

## Etude du Bilan d'Énergie et de Masse d'un Séchoir de Type Serre Applications au Séchage des Produits Agro-alimentaires

S. El Mokretar<sup>1</sup>, R. Miri<sup>2</sup> et M. Belhamel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Développement des Énergies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

<sup>2</sup> Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés, U.S.T.H.B., B.P. 32, Bab Ezzouar, El-Alia, Alger

**Résumé** - Cette étude porte sur le bilan énergétique d'un séchoir solaire de type serre et le relevé temporel des paramètres suivants : • les différentes composantes du rayonnement solaire, • le taux d'humidité relative et les valeurs de température de l'air asséchant dans notre modèle, • Les pertes de masse, par convection naturelle, de certains produits agroalimentaires.

Le séchoir expérimental a été conçu et réalisé au C.D.E.R. (Alger). Il comprend un système de stockage d'énergie composé d'un lit de galets. Les parois latérales et le plancher sont isolés thermiquement. Deux inclinaisons sont envisagées pour les vitrages: un vitrage fortement incliné (55°) maximisant la captation de l'énergie solaire pendant la période froide, et un autre, incliné de 15° permettant d'optimiser la transmission du rayonnement en saison estivale.

La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux d'énergie prend en compte, comme conditions initiales, les caractéristiques du climat extérieur. Un système de 06 équations différentielles du premier ordre régissant le fonctionnement du séchoir serre est résolu par la méthode numérique de Runge - Kutta au 4<sup>ème</sup> ordre. Les coefficients d'échange, par rayonnement et convection, sont déterminés en fonction du temps. L'écart maximum entre les résultats théoriques obtenus, comparé à ceux relevés expérimentalement est inférieur à 20 %.

**Abstract** - In the present paper, we discussed an energy balance of a greenhouse type solar drier and the measurement of the following parameters according to time : • The various components of the solar radiation, • The relative humidity rate and temperature values of the draining air in our model, • The drying rate of certain agro alimentary products obtaining by natural convection.

The experimental drier was designed and realised at the C.D.E.R. (Algiers). It includes an energy storage system made of a bed of rollers. The side walls and the floor are insulated thermally. Two slopes are considered for the covers: a strongly tilted glazing (55°) maximizing the collecting of solar energy during the cold period, and another, 15° tilted, allowing to optimize the transmission of the radiation in summer season.

The mathematical modelling based on the method of the total energy assessments taking into account, like initial conditions, the external climate characteristics. A system of six first order differential equations governing the operation of the drier greenhouse is solved by the Runge - kutta numerical method to the 4<sup>th</sup> order. The heat transfer coefficients, by radiation and convection, are given according to time. The maximum gap between the theoretical and experimental results is lower than 20 %.

**Mots clés:** Rayonnement solaire - Séchoir serre - Humidité - Température - Convection naturelle - Bilan d'énergie - Cinétique de séchage.

### 1. INTRODUCTION

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé à la fois dans le monde rural à travers le séchage des produits agricoles, viandes ... et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire, le textile, etc. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité de la nourriture entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés.

La saveur et la majeure partie de la valeur nutritive est conservée et concentrée. Les produits séchés peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse

environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter.

Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection naturelle. Evidemment la quantité de soleil et d'humidité affectera les performances du séchoir. Du point de vue de la conception, c'est une technologie simple cependant le séchage solaire est plus complexe que l'on pourrait imaginer.

Les séchoirs solaires se divisent en deux modèles, de type directs et indirects. Aussi, ces systèmes peuvent être actifs ou passifs.

Il y a trois facteurs principaux qui affectent le séchage de la nourriture : la température, le débit et l'humidité de l'air et ils sont dépendants. Il y a une diversité d'opinion sur les températures idéales de séchage, mais tous les avis examinés s'accordent sur des températures de séchage entre 35 et 82 °C et de 43.5 à 60 °C sont les plus communes.

Le débit de l'air, en convection naturelle, est proportionnelle à la surface de l'ouverture d'échappement, à la taille du capteur (de l'entrée de l'air à la sortie de l'air) et à la température de la plaque absorbante. Cependant le débit de l'air est également inversement proportionnelle à la température dans un séchoir solaire. Dans le meilleur des cas, le but recherché est d'avoir les deux à la fois : la température et le débit de l'air élevés. Ceci peut être difficile à réaliser dans un séchoir solaire.

La vitesse de l'air dans un capteur à convection naturelle est affectée par la distance entre l'entrée et la sortie de l'air, la température à l'intérieur du séchoir et la section d'échappement de l'air. Plus la longueur, la température et la section d'échappement sont grandes, plus la vitesse est grande.

L'humidité relative est le troisième facteur affectant le séchage solaire de la nourriture. Plus l'humidité relative est haute, plus le séchage durera. Chaque augmentation de 15 °C de la température double la capacité de l'air à absorber de l'humidité [5]. Dans les régions humides, le séchage prend plus de temps que dans les régions sèches. La température obtenue dans un séchoir sera affectée par plusieurs facteurs: la surface de la couverture transparente orientée vers le soleil, l'isolation, l'étanchéité à l'air, la surface du passage d'échappement, et de la température ambiante. La surface de la couverture transparente orientée vers le soleil est une décision importante de conception.

Dans ce travail, nous entreprenons l'étude du bilan d'énergie et de masse d'un modèle expérimental de séchoir solaire, afin d'en déterminer les différents paramètres intensifs, compte tenu des conditions ambiantes du site donné.

## 2. ETUDE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental présenté, sur la figure 1, comprend essentiellement :

- un séchoir solaire de type direct dont nous nous proposons d'étudier les performances. Il a été conçu et réalisé au C.D.E.R (Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah) et utilisé pour le séchage des produits agroalimentaires. C'est un système qui transforme l'énergie solaire en énergie calorifique, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur qui est l'air asséchant. Il est conçu de manière à ce que ses composants et sa forme géométrique soient compatibles avec un modèle théorique simple. Le grand axe du dispositif est parallèle à la direction Est-Ouest. La couverture du modèle exposé au sud géographique et composée en verre ordinaire d'épaisseur 4 mm, comprend deux parties : un vitrage fortement incliné (55°), maximisant la captation durant la période hivernale et un vitrage faiblement incliné (15°) maximisant la captation durant la période estivale. Les parois latérales et verticales, ainsi que le plancher sont isolés thermiquement. Il comprend, en outre, un système

de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux (granite) peints en noir. Aussi, le modèle est pourvu d'une bâche permettant de recouvrir la paroi vitrée du séchoir en période nocturne pour éviter les déperditions de chaleur.

- les appareils de mesure de l'humidité, du rayonnement et de la température, reliés à un enregistreur automatique de données.
- une balance de précision.

L'étude expérimentale, entreprise sur ce séchoir, consiste en la mesure systématique :

- du flux solaire global reçu par le vitrage;
- des températures des couvertures vitrées, des différentes parois, de l'air intérieur, du plancher (lit de cailloux) et du milieu ambiant (extérieur) du séchoir;
- de l'humidité relative à l'intérieur de la serre;
- des pesées systématiques des produits séchés.



Fig. 1: Séchoir expérimental

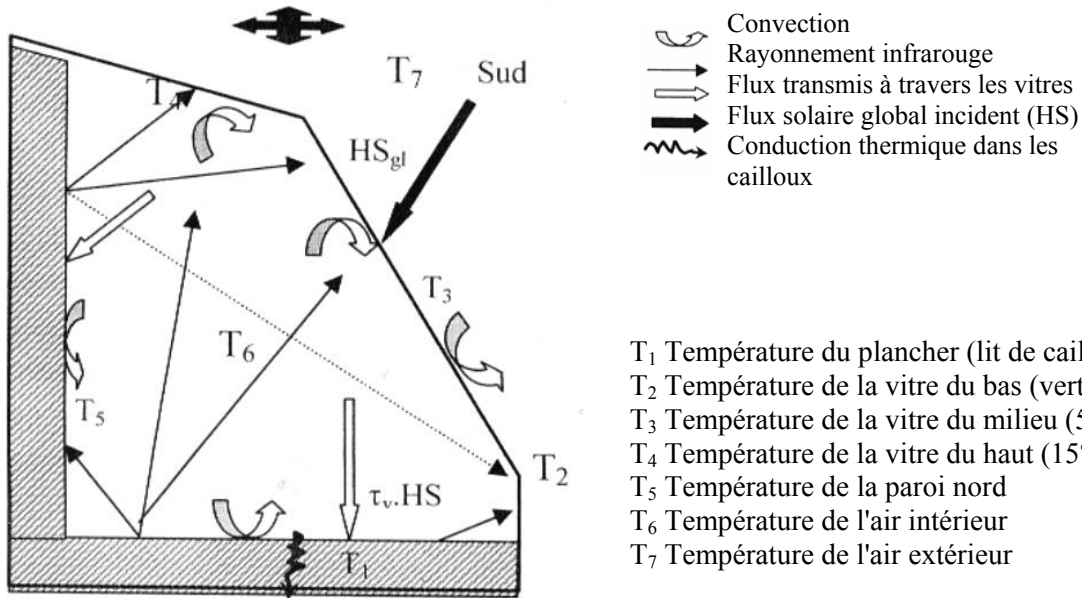
### 3. ETUDE THEORIQUE

La modélisation mathématique consiste, quant à elle, à traduire les phénomènes physiques (transfert de chaleur et de masse) par une série d'équations mettant en évidence l'état énergétique des différents sous-systèmes constituant le modèle (Fig. 2).

#### 3.1 Hypothèses simplificatrices

- ◆ Les parois latérales étant réfléchissantes et isolées, les échanges de chaleur sont supposés unidirectionnels verticalement.
- ◆ La surface supérieure du lit de galets est considérée comme étant uniforme.
- ◆ Les températures du sol, de la paroi nord, des vitrages et de l'air intérieur sont supposées uniformes.
- ◆ La conduction dans la paroi vitrée est négligeable au niveau de son épaisseur.
- ◆ Les réflexions multiples à l'intérieur de la vitre et de la serre sont négligées.
- ◆ L'air de la serre est transparent du point de vue radiatif.
- ◆ Le flux solaire diffus est considéré isotrope.

### 3.2 Modes de transfert de chaleur dans le séchoir



### 3.3 Calcul des composantes du rayonnement solaire [1-4]

#### 3.3.1 Rayonnement solaire direct

Il peut être calculé par la formule empirique suivante :

$$HSI = I_0 \cdot C \cdot A \cdot \exp(-B / \sin h) \cdot \cos(i)$$

où  $C = 1 + 1,0034 \cos[30(m - 1) + d]$ .

#### 3.3.2 Rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus HSD est la partie du rayonnement diffusée par l'atmosphère. C'est la somme de deux composantes : la première est émise par la voûte céleste  $\Phi_1$  et la seconde est émise par le sol  $\Phi_2$ .  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  sont données par les formules empiriques suivantes:

$$\Phi_1 = \Phi_0 (1 + \cos\beta) \cdot \frac{S_v}{2}$$

$$\Phi_2 = A \cdot (I_0 \cdot \sin h + \Phi_0) \cdot \left[ \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \right] \cdot S_v$$

où :  $\Phi_0 = I_0 \cdot C \cdot \sin h \cdot \left( 0,271 - 0,2939 \cdot \exp\left(-\frac{B}{\sin h}\right) \right)$

donc:  $HSD = \Phi_1 + \Phi_2$

#### 3.3.3 Rayonnement solaire global

Le rayonnement solaire global HS reçu par le sol est la somme des deux flux lumineux, direct et diffus.

$$HS = HSI + HSD$$

### 3.4 Système d'équations

#### *Bilan d'énergie au niveau du plancher (sol)*

$$C_1 \cdot (dT_1/dT) = \tau \cdot \alpha_s \cdot S_s \cdot HS(1) - Q_{cond} - Q_{16} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{r14} - Q_{r15}$$

avec :  $C_i = (\rho C_p)_i \cdot V_i$  ,  $Q_{ij} = h_{ij} \cdot S_i \cdot \Delta T_{ij}$  et  $Q_{r_{ij}} = hr_{ij} \cdot \Delta T_{ij}$

#### *Bilan d'énergie au niveau des vitrages*

$$C_2 \cdot (dT_2/dT) = \alpha_v \cdot S_{v1} \cdot HS(2) + Q_{62} + Q_{12} + Q_{r32} + Q_{r42} + Q_{r52} - Q_{27}$$

$$C_3 \cdot (dT_3/dT) = \alpha_v \cdot S_{v2} \cdot HS(3) + Q_{63} + Q_{13} - Q_{r32} + Q_{r43} + Q_{r53} - Q_{37}$$

$$C_4 \cdot (dT_4/dT) = \alpha_v \cdot S_{v3} \cdot HS(4) + Q_{64} + Q_{r14} - Q_{r42} - Q_{r43} + Q_{r54} - Q_{47}$$

#### *Bilan au niveau de la paroi nord*

$$C_5 \cdot (dT_5/dT) = \tau \cdot \alpha_n \cdot S_n \cdot HS(5) + Q_{r15} - Q_{r52} - Q_{r53} - Q_{r54} - Q_{56}$$

#### *Bilan au niveau de l'air intérieur*

$$(\rho C_p)_6 \cdot V_6 \cdot (dT_6/dT) = Q_{16} + Q_{56} - Q_{62} - Q_{63} - Q_{64} - Q_{67}$$

avec :  $Q_{67} = (\rho C_p)_6 \cdot V_6 \cdot R_s \cdot (T_6 - T_7)$

## 4. INTEGRATION NUMERIQUE

Le système d'équations, régissant le fonctionnement du séchoir serre, se compose de six (06) équations différentielles du premier ordre. Pour sa résolution, parmi les méthodes numériques, celle de Runge-Kutta au 4<sup>ème</sup> ordre est utilisée [14, 15].

A partir de la valeur initiale  $y(x_0) = y_0$  sont déduits, de pas en pas,  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ . L'erreur systématique de troncature est de l'ordre de  $h^5$ , où  $h$  est le pas de calcul.

## 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1 Intensité du rayonnement solaire

La figure 3 illustre l'évolution des composantes incidente, diffuse et globale du rayonnement solaire. L'intensité lumineuse incidente (directe) augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur maximale théorique de  $780 \text{ W/m}^2$  pour un relevé expérimental de  $818 \text{ W/m}^2$  à 12h TSV correspondant à 13h local, puis chute jusqu'à atteindre une valeur nulle aux environs de 19h local.

Pour ce qui est du rayonnement diffus, nous pouvons voir qu'il est régulièrement réparti autour de la valeur moyenne de  $105 \text{ W/m}^2$ , soit 20 % de l'éclairement énergétique total.

Etant le résultat de la superposition entre le diffus et le direct, la distribution du rayonnement global (Fig. 4) atteint une valeur théorique maximale de  $884 \text{ W/m}^2$  tandis que le relevé expérimental indique, pour cet ensoleillement, une valeur maximale de  $922 \text{ W/m}^2$ .

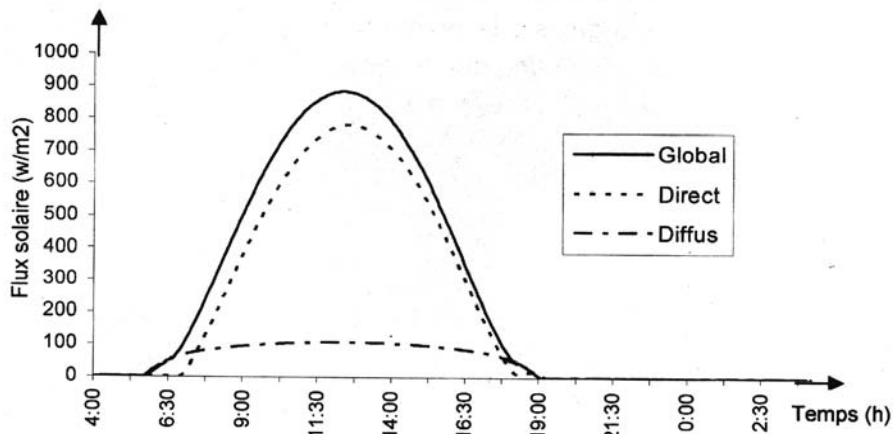


Fig. 3: Variation du rayonnement solaire théorique (août /02)

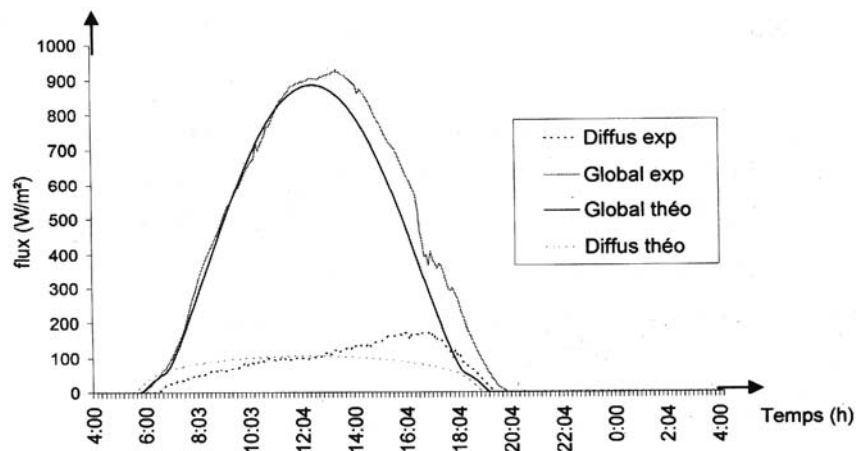


Fig. 4: Evolution théorique et expérimentale du rayonnement solaire (flux global et diffus)

Une similitude entre les deux courbes théorique et expérimentale avec un écart maximum inférieur à 10 % est enregistrée.

## 5.2 Variation de la température des différents éléments du séchoir serre

Les températures des différents éléments du modèle sont successivement représentées sur les figures 5 et 6. L'allure des courbes est la même pour chaque élément et suit d'une manière systématique l'évolution de l'énergie solaire globale. En effet, les températures augmentent avec le rayonnement solaire jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales au environ de 13h local, puis chutent d'une façon assez brusque jusqu'aux environs de 19h local.

En période nocturne, l'écart positif de température entre les milieux intérieur et extérieur avoisine les 3 °C pour le modèle théorique et atteint la valeur de 7 °C, pour les valeurs expérimentales. Le lit de galets dont la température se stabilise, au plus bas de sa valeur, autour de 40 °C assure un apport en chaleur sensible au modèle expérimental et permet de maintenir les différents éléments du système et tout particulièrement l'air intérieur à des températures supérieures à celle du milieu extérieur.

La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales témoigne d'un accord satisfaisant avec un écart maximum de 20 %. Ces écarts de la température sont principalement dus, à notre sens, à la détermination plus ou moins exacte, à partir de relations empiriques, des

coefficients d'échange, au fait de négliger les quantités de chaleur perdues par les différentes parois supposées, parfaitement isolées et aux erreurs liés aux instruments de mesure.

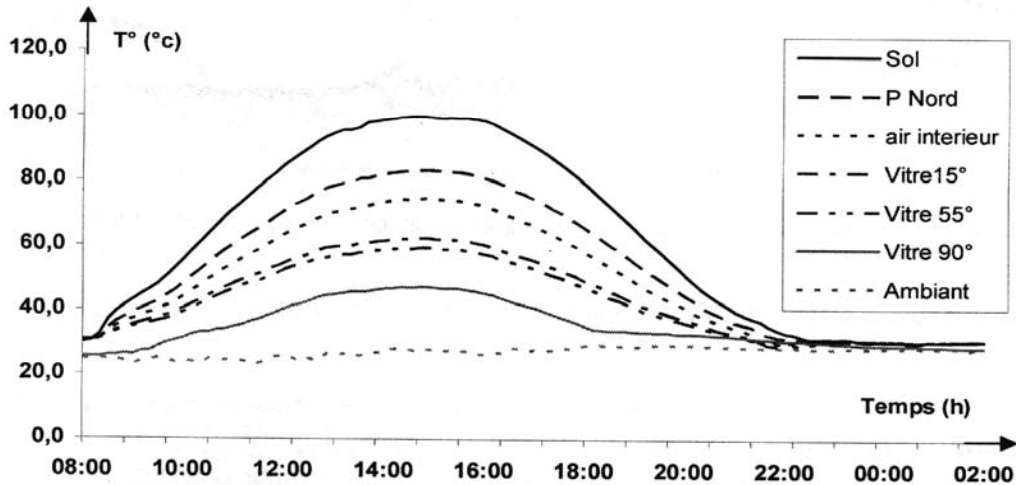


Fig. 5: Variation des températures théoriques du séchoir

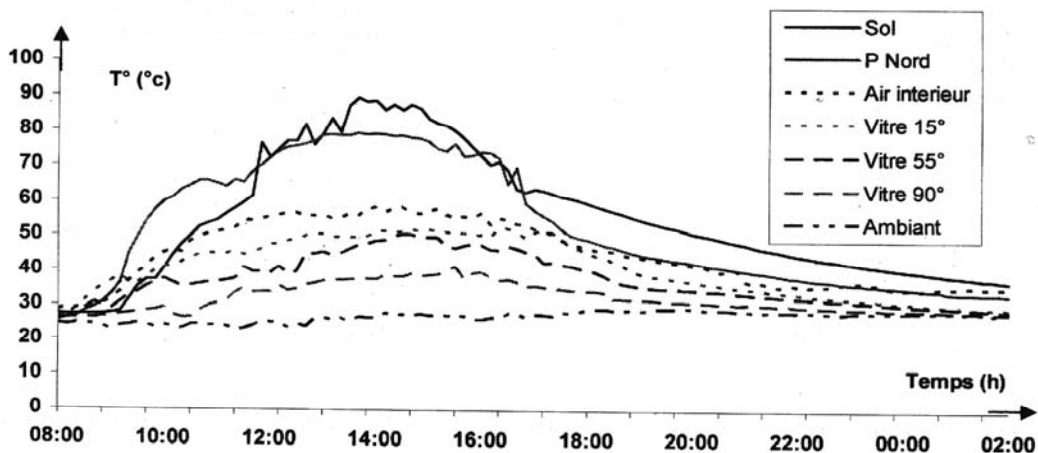


Fig. 6: Variation des températures expérimentales du séchoir

### 5.3 Evolution des coefficients d'échange convectif et radiatif [12, 13]

L'évolution des coefficients d'échanges convectifs (Fig. 7), calculés à partir de la valeur du nombre de Nusselt, varient entre 2,5 et 6,5  $W/m^2\text{°C}$  en période diurne, puis chutent brusquement vers vingt heures pour se stabiliser autour de la valeur de 2  $W/m^2\text{°C}$  pendant la période nocturne.

Il existe une certaine constance des taux d'échanges de chaleur dus à des gradients de températures constants entre l'air intérieur et les différentes parois du séchoir. Les valeurs des coefficients d'échanges radiatifs (Fig. 8), quant à eux, s'étalonnent entre 3 et 13  $W/m^2\text{°C}$ . D'une manière générale, les valeurs des coefficients d'échange par rayonnement sont plus importantes que celles des coefficients convectifs.

L'absorbant (lit de cailloux), par le biais de sa surface supérieure et la paroi nord (à un degré moindre) sont la principale source de chaleur responsable du réchauffement de l'air à l'intérieur du séchoir serre.

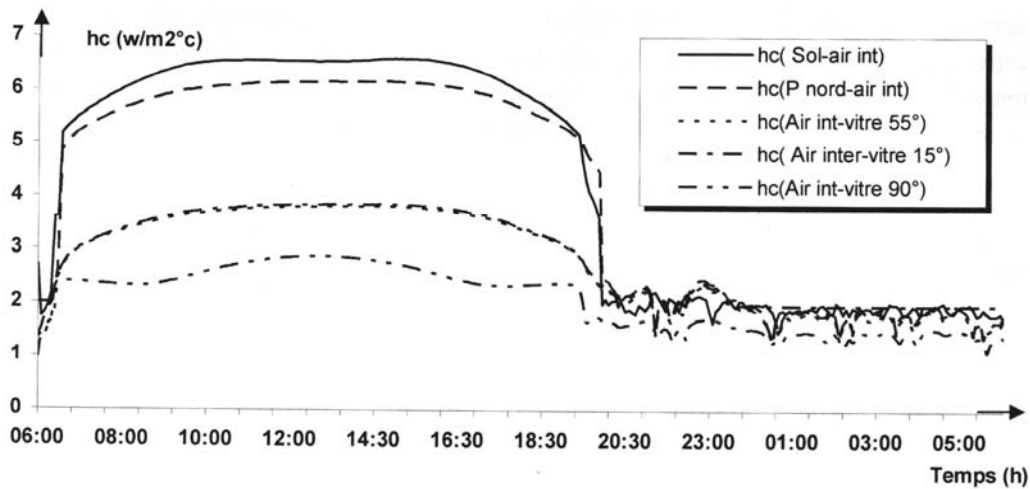


Fig. 7: Evolution des coefficients d'échange convectif dans le séchoir

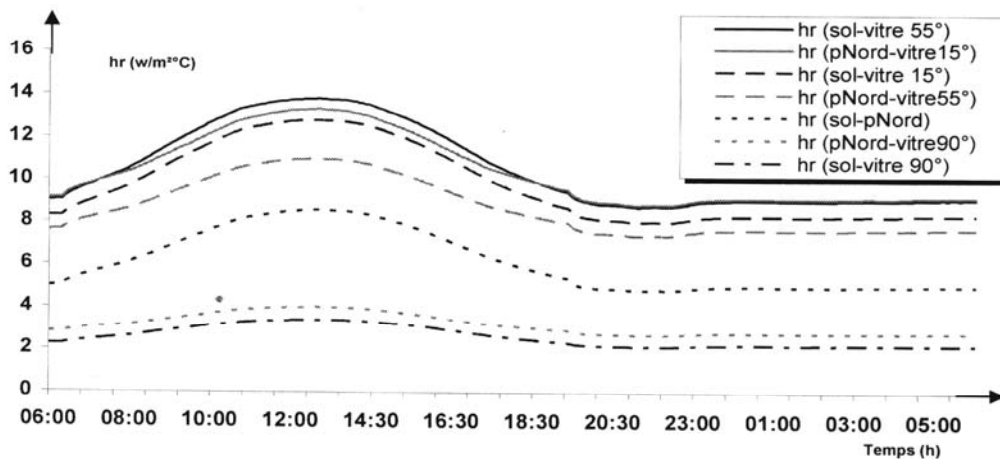


Fig. 8: Evolution des coefficients d'échange radiatif dans le séchoir

#### 5.4 Variation de l'humidité relative de l'air intérieur du séchoir et du milieu extérieur

L'évolution de l'humidité relative de l'air varie d'une façon opposée à l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du séchoir [Fig. 9]. En effet, l'augmentation brusque de la température de l'air, par effet de serre, engendre une chute rapide de son humidité relative. Donnée en pourcentage (%) et indiquée par  $\varphi$ , elle est représentée dans le diagramme de Mollier - Ramzine par des courbes concaves. La courbe 100 % ou courbe de saturation, limite le diagramme.

L'humidité relative à l'intérieur du modèle expérimental atteint son minimum (12 %) à 13h locales, heure où la température atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum. En période nocturne, le surplus d'énergie stocké pendant la journée par le lit de galets est restitué à l'air progressivement et ce jusqu'au levé du jour. Cette chaleur permet donc de maintenir la température de l'air intérieur à des valeurs supérieures à celles de l'ambiance et par conséquent à celle du point de rosée : un dépôt d'humidité sur le produit à sécher est donc écarté. Ces conditions de température et d'humidité permettent de continuer le processus de séchage en période nocturne mais avec une vitesse nettement plus faible.



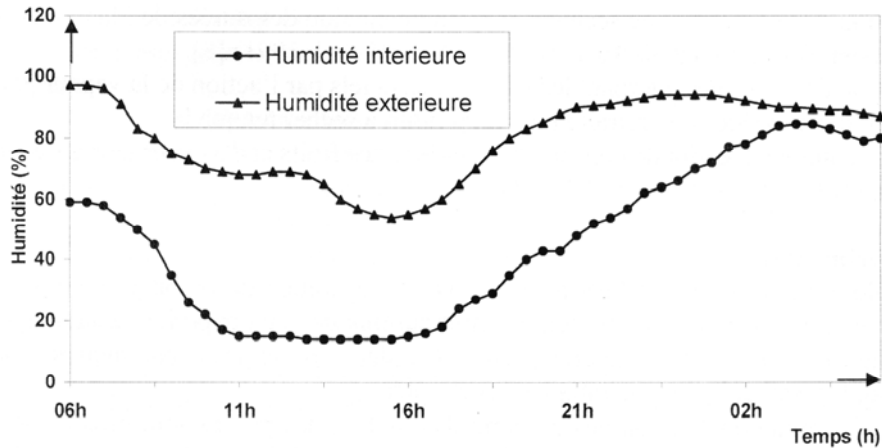


Fig. 9: Variation de l'humidité relative de l'air extérieur et ambiant

## 5.5 Cinétique de séchage de produits agro-alimentaires

Cette partie du travail est consacrée au séchage de différents produits agroalimentaires. Le but essentiel de cette partie expérimentale est de suivre l'évolution des pertes de masse des produits séchés afin de déterminer leurs vitesses de séchage.

### 5.5.1 Conditions de l'expérimentation

L'étude expérimentale s'est déroulée du 07/07 au 20/09/02. Les mêmes appareils que ceux décrits précédemment ont été utilisés, en plus d'une balance de précision (0.1 g) pour la pesée des produits à sécher. La vitesse de l'air à l'entrée du séchoir, mesurée à l'aide d'un anémomètre, est restée pratiquement constante tout le long de l'expérience, sa valeur variant entre 1.2 et 2 m/s. Les valeurs moyennes de la température et du rayonnement à l'intérieur du dispositif sont respectivement :  $T_m = 46 \text{ °C}$  et  $HS_\tau = 653 \text{ W/m}^2$ .

#### • Produits séchés

L'étude du séchage consiste à déterminer les courbes de perte d'humidité relative et de vitesse de séchage des produits suivants, à savoir : menthe verte, verveine, laurier (*Lauris nobilis*), raisin (variété dattier), prune, banane, figue, datte, poivron.

### 5.5.2 Pré traitements des produits avant séchage

- **Découpage** - Le découpage facilite le séchage de certains produits (bananes découpées en rondelles), ce qui réduit le temps nécessaire à la diffusion de l'eau et augmente la surface totale d'évaporation. Cette opération est indispensable pour tous les produits épais, sinon le séchage se fait trop lentement [6].

- **Blanchiment** - C'est une brève pré cuisson à l'eau ou à la vapeur. Nous utilisons le blanchiment pour la stabilité physico-chimique ultérieure des produits végétaux [7]. Le blanchiment permet :

- d'attendrir le produit, de réduire les réactions d'oxydation et d'éviter le brunissement;
- la destruction des enzymes responsables des altérations, en particulier de la coloration;
- l'amélioration de la cinétique de séchage par l'augmentation des durées de blanchiment et la réduction du temps de séchage de 10 à 20 % [8];
- l'inactivation des enzymes alternant les tissus superficiels par l'action de la vapeur [9].

Il existe d'autres procédés de prétraitement du produit à sécher, tel que la sulfuration, recommandée afin de conserver la couleur des fruits et d'assurer leur durée de conservation [10].

### 5.5.3 Expérimentation

Après le traitement des produits à sécher, vient l'opération du séchage qui consiste, au préalable, à les étaler sur la claie du séchoir. Tout au long de cette expérience, la température et l'humidité relative de l'air intérieur sont les deux principaux paramètres dont les évolutions sont systématiquement enregistrées et notées.

Pour la détermination des courbes de perte d'humidité, des pesées sont effectuées durant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits, ce qui indique sa déshumidification et la fin de l'opération. L'humidité initiale est déduite à la fin de l'opération de séchage, par la différence entre la masse initiale et finale du produit considéré.

Les courbes de perte d'humidité présentées ci-après, illustrent, en réalité, les pertes d'humidité relative qui représentent le pourcentage de la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à sa masse totale ou humide.

Cette humidité relative est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{\text{masse d'eau contenue dans le produit}}{\text{masse totale du produit}} \quad [\text{g eau / g produit}]$$

La vitesse de séchage, déduite à partir des pertes d'humidité, est donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad [(\text{g eau / g produit}) \text{ h}^{-1}]$$

### 5.5.4 Présentation des résultats

Sont représentées, sur les figures qui suivent, les évolutions de perte de masse (ou de l'humidité relative qui s'exprime en kg.eau / kg.matière séchée) et de vitesse de séchage d'un échantillon de trois catégories de produits : la première, la menthe, représente un exemples de produits en feuille. Ils sont considérés contenir une faible teneur en humidité. La deuxième catégorie est caractéristique des produits gorgés d'eau (raisin, par exemple) et la troisième, à humidité profonde, contient une haute concentration de sucre (banane).

Le tableau 1 résume, le temps de séchage et le taux de perte de masse de tous les produits séchés dans le séchoir serre. Le temps, compté à partir du début de l'opération, où l'humidité relative (ou la masse totale) ne varie plus, indique la fin du séchage du produit. Il reste bien entendu que chaque produit gardera, après le séchage, un certain taux humidité évalué par étuvage.

#### • *Variation de l'humidité relative*

Pour tous les produits sélectionnés, la diminution du taux de l'humidité représenté par les figures 10-12, est bien apparente et signifie que le produit perd de son poids (existence d'une évaporation d'ou un transport de masse).

#### • *Variation de la vitesse de séchage* (Fig. 13-15)

Les courbes de vitesse de séchage se distinguent en général par les trois phases suivantes :

- Phase transitoire de mise en température du produit à sécher (assez courte)
- Phase à vitesse constante (évaporation de l'eau à l'état liquide en surface du produit)

- Phase à vitesse décroissante (elle intervient au moment où la surface du solide est sèche, l'eau arrive à l'état liquide à la surface après cheminement dans le réseau capillaire du solide et migre entièrement à l'état vapeur).

Ces trois phases ne sont pas présentes pour tous nos produits. Deux d'entre elles sont bien apparentes : phase à vitesse constante et phase à vitesse décroissante.

Il est à noter que la phase à vitesse décroissante est partagée en deux parties constantes, c'est-à-dire : décroissante rapide et décroissante lente jusqu'à stabilisation.

La première phase décrit un mouvement rapide de la migration de l'eau de l'intérieur dans le réseau capillaire du fruit vers sa surface extérieure.

La seconde phase, qui est décroissante, est propre au produit biologique (structure, composition chimique, teneur en eau). C'est la partie la plus lente décrivant l'évaporation de l'eau des capillaires [10, 12].

Des zones de fluctuation apparentes apparaissent sur les figures présentées. Cela peut être expliqué par les modifications biologiques, par l'infiltration de l'air humide nocturne dans notre séchoir (imperfection de l'étanchéité) ou bien par l'existence des micros-organismes, ce qui n'a pas empêché l'évaporation de l'eau.

### 5.5.1 Variation de l'humidité relative de quelques produits séchés

#### • Menthe

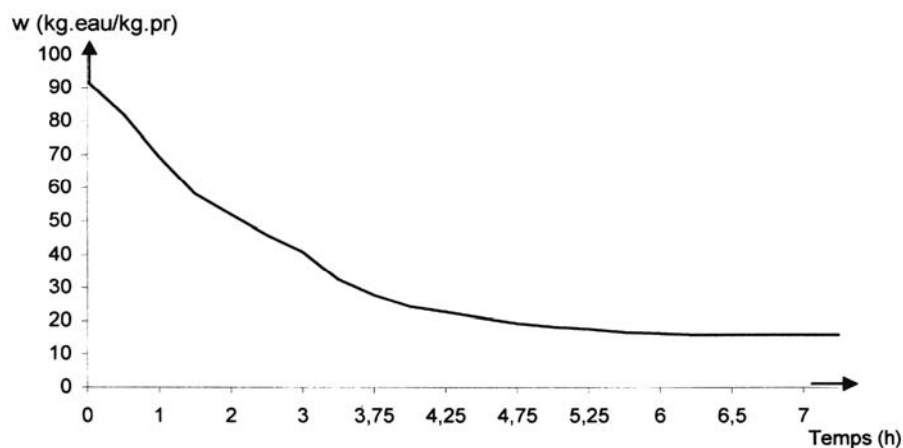


Fig. 10: Variation de l'humidité relative - Menthe

#### • Raisin

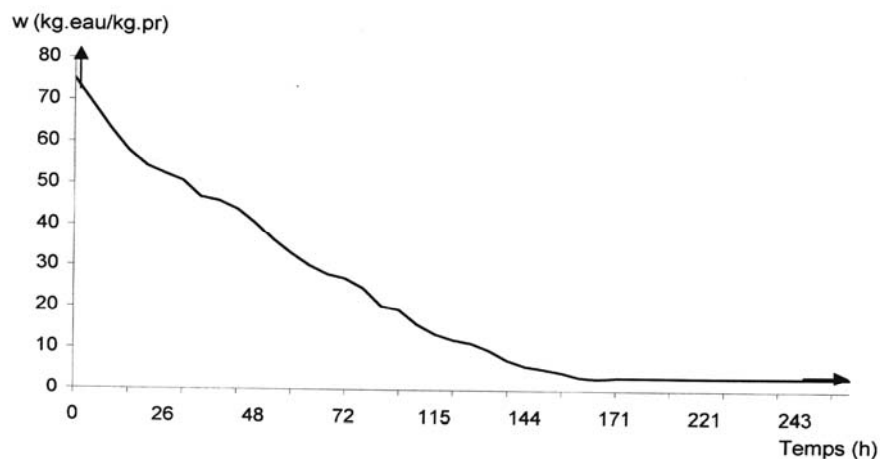


Fig. 11: Variation de l'humidité relative - Raisin

• **Banane**

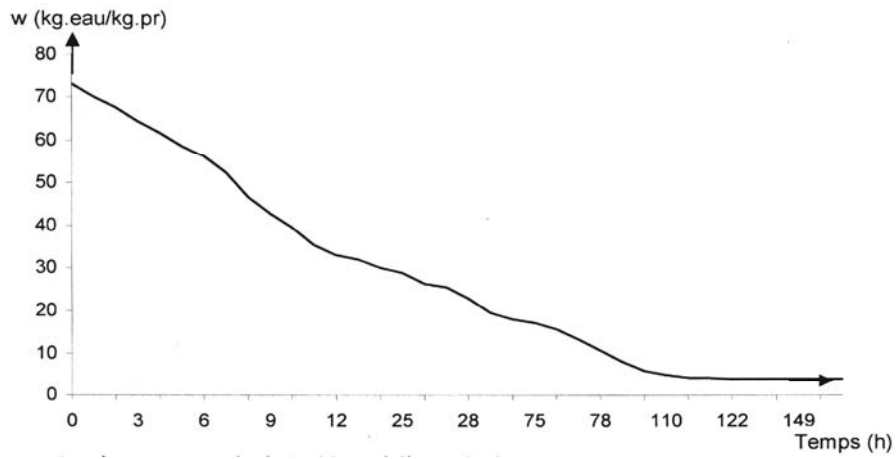


Fig. 12: Variation de l'humidité relative - Banane

5.5.2 Vitesse de séchage de quelques produits séchés

• **Menthe**

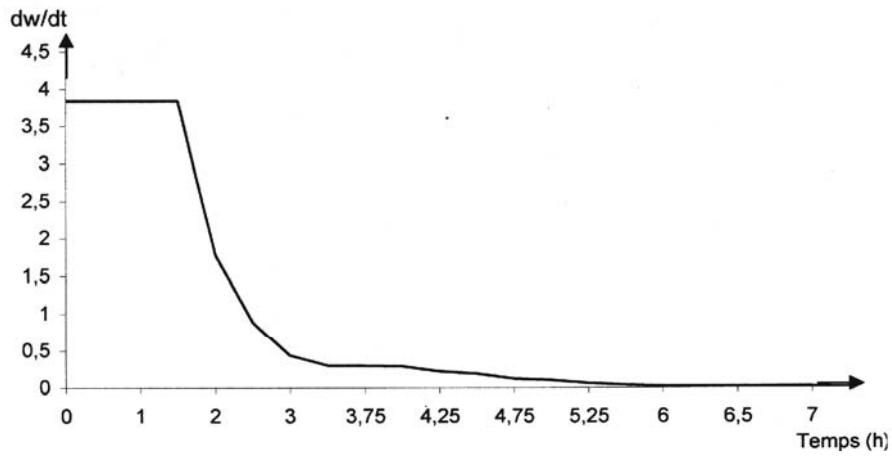


Fig. 13: Variation de la vitesse de séchage - Menthe

• **Raisin**

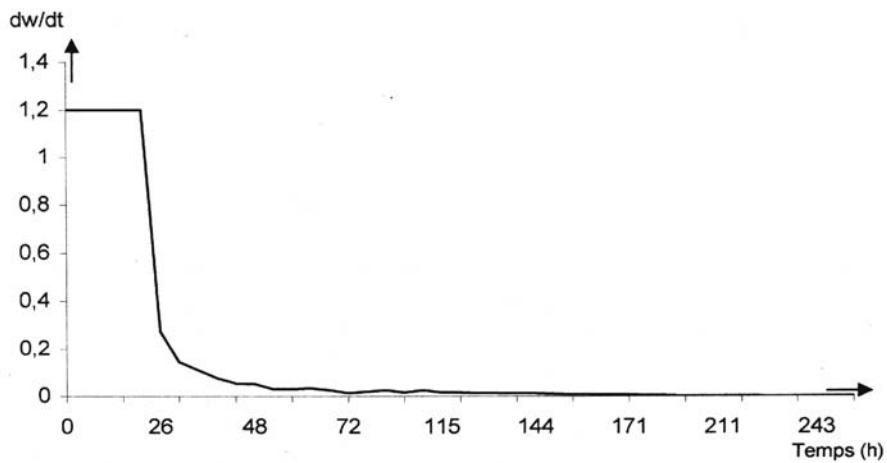


Fig. 14: Variation de la vitesse de séchage – Raisin

• **Banane**

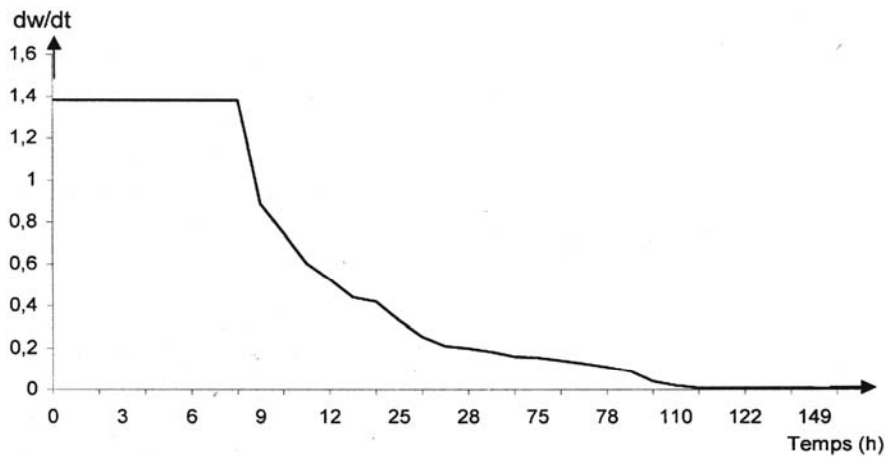


Fig. 15: Variation de la vitesse de séchage – Banane

**Tableau 1:** Résultats relatifs au séchage de quelques produits agroalimentaires [16-19]

Produits	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Humidité extraite (%)	Temps de séchage dans le séchoir (heures)	Temps de séchage à l'air libre (heures)	Gains (heures)
Menthe	1000	83	83 %	8	48	40
Verveine	1000	430	67 %	48	72	24
Laurier	1000	427	64 %	28	72	24
Banane	1000	271	73 %	144	744	600
Raisin	1000	251	75 %	268	576	312
Prunes	1000	277	72,3 %	175	576	401
Piment	1000	307	70 %	72	336	270
Figues	1000	205	77,2 %	219	960	741
Dattes	1000	846	15,4 %	214	960	746

## 6. CONCLUSION

L'étude théorique et expérimentale entreprise sur le séchage solaire de type direct a consisté, en premier lieu, en la mesure et au relevé des composantes du rayonnement solaire, des températures et de l'humidité à l'intérieur de notre modèle et, en second lieu, en la détermination des courbes de perte d'humidité de chaque produit séché par des pesées successives pendant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits (Tableau 1).

Une comparaison entre le temps de séchage à l'intérieur de notre modèle et à l'air libre est présentée. D'une manière générale, les produits séchent 2 à 5 fois plus vite dans un séchoir serre qu'à l'air libre, sans aucun apport d'énergie d'appoint, grâce au système de stockage de chaleur sensible. Parallèlement, un modèle numérique qui décrit le comportement thermique du séchoir est développé et permet de calculer et de tracer l'évolution des composantes

rayonnement solaire et des températures des différents éléments du système. Il permet aussi de déterminer l'évolution temporelle des coefficients d'échange convectifs et radiatifs dans notre modèle. Un accord assez satisfaisant entre les résultats théoriques et expérimentaux avec un taux d'erreur inférieur à 20 % est enregistré, ce qui paraît satisfaisant compte tenu de la difficulté de déterminer avec précision certains paramètres astronomiques ou atmosphériques et les coefficients d'échange basés, dans la plupart des cas, sur des relations empiriques. Les courbes de cinétique de séchage étant tracées, il reste à étudier les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse pour chaque produit.

Dans le futur, il serait bien utile aussi, d'envisager d'expérimenter des modèles de séchage solaires de type direct et/ou indirect, à plus grande échelle au niveau de sites sahariens (Biskra, Adrar, Béchar, etc.) où le taux d'humidité de l'air ambiant est nettement inférieur à celui des zones côtières et proposer les produits séchés pour une éventuelle commercialisation. Dans ce cas, l'Algérie qui importe les produits secs pour sa consommation, pourrait se dégager de la contrainte des importations en devises en produisant elle-même et au moindre coût ce genre de produit.

### NOMENCLATURE

a :	Coefficient d'albédo	t :	Temps [s]
A, B :	Facteurs de trouble	$R_s$ :	Taux de renouvellement de l'air dans le séchoir serre [1/h]
C :	Coefficient de correction de la distance terre – soleil	$T_i$ :	Température du milieu matériel i [K]
$C_p$ :	Chaleur spécifique [J/kg.K]	$V_i$ :	Volume du milieu i [m <sup>3</sup> ]
HS(i) :	Flux solaire global incident sur la surface i [W]	m :	Numéro du mois dans l'année
$h_{ij}$ :	Coefficient d'échange par convection entre l'éléments i et j [W/m <sup>2</sup> .K]	d :	Numéro du jour dans le mois
$h_{rij}$ :	Coefficient d'échange par rayonnement entre l'élément i et j [W/K]	$\rho$ :	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
H :	Hauteur du soleil	$\alpha_n$ :	Coefficient d'absorption
$I_0$ :	Constante solaire [W/m <sup>2</sup> ]	$\beta$ :	Angle d'inclinaison du capteur [°]
Nu :	Nombre de Nusselt	$\delta$ :	Déclinaison solaire [°]
$S_v$ :	Surface [m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ :	Latitude du lieu [°]
$Q_c$ :	Flux de chaleur conductif [W/m <sup>2</sup> ]	$\omega$ :	Angle horaire [°]
$Q_{ij}$ :	Flux de chaleur convectif entre milieux matériels i et j [W]	$\tau$ :	Coefficient de transmission

### REFERENCES

- [1] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, "*Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications*", 2<sup>ème</sup> Edition, Technique et Documentation, Lavoisier, 1980.
- [2] M. Daguinet, "*Les Séchoirs Solaires - Théorie et Pratique*", UNESCO, 1985.
- [3] A. Nisen et Dogniaux, "*Traité de l'Eclairage Naturel des Serres et Abris Végétaux*", 1975.
- [4] R. Miri, "*Contribution Théorique et Expérimentale à l'Etude du Bilan d'Energie d'une Serre Solaire*", Thèse de Magister, USTHB, 1983.

- [5] N.W. Desrosier, "*The Technology of Food Preservation*", Westport, Connecticut: Avi. Publishing, 1963.
- [6] Guide Pratique, "*Comment Sécher vos Produits avec le Séchoir Solaire*", Geres, 1997.
- [7] J.C. Cheftel et H. Cheftel, "*Introduction à la Biochimie et à la Technologie des Aliments*", Vol. I et Vol. II, Ed. Lavoisier, 1976.
- [8] F.A. Senhadji et al., "*Cinétique de Séchage et Qualité du Produit Séché*", Science des Aliments, 1991.
- [9] K. Allaf et al., "*Essai de Séchage de Produits Agro-alimentaires*", Sciences des Aliments, 1991.
- [10] A. Guinebault, Varagnate et D. Chabrol, "*Le Point sur le Séchage Solaire des Produits Alimentaires*", Technique et Documentation, Lavoisier, 1986.
- [11] J.J. Binbenet, "*Séchage dans les Industries Agro-Alimentaires*", SAPAIC, Paris, 1966.
- [12] W.H. Mac Adams, "*Heat Transmission*", Third Edition International, Student Edition.
- [13] E.R. Eckert, M. Robert Jr Drake, "*Analysis of Heat and Mass Transfer*", International Student Edition.
- [14] F. Florent, G. Lauton et M. Lauon, "*Equations et Systèmes Différentiels*", Tome IV, Vuibert, 1972.
- [15] N. Piskounov, "*Calcul Différentiel et Intégral*", Edition Mir, Moscou, 1987.
- [16] O. Mokrani et F. Said, "*Etude Expérimentale d'un Séchoir Solaire Indirect*", Mémoire de Fin d'Etude, USTHB, 1999.
- [17] N. Boukhars, "*Séchage Solaire des Dattes - Cinétique du Séchage*", Mémoire de Fin d'Etude, USTHB, 2001.
- [18] S. El Mokretar et M. Mahfoudia, "*Contribution Théorique et Expérimentale à l'Etude du Bilan d'Energie d'un Séchoir Type Serre*", Mémoire de Fin d'Etude, USTHB, 2001.
- [19] R. Bali et R. Benkhelfellah, "*Etude du Bilan d'Energie et de Masse d'un Séchoir Solaire comprenant un Système de Stockage de Chaleur*", Mémoire de Fin d'Etude, USTHB, 2002.
- [20] Séchage Solaire, site Web, [www.fao.org/](http://www.fao.org/).
- [21] D. Greiner, "*Le Marché de la Datte, Produit des Oasis*", [www.aupelfuref.org](http://www.aupelfuref.org), 1998.