sans tirage).

[Massflowrate of air traversing the dryer as a function of the collector input power. Laboratory experiment without draught.]

L'allure de cette courbe nous indique une forte croissance du débit aux faibles puissances, puis on tend vers une limite due à l'augmentation des pertes de charge dans le système complet. On retrouve les observations faites précédemment sur le module capteur et la cheminée.

**3.3.2 Hauteur de la cheminée.** — Dans les essais de laboratoire, nous avons fait varier la hauteur de la cheminée de 0 m (essais sans cheminée) à 2,7 m. Les résultats groupés dans le tableau I montrent qu'il y a peu d'intérêt à augmenter la hauteur de la cheminée au-delà de 1,2 m (les gains en vitesse ne deviennent plus significatifs). Par contre, on peut constater que l'utilisation de la cheminée est intéressante aux faibles puissances, le gain de vitesse peut atteindre alors 100 %. Aux fortes puissances, l'effet de cheminée est moins net, le gain n'est plus que de 25 %, pour une hauteur de 1,2 m.

Tableau I. — Influence de la hauteur de la cheminée.

[Effect of the height of the chimney.]

H <sub>m</sub>	P <sub>255w</sub> V̄ <sub>11m</sub>	(V̄ <sub>H</sub> /V̄ <sub>H,0</sub> ) <sub>che</sub>	P <sub>1415w</sub> V̄ <sub>23m</sub>
0	1		1
1.2	1.9		1.26
1.7	2		1.3
2.2	2.09		1.39
2.7	2.18		1.43

3.3.3 *Effet du tirage.* — L'influence de l'ouverture et de la fermeture de la plaque de tirage est donnée sur les figures 12 et 13 pour différentes puissances électriques utilisées. On peut constater que l'introduction d'une prise d'air entre le caisson de séchage et la cheminée a pour effet de repousser le niveau de saturation en vitesse. Ce phénomène est très marqué pour la cheminée, élément sur lequel agit directement l'appel d'air. Dans le caisson, l'augmentation de vitesse est importante. Elle a une influence directe sur les performances du séchage : l'évaporation de l'eau y est d'autant meilleure que l'on n'affecte pas le niveau de température en ouvrant le tirage (Fig. 13). La température de mélange, mesurée dans la cheminée, est bien évidemment influencée par l'apport d'air plus frais admis par la trappe de tirage.

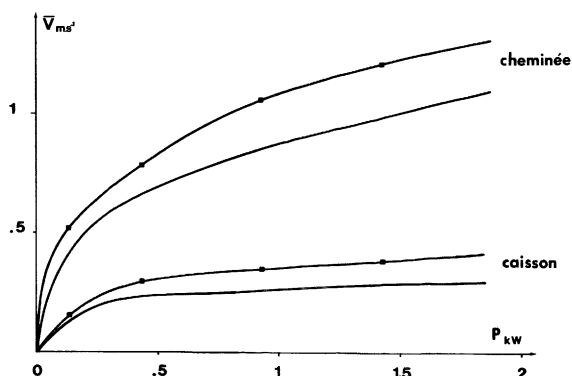


Fig. 12. — Evolution de la vitesse de l'air dans le caisson de séchage, en fonction de la puissance injectée au niveau du capteur. Essais en laboratoire (■) avec tirage, (—) sans tirage.

[Internal air-speed as a function of the collector input power. Laboratory experiment (■) with draught, (—) without draught.]

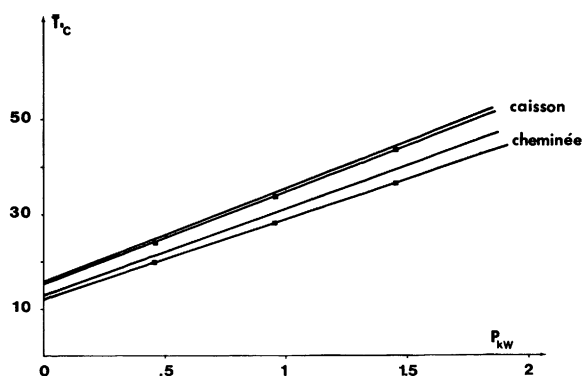


Fig. 13. — Evolution des températures en fonction de la puissance injectée au niveau du capteur (mêmes conditions que sur la Fig. 12).

[Internal temperature as a function of the collector input power (same cases as Fig. 12).]

3.3.4 *Influence du vent.* — L'étude de l'influence du vent ambiant, sur le comportement dynamique du

séchoir, a été faite en laboratoire, en créant une dépression à la sortie de la cheminée à l'aide d'un ventilateur et non un vent agissant sur toutes les parties ouvertes du séchoir. Nous pensons que dans la réalité le vent a peu d'influence au niveau des entrées du capteur à matrice poreuse, celles-ci étant placées au ras du sol. De même, la trappe de tirage, située à une hauteur intermédiaire, est abritée par le séchoir et par les panneaux d'occultation du caisson de stockage. Seule la sortie de la cheminée, placée à 3,8 m de hauteur, est soumise à l'effet direct du vent. Le tableau II présente les vitesses et les écarts de température mesurés dans la cheminée pour les situations extérieures envisagées au laboratoire (absence du vent extérieur et vent de 3,5 m/s). Il en résulte qu'à faible puissance incidente, on a un fonctionnement en régime de convection mixte ; la vitesse dans la cheminée dépend de la dépression créée en sortie. Par contre, à puissance plus importante, le thermosiphon n'est pas influencé par le vent extérieur ; c'est la convection naturelle qui reste le moteur essentiel du système [4].

Tableau II. — Influence de la vitesse du vent à la sortie de la cheminée.

[Effect of the wind-speed.]

P = 255w	$T_{che} - T_a$	$\bar{V}_{che}$	$V_v$
		$m/s$	
	5	.67	0
	5	.82	3.5
P = 1415w			
		$m/s$	
	27	.80	0
	27	.83	3.5

#### 4. Conclusion.

De l'analyse du comportement dynamique et thermique de chaque élément de ce séchoir, nous avons déduit que l'apport énergétique direct au niveau de la cheminée est toujours faible. Dans les conditions de fonctionnement sur le terrain, celle-ci se comporte comme un thermosiphon en régime de convection naturelle qui peut même évoluer vers la convection forcée sous l'effet d'un vent fort.

Nous constatons aussi que le stock joue pleinement son rôle à tout moment (rôle tampon pendant le jour, restitution nocturne), ceci étant dû à un dimensionnement correct et à une bonne orientation de ses surfaces captantes (E.S.O.). Le capteur à matrice poreuse contribue de façon importante à l'apport énergétique du système.

L'intérêt de ce séchoir réside dans le couplage de ces différents éléments. Dans de tels systèmes on ne maîtrise pas les vitesses d'écoulement d'air et les niveaux de température atteints. Ceux-ci s'établissent de façon



à réaliser un équilibre entre les forces de poussée d'Archimède, dues à la présence de fluide chaud dans le système que l'on peut exprimer en terme d'une pression génératrice de mouvement, et des pertes de pression résultant des frottements, des contractions ou des élargissements de conduits et des traversées de matériaux poreux.

L'optimisation d'un tel système consiste à obtenir la vitesse d'air la plus élevée possible (pour améliorer l'évaporation) pour un niveau de température donné qui est imposé par l'apport énergétique extérieur et le degré d'isolation thermique du séchoir.

La pression motrice est directement liée à la hauteur du séchoir et à un écart entre une masse volumique moyenne d'air dans le séchoir et la masse volumique extérieure. Une augmentation de débit dans le séchoir s'obtient donc soit par un accroissement de la hauteur (à ensoleillement donné) soit par une augmentation de l'ensoleillement et de l'évaporation entraînant une diminution de masse volumique.

Cependant les pertes de charge ne sont pas une fonction linéaire de la vitesse, celles-ci augmentent d'autant plus vite que la vitesse est grande.

On obtient donc un effet de saturation dynamique du séchoir, qui se caractérise par le fait qu'au-delà d'un certain seuil énergétique ou d'une certaine hauteur de cheminée, tout apport supplémentaire ne se traduit pas par une augmentation sensible de vitesse, mais sert à vaincre l'accroissement important des pertes de charge. C'est alors que l'effet de tirage permet d'obtenir de meilleures performances :

— L'idée de la trappe revient à coupler, tout en gardant une hauteur globale maximale, plusieurs thermosiphons. Chacun de ces thermosiphons se trouvant à la limite de la saturation.

— Si l'on raisonne en pertes de charges régulières, dans un conduit, le fait de créer une ouverture où il y a aspiration d'air, revient à diminuer la longueur du

conduit et donc les pertes de charges, ce qui autorise une vitesse de débit plus importante.

#### Nomenclature

$T$	température °C
$\psi$	humidité relative %
$E$	éclairage kW, kJ
$P$	puissance injectée kW
$R$	énergie fournie par le module considéré kJ
$F$	énergie d'évaporation kJ
$H$	hauteur de la cheminée m
$V$	vitesse $m s^{-1}$ , $cm s^{-1}$
$h$	heure de la journée h
$m$	masse kg
$D$	débit masse $kg s^{-1}$
$C_p$	chaleur spécifique $kg J kg^{-1} °C^{-1}$
Lat	chaleur latente $kg J . kg^{-1}$
$e_{sec}$	facteur d'efficacité du séchoir %
$\eta$	rendement thermique du module considéré %
$\langle \rangle$	valeur moyenne sur une journée
—	valeur moyenne d'espace.

#### Indices

i	incident, initial
0, 30, 90	inclinaison sur l'horizontale
Est, Sud, Ouest	orientation
cap	capteur
sto	stockage thermique
cai	caisson
che	cheminée solaire
sec	séchoir solaire dans son ensemble
a	ambiant
v	vent
épais, mince	relatif à l'épaisseur de la matrice poreuse
j, n	jour, nuit
e, s	paramètre d'entrée, paramètre de sortie
pro	produit
eau	eau

} relatif aux masses

#### Bibliographie

- [1] PUIGGALI, J. R., VARICHON, B., *First prototypes for small fruit and vegetable country solar dryers*. Drying'82, A. S. Mujumdar Editor, 1982, p. 208-213.
- [2] PUIGGALI, J. R., LARA, M. A., *Some experiments about small country solar dryers*. Third International Drying Symposium, vol. 1, J. C. Ashworth Editor, 1982, p. 390-400.
- [3] LARA, M. A., *Identification des processus de séchage et énergie solaire*. Produits agro-alimentaires. Thèse d'Université, octobre 1981, Bordeaux.
- [4] DALBERT, A. M., PENOT, F., PEUBE, J. L., *Convection naturelle dans un canal vertical chauffé à flux constant*. *Int. J. Heat Mass Trans.* 4 n° 9 (1981) 1463-1473.