

Conception, réalisation et expérimentation d'un séchoir à chauffage partiellement solaire fonctionnant en convection forcée

BENAOUDA.N, BENHAMOU.A, BIDDARI.A, ABDELLAOUI.M, , BELHAMEL.M

Laboratoire de Thermique
Centre de Développement des Energies Renouvelables
Route de l'observatoire BP 62 Bouzaréah, Alger
ALGERIE
nbenaouda@Gmail.com

Résumé:- Nous présentons dans cet article la mise au point d'un prototype de séchoir solaire indirect muni d'un appoint électrique en convection forcée, composé de deux parties essentielles : Le capteur plan, la chambre de séchage et le stock de régulation.

Le séchage solaire des produits agroalimentaires (plantes aromatiques et médicinales, fruits et légumes) reste souvent un maillon mal maîtrisé et excessivement coûteux pour les producteurs. La teneur en eau des produits doit être diminuée rapidement pour conserver les principes actifs, mais à basse température pour ne pas les détériorer.

L'aspect pratique consiste à la conception, la réalisation et l'expérimentation du séchoir solaire direct à Chauffage partiellement Solaire Fonctionnant en Convection Forcée. Ce séchoir est construit presque entièrement en matériaux locaux et est utilisable dans les conditions optimales à partir de l'énergie solaire.

Mots clés:- Capteur plan, rendement, ensoleillement global, séchage des produits agroalimentaires

1 Introduction

Le séchage solaire 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, dans le monde industriel à travers l'agroalimentaire, le textile...etc. Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection naturelle. Evidemment l'ensoleillement et l'humidité affectera les performances du séchoir.

A nos jours la filière des plantes aromatique et médicinale connaît une évolution importante en algérie. Plusieurs recherches sont menées dans le domaine de l'extraction des huiles essentielles et peu de travaux se sont intéressés aux problèmes liés à la conservation de ces plantes. Or, une plante si elle n'est pas séchée dans de bonnes conditions, elle risque de se dégrader et par suite de perdre la totalité de ses huiles essentielles. Le séchage permet d'améliorer la qualité des produits, d'augmenter leur durée de vie et de faciliter leurs transformations. Le mode de séchage utilisé ici est celui de la convection forcée, il permet un transfert simultané de chaleur et de masse (vapeur issue du produit), le fluide sécheur utilisé est l'air chaud.

2. Matériel et mode opératoire

2.1 Protocole expérimental

Le système de séchage utilisé est un séchoir convectif indirect comportant une source de chaleur d'appoint et un ventilateur à débit d'air variable, ce système de séchage permet de contrôler la température et le débit d'air asséchant.

L'air ambiant est préalablement chauffé dans un capteur à air. Un ventilateur centrifuge aspire l'air chaud de l'insolateur et le propulse à travers un conduit d'aspiration aéraulique.

Des résistances électriques fournissent en cas de besoin un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage constante à l'entrée de la chambre de séchage.

La masse du produit à sécher est fixée à 33,50 g par claie. La température de séchage est réglée à l'aide d'un thermorégulateur. On fixe le débit d'air entrant dans la chambre de séchage.

Au début, l'intervalle de temps entre deux pesées successives est de quinze minutes. Cet intervalle augmente au fur et à mesure que la masse du produit diminue. Chaque pesée donne la masse humide du produit $M_h(t)$.

L'expérience de séchage est arrêtée lorsque la masse du produit devient constante.

Par étuvage à 105°C pendant 24 heures, on détermine la masse sèche M_s .

La teneur en eau du produit est donnée par [5] :

$$X(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (1)$$

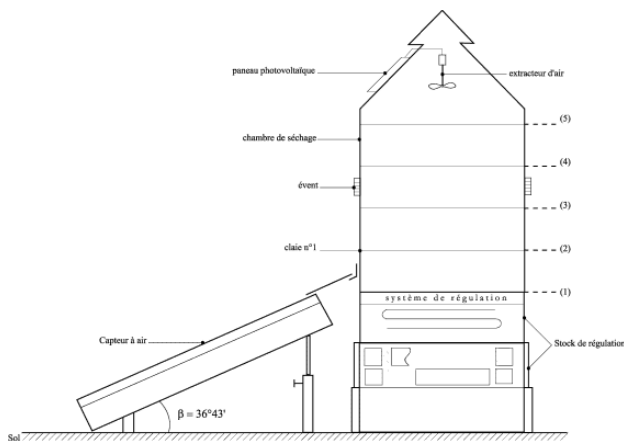


Fig.1 : Vue en coupe des principaux modules du séchoir étudié

2.1.1 Chambre de séchage

L'armoire est une enceinte cubique, son volume est de 1 m^3 , ses parois sont constituées d'une tôle d'acier inox son épaisseur est de 2 mm (éviter la corrosion), et d'une plaque de polystyrène d'épaisseur de 40 mm (isolant), contient trois claies distantes entre elles de 25 cm.

La claie représente un tamis de section carré, sert à porter le produit, et permet le meilleur passage de l'air.

2.1.2 Cheminée verticale :

Permet d'évacuer l'air humidité.

2.1.3 Ventilateur centrifuge:

Avec un débit d'air réglable de $50 \text{ à } 300 \text{ m}^3 / \text{h}$;

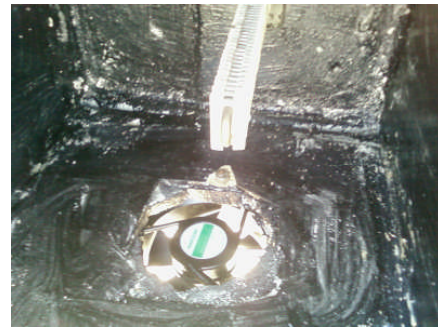


Fig.2 : Chauffage d'appoint + ventilateur

2.1.4 Chauffage d'appoint:

Résistance de chauffage électrique de puissance 1 kW jouant le rôle de source auxiliaire appoint, afin de contrôler la température et le débit de séchage ($T=50^\circ\text{C}$, $m=0.083 \text{ m}^3/\text{sec}$).

2.1.5 Thermorégulateur :



Fig.3 : Chauffage d'appoint + ventilateur

Agissant sur le chauffage d'appoint électrique; (dans le cas où la température à la sortie de capteur à air serait inférieure à la température de séchage, L'air frais aspiré de l'extérieur par un ventilateur est chauffé à l'aide d'un appoint électrique. Il est ensuite collecté à travers une conduite d'aspiration, pour atteindre enfin l'entrée en bas de l'armoire de séchage. Avant de traverser le volume de séchage comportant 3 claies, à la sortie de l'armoire, 65% de débit d'air asséchant usé est recyclé et 35% soit évacuer, et remplacer par l'air ambiant.

2.2 Préparation du produit

Les feuilles de menthe sont soigneusement préparées et étalées sur les claies 1, 2 et 3 de l'armoire de séchage.

La masse du produit à sécher est de 33,50 g par claie.



Fig.4 : Armoire de séchage

2.3 Mesure de l'humidité de l'air

L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage, et de mélange d'air sont mesurées par des sondes à affichage numérique



Fig.5 : hygromètre

2.4 Mesure des températures

On sélectionne trois sections de l'armoire de séchage (entrée, sortie et la 2^{ème} claie) au niveau desquelles on installe trois prises de température, pour la deuxième claie la sonde de capteur est implantée dans le produit) afin de suivre l'évolution de la température chaque quinze minutes.

Les plantes médicinales et aromatiques sont très fragiles, et ne tolèrent pas les températures de séchage élevées supérieures à 80°C. Nous avons séché la menthe à température de consigne contrôlable à l'entrée du séchoir solaire en faisant appel à la source électrique.

2.5 Taux de recyclage



Le contrôle des portions des débits (renouvelé et recyclé) est une conséquence de choix des sections des conduites.

On arrête l'opération de séchage, quand la masse de produit (pesé) est égale à la masse d'équilibre tel que: La teneur en eau dans le produit à la fin de séchage est de 14% de la teneur initiale.

La masse d'équilibre = masse sèche + 14% masse initiale d'eau = 25 % masse initiale.

donc on arrête l'opération dans notre cas quand la masse finale = 23g par claie.

La teneur en eau de produit à la fin de séchage représente 14% de La teneur en eau initial; "cinétique de séchage de la menthe verte" [6]

3. MODÉLISATION

Puisque nous procédons à un séchage à température et à débit d'air constant à l'entrée du séchoir, nous nous contentons de simuler le comportement de l'unité de séchage muni du chauffage d'appoint. Le modèle élaboré tient compte des phénomènes de transfert air-produit d'une manière globale et les grandeurs physiques utilisées sont des grandeurs macroscopiques et non pas des grandeurs locales.

3.1 Hypothèses simplificatrices

- les échanges radiatifs à l'intérieur de l'armoire de séchage sont négligés.
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés.
- les feuilles de menthe sont à la même température et possèdent la même teneur en eau
- les parois de l'armoire de séchage ont des températures uniformes et constantes.

- pour l'air asséchant, les échanges par convection sont prédominants, ceux par conduction sont négligeables.

-Le problème est unidimensionnel (Suivant Z); la variation de la température est considérée uniforme dans le plan xy, ce résultat est prouvé expérimentalement.

-la variation de la température de produit est en fonction de temps.

3.2 Bilan thermique, et équations de fonctionnement:

Le schéma représente les différents flux existants dans l'armoire

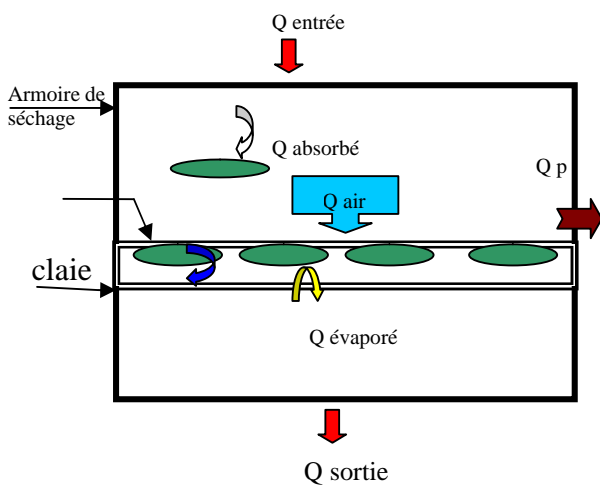


Fig.6 : Représentation des différents flux

Les équations qui suivent traduisent les bilans thermiques effectués au niveau d'une tranche d'épaisseur Δz de l'armoire de séchage.

On suppose que l'armoire de séchage est découpée en un certain nombre de tranches fictives dans la direction z de l'écoulement,

T_{ae} , Q_e , W_e

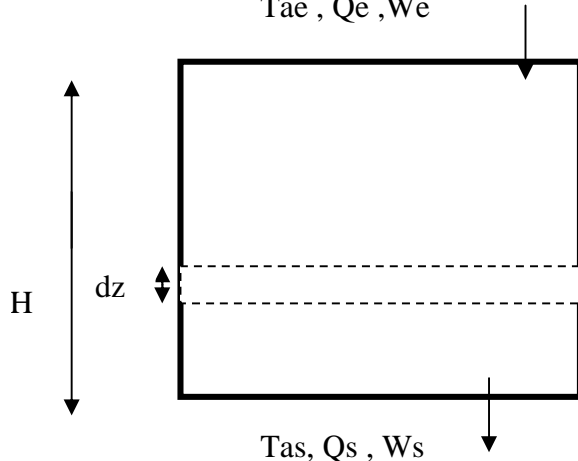


Fig.7: Schéma de la discrétisation

Bilan au niveau de l'air caloporteur:

$$D_a C_{pa} \Delta z \frac{\partial T_a}{\partial z} = -h_{cp} S_{pr} (T_a - T_{pr}) - h_{ci} \Delta S_p (T_a - T_{pi}) \quad (2)$$

Bilan au niveau du produit à sécher :

Les produits sont le siège de transferts de chaleur et de masse.

$$m_{pr} C_{ppr} \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} S_{pr} (T_a - T_{pr}) - L_v (T_{pr}) m^* (T_a, H_a, V_a) \quad (3)$$

où [7]

$$L_v = 4,1868 (597 - 0,56 T_{pr}) \quad (4)$$

Est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, exprimée en $(J.kg^{-1})$ et $m^* = M_s dX/dt$ est la masse d'eau évaporée par unité de temps, (dX/dt) étant la vitesse de séchage du produit exprimée en $(kg \text{ eau}/kg \text{ MS}/s)$.

$$dX/dt = \exp(-k t^n) \quad (5)$$

$k=10^{-6}$ constante de séchage

n : exposante numérique dépendante de l'état de la menthe (maturité, variété...) $n=1$ pour la feuille de maturité normale [8].

Donc :

$$m^* = (M_s \exp(-k t^n)) \quad (6)$$

3.3 Détermination des coefficients d'échange par convection

- entre la face interne de la paroi de l'armoire de séchage et l'air asséchant [2]:

$$h_{ci} = \frac{Nu \lambda_a}{D_z} \quad (7)$$

$$\text{avec : } Nu = 0,036 Re^{0,75} Pr^{0,333} \quad (8)$$

où Pr est le nombre adimensionnel de Prandtl

dz , la distance entre deux claies.

- entre le produit et l'air asséchant :

$$h_{cp} = \frac{Nu \lambda_a}{D_{pr}} \quad (9)$$

avec D_{pr} le diamètre moyen du produit, Nu le nombre de Nusselt égal à $0.37 Re^{0.6}$

Selon la relation proposée par Charm, Re le nombre de Reynolds égal à $\rho_a V_a D_{pr} / \mu_a$ et V_a la vitesse de l'air au niveau du produit.

3.4 Discrétisation des équations

Pour déterminer les différentes températures (de l'air et du produit aux points différents de l'espace et aux instants différents) et, nous avons discrétisé les équations (1) et (2), les différences finies "méthode explicite". Ceci conduit à un système de deux équations à deux inconnues que l'on peut mettre sous la forme discrétisé suivante [3]:

$$Ta(j+1) = Ta(j) + \left(\frac{dz}{DaCpaDz}\right)((-h_{cp}S_{pr}(Ta(j) - T_{pr}(i))) - (h_{ci}D_{sp}(Ta(j) - T_{pi}))) \quad (9)$$

$$T_{pr}(i+1) = T_{pr}(i) + \left(\frac{dt}{m_{pr}C_{Ppr}}\right)((-h_{cp}S_{pr}(Ta(i) - T_{pr}(i))) - L_{vm}) \quad (10)$$

Les calculs sont repris par itération. On décrit alors un profil de température de l'air chaud en fonction de z, et la température de produit pour chaque pas de temps Δt .

3.5 Valeur des données

Les paramètres	valeurs
pas sur le temps	dt=300 sec
pas sur l'espace,	dz=0.05 m
Débit d'air chaud	Da= 0.092 Kg/m ³
Surface de la paroi pour une hauteur dz	Dsp=0.25 m ²
Masse initiale de produit	mpr=0.09 kg
Masse sèche de produit	Ms=0.0117 kg
Chaleur massique de produit	CPpr=2372.5 J/kg K
la chaleur massique de l'air	CPa=1016 J/kg K
Surface de produit	Spr=0.8 m
Coefficient de convection(air-paroi interne)	hci= 1.75 W/m ² K
Coefficient de convection(air-produit)	hcp=1.33 W/m ² K
Température de la paroi interne	Tpi=315K

Température de produit	Tpr(1)=290 °K
Température de l'air asséchant	Ta(1)=323 K
hauteur de l'armoire	Z = 1m
Espace entre deux claies	Dz = 0.25 m
Temps totale estimé pour sécher le produit	5 H (18 000 sec)

4. RESULTATS ET DISCUSSION

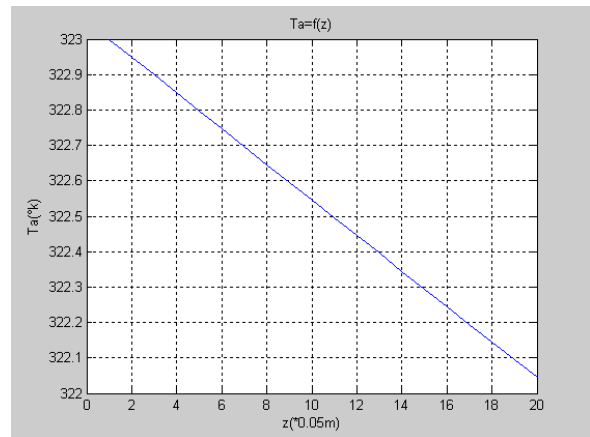


Fig.8 : Variation de la température de l'air dans l'armoire de séchage

La figure (Fig.8) montre la variation de la température de l'Air en fonction de l'espace. Cette variation a la forme d'une droite, sa tangente $T_g = -0.0125$

Ce qui explique la faible diminution de la température de l'air entre l'entrée et sortie de l'armoire de séchage (L'armoire est très bien isolée avec l'extérieur).

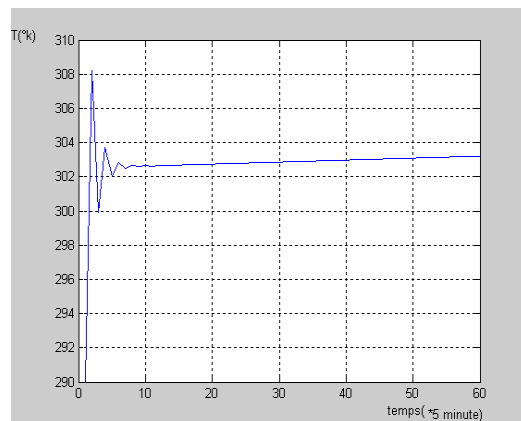


Fig.9: Variation de la température de produit en fonction de temps

Une forte augmentation de la température de produit dans les premières minutes (10 min), $T_{pr} = 308$ °K

2^{ème} phase :

une variation aléatoire de la température de 308 °K jusqu'à une valeur de 303°K.

3^{ème} phase:

Une très faible augmentation de la température dans une longue durée (une variation de moins de 1°C dans plus de 240 minutes).

*Dans la littérature, on distingue deux phases au cours d'une opération de séchage effectuée dans des conditions constantes de température, de débit et d'humidité de l'air :

Phase 0 : phase de mise en température du produit ; c'est ce qui correspond à la phase (1) et (2) de la figure.

Phase I : phase de séchage à allure constante correspond à la phase (3) de la Figure Fig.9.

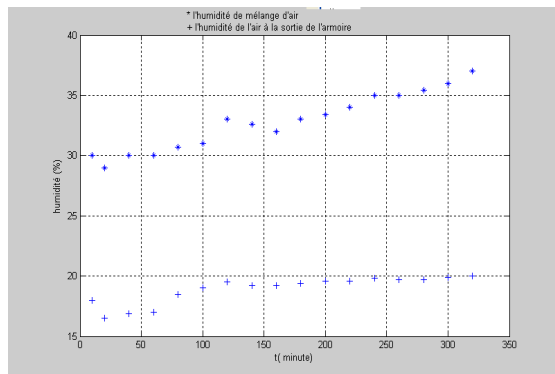


Fig.10 : Variation de l'humidité relative d'air en fonction de temps

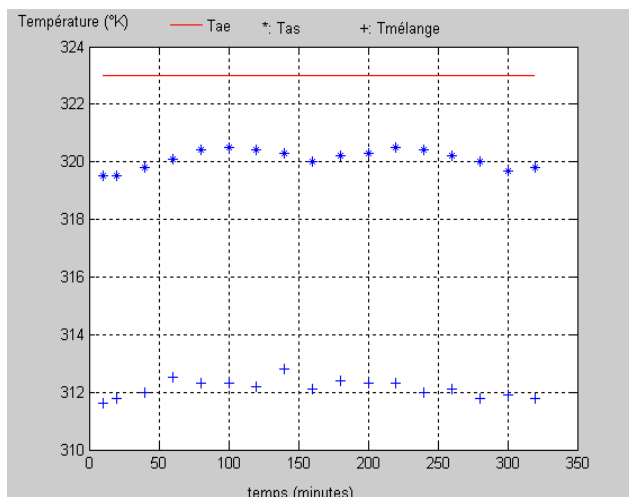


Fig.11 : Variation de la température de l'Air aux différents points de l'armoire.

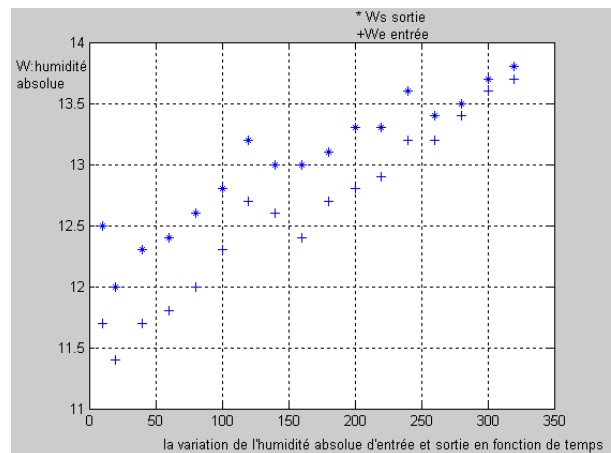


Fig.12 : Variation de l'humidité absolue de l'air à l'entrée et à la sortie de l'armoire

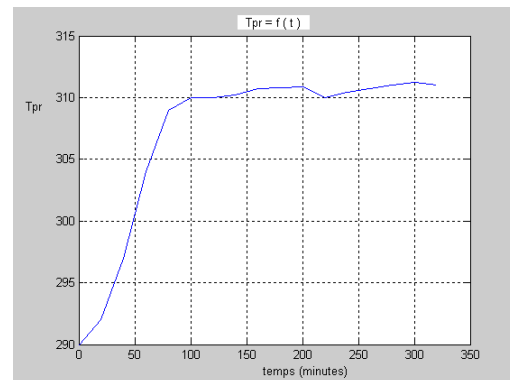


Fig.13 : Variation de la température de produit en fonction de temps

4.1 Interprétation des résultats

Ces valeurs de température nous permettent d'un côté de vérifier et de démontrer les valeurs trouvées par la modélisation mathématique, et d'un autre côté d'évaluer la température de mélange d'air.

Avec un taux de recyclage d'air de 65%, l'humidité absolue d'air chaud à l'entrée de l'armoire, augmente progressivement d'une valeur initiale de 11.5 g d'eau / kg d'air à une valeur finale de 13.7 g d'eau / kg d'air.

L'humidité absolue de l'air à la sortie augmente progressivement d'une valeur de 11.5g d'eau/kg d'air sec à une valeur finale de 13.8 g d'eau/kg d'air sec.

L'écart d'humidité entre l'air à l'entrée et l'air à la sortie diminue avec le temps ce qui explique que la masse d'eau extraite de produit diminue avec le temps et elle devient presque

négligeable à la fin de séchage est due à la vitesse de séchage qui diminue avec le temps.

La variation de la température de produit, présente la même allure et des valeurs proches que dans le modèle mathématique, la figure 13 vérifie les deux principales phases, de séchage.

La mise en température de produit (phase 1).

Le séchage à température constante (phase 2).

D'après l'analyse des résultats théoriques et expérimentaux on a remarqué que:

L'écart moyen de température d'air entre l'entrée et la sortie de l'armoire dans le modèle mathématique est de 1°C, alors que dans l'expérience, il est de 3°C.

Conclusion générale

L'étude expérimentale présentée dans ce travail est une contribution à l'amélioration du séchage solaire encore largement utilisé en Algérie.

Le séchoir présenté à une conception très simple et peu coûteuse.

Il permet un gain de temps considérable sur la durée de séchage et préserve les produits des aléas du temps.

Notre campagne de séchage sur les feuilles de menthe très satisfaisante malgré quelques insuffisances que nous espérons améliorer très prochainement.

Et delà, nous avons tout d'abord saisi le principe de fonctionnement de séchage, et ensuite, nous avons proposé un nouveau modèle, dont, nous étions obligés d'étudier la possibilité de le mettre en œuvre.

Nous avons pensé à sécher les plantes aromatiques et médicinales et on a choisi la menthe fréquemment consommée donc, il a fallu déterminer les isothermes de sorptions de la menthe qui nous déterminent la température et l'humidité d'équilibre de séchage de ce produit, dont nous avons besoin dans les calculs qui suivent. De ce fait on s'est référé aux résultats des travaux de recherche de plusieurs travaux.

Ainsi, nous avons procédé à la modélisation de l'enceinte de séchage, avec discrétisation de ses équations, cette démarche, nous a permis de déterminer ; la variation des températures d'air, et celle du produit à chaque instant et à chaque point de la chambre de séchage.

On est passé à la phase expérimentale pour déterminer la variation de la température, et de l'humidité de sortie de l'air et leur influence sur le mélange d'air, et la variation de la température de produit.

En finalité de cette étude, nous pouvons dire que notre système tel qu'il est dimensionné est très économique a long terme, et réalisable avec des produits localement disponibles.

Notre travail fait partie d'une recherche et développement des systèmes solaire à basse température ainsi la modélisation à été effectuée avec plusieurs hypothèses simplificatrices vu la complexité des phénomènes couplés avec transfert de chaleur et de masse.

Références:

- [1] BAILLY , Thermodynamique de l'air humide, Bordas, Paris, 1973
- [2] J.F. SACADURA, Initiation aux transferts thermiques, Technique et documentation CAST. INSA de Lyon, 1978
- [3] BENAOUA.N et M.BALHAMEL, Modélisation informatique d'un système de séchage solaire, 1^{er} séminaires sur la contribution de l'énergie solaire et éolienne dans le développement durable, Adrar 30-31, 2001
- [4] DAGUENET.M, Les séchoirs solaires : théorie et pratique, Organisation des Nations Unies pour l'éducation la science et la culture (U.N.E.S.C.O), Paris, 1985
- [5] AGHFIR.M, KOUHILA.M, JAMALI.A, AIT MOHAMED.L, Séchage solaire convectif pour la conservation des feuilles de romarin *Rosmarinus officinalis* , *JITH*, 2007
- [6] H.M. TAN AND W.W.S. CHARTERS, An experimental investigation of forced-convective heat transfer, solar energy, vol.13, pp.121, 1970
- [7] A.V LUIKOV, Heat and mass transfert in capillary-porous bodies, Pergamon Press, 1966
- [8] GUSTAVO ERNASTRO CASERAS SALAZAR, modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable : prise en compte de la pression du liquide, thèse docteur de l'ENSAM, spécialité mécanique, 2006