

Simulation d'un séchoir solaire indirect à convection forcée pour les produits agroalimentaires

Mohamed Yacine NASRI^{1*}, Azeddine BELHAMRI¹

¹Laboratoire de Génie Climatique

Département de Génie Climatique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université Frères Mentouri – Constantine 1. Campus Ahmad Hamani, 25000 Constantine, Algérie

* yacinovnasri@yahoo.fr

Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons au séchage solaire des fruits, notamment les tranches de la pomme de terre et en utilisant un séchoir solaire indirect. Afin d'étudier le comportement du séchoir, et la dynamique du séchage, nous avons conçu et simulé un séchoir solaire indirect, fonctionnant en convection forcée. Les conditions climatiques et solaires sont celles de Constantine, le jour du 11 Juillet est choisi, car c'est le jour le plus chaud dans l'année 2014. Le bilan énergétique est à la base de l'extraction des modèles séchoir. la discrétisation des équations, et la résolution des systèmes par la méthode de Gauss Seidel, ont permis d'engendrer les différents paramètres énergétiques des modèles. Le capteur solaire à air à simple vitrage est étudié en considérant un système d'équation différentielle, en utilisant la méthode itérative Gauss Seidel pour les différents éléments du capteur. Dans la suite de notre travail, nous nous sommes penchés sur l'influence de certains paramètres sur la cinétique du séchage. Au terme de cette étude, nous avons conclu que la température de l'air asséchant représente le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage.

Mots Clés : Séchage solaire, capteur solaire, séchoir indirect, cinétique du séchage.

Nomenclature

<i>MR</i>	taux d'humidité, %	<i>pi</i>	paroi intérieure
<i>Cp</i>	capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>pe</i>	paroi extérieure
<i>mp</i>	masse de la paroi, kg	<i>vi</i>	vitre intérieure
<i>S</i>	surface d'échange, m^2	<i>ve</i>	vitre extérieure
<i>m</i>	Débit massique, $kg.s^{-1}$	<i>ii</i>	isolant intérieure
<i>Surf</i>	surface d'échange, m^2	<i>ie</i>	isolant extérieure
<i>M</i>	masse de la paroi, kg	<i>n</i>	absorbeur
<i>T</i>	Température, K	<i>j</i>	tranche
<i>Q</i>	Débit d'air, $kg.s^{-1}$	<i>r</i>	rayonnement
<i>x</i>	teneur en eau, $kg.kg^{-1}$	<i>v</i>	vitre
<i>P</i>	puissance, W	<i>ev</i>	évaporatrice
<i>h</i>	coefficient d'échange thermique par convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>c</i>	voute céleste
<i>k</i>	coefficient d'échange thermique par conduction, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>am</i>	ambiance
<i>Indices et exposants</i>		<i>p</i>	polystyrène
<i>ach</i>	air chaud	<i>b</i>	brique
<i>f</i>	fruit	<i>t</i>	temps
		<i>0</i>	initial
		<i>e</i>	équilibre

1. Introduction

Les dernières publications de l'Office National des Statistiques (ONS) révèlent qu'en Algérie, la consommation de la pomme de terre occupe la deuxième place avec 32 kg/an/habitant, venant juste après les céréales et ses dérivés [1]. En 2003, la superficie consacrée à la pomme de terre a augmenté de 22 % par rapport à 2002 [2]. Comme cette augmentation de production s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage n'ont pas suivi le même rythme. Le problème de l'entreposage et de la transformation des tubercules est alors posé.

Les techniques de séchage peuvent offrir une solution satisfaisante pour la conservation des pommes de terre. Le séchage des pommes de terre par différentes techniques a été étudié par plusieurs chercheurs [3]. D'autres études ont abordé l'influence du séchage sur les propriétés des produits séchés.

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal [4]. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles [4]. L'augmentation des prix et la pénurie de carburants ont conduits à des études et recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en voie de développement [4].

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits et légumes est l'un des processus des grands consommateurs d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des pertes après la récolte. D'un point de vue économique, l'utilisation des séchoirs solaires est la solution préférée car ils sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection forcée ou naturelle.

Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage.

L'objectif de notre travail consiste à développer un modèle mathématique, pour le séchage solaire sur couche mince des tranches de la pomme de terre, en utilisant un séchoir solaire indirect à convection forcée dans les conditions écologiques typiques du temps.

A cet effet, un système d'équations régissant le fonctionnement du séchoir et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, des résultats.

2. Modélisation

2.1. Choix et description du système

Le système étudié présenté sur la *figure 1* est un séchoir indirect, constitué des éléments suivants :

- *Une unité de production d'air chaud :*

Constitué d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, incliné de 30° (Latitude de la ville de Constantine) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. Les matériaux simulés constituant le capteur sont : Une tôle galvanisée peinte en noir, d'épaisseur 1 mm utilisée comme absorbeur, ce dernier est couvert de haut par du verre pyrex d'épaisseur 10 mm, laissant passer le rayonnement solaire, et par le bas par un polystyrène d'épaisseur 4 cm, utilisé comme isolant.

- *Une chambre de séchage :*

C'est une boîte de petites dimensions (hauteur = 1m, largeur = 1m et la profondeur = 1m) Le matériau simulé constituant ce séchoir est la brique pleine en terre cuite d'épaisseur de 10 cm avec une isolation externe en polystyrène d'épaisseur de 4 cm pour minimiser l'échange de chaleur avec le milieu extérieur. Le séchoir comporte 10 claies galvanisées et grillagées, sur lesquelles sont posés les produits à sécher. Les claies sont distantes les unes des autres de 10 cm ; un espace suffisamment important pour que la circulation de l'air puisse se faire de la meilleure façon.

- *Un ventilateur extracteur* : est aussi utilisé (placé) à la fin de la hauteur du séchoir pour assurer la convection forcée.

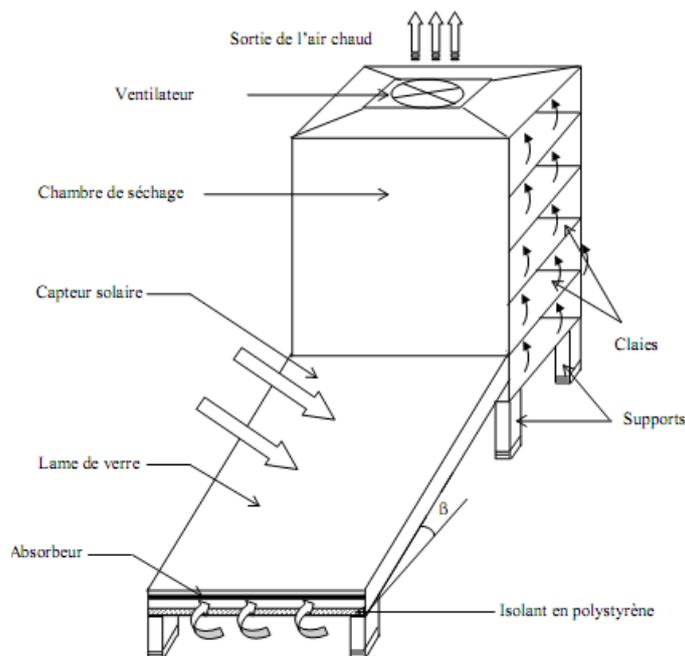


Figure 1 : Schéma du séchoir solaire

2.2. Méthode de calcul [8]

La méthode la plus efficace pour l'étude d'un tel type de séchoir est de le découper en tranches fictives et prendre une tranche «j», et l'étudier, cette méthode de la couche mince.

3. Équations

3.1. Modèle mathématique de la cinétique de Séchage

Le modèle de la cinétique s'appuie sur une formule empirique dite "modèle Phénoménologique". Ce modèle est généralement intéressant, pour estimer la valeur de la teneur en eau du produit à n'importe quel moment durant le processus de séchage. Le modèle empirique choisi pour décrire le processus de séchage des tranches de la pomme de terre est le modèle logarithmique basé sur l'étude de **P.P. Tripathy, Subodh Kumar** [5]

$$MR = \frac{X_0 - X(t)}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

$$MR = k_0 * e^{(-k*t)} \quad (2)$$

Avec :

$$k_0 = 1.005 + 4.58 * 10^{-5} * T_{ach}$$

$$k = 4.20 * 10^{-5} + 2.15 * 10^{-6} * T_{ach}$$

3.2. Bilans thermiques

3.2.1. La boîte de séchage [6]

- Au niveau de la surface de la paroi externe :

$$\frac{c_{p_p} \cdot m_{p_p}}{4} \cdot \left(\frac{dT_{pe}}{dt} \right) = K_p \cdot S_v \cdot (T_p - T_{pe}) + h_{am,pe} \cdot S_v \cdot (T_{am} - T_{pe}) + h_r \cdot S_v \cdot (T_c - T_{pe}) \quad (3)$$

- Au niveau de la surface de la paroi interne :

$$\frac{c_{p_b} \cdot m_{p_b}}{4} \cdot \left(\frac{dT_{pi}}{dt} \right) = K_b \cdot S_v \cdot (T_p - T_{pi}) + h_{ach,pi} \cdot S_v \cdot (T_{ach} - T_{pi}) \quad (4)$$

- Au niveau de l'air asséchant :

$$m_{ach} \cdot c_{p_{air}} \cdot (T_{ach}^* - T_{ach}) = h_{ach,f} \cdot S_f \cdot (T_{ach} - T_f) + 4 \cdot h_{ach,pi} \cdot S_v \cdot (T_{ach} - T_{pi}) \quad (5)$$

- Au niveau du produit (entre l'air et le fruit) :

$$m_f \cdot c_{p_f} \cdot \left(\frac{dT_f}{dt} \right) = h_{ach,f} \cdot S_f \cdot (T_{ach} - T_{pi}) - P_{ev} \quad (6)$$

- Au niveau de la surface intermédiaire entre la paroi externe et interne :

$$\frac{c_{p_p} \cdot m_{p_p}}{4} \cdot \left(\frac{dT_p}{dt} \right) + K_p \cdot S_v \cdot (T_p - T_{pe}) = \frac{c_{p_b} \cdot m_{p_b}}{4} \cdot \left(\frac{dT_p}{dt} \right) + K_b \cdot S_v \cdot (T_p - T_{pi}) \quad (7)$$

3.2.2. Capteur solaire [6]

- Echange au niveau de la face extérieure de la vitre

$$\frac{c_{p_v} \cdot M_v}{surf} \cdot \left(\frac{dT_{ve}}{dt} \right) = \frac{P_v}{2} + h_{rve} \cdot (T_c - T_{ve}) + h_{vv} \cdot (T_a - T_{ve}) + h_{cv} \cdot (T_{vi} - T_{ve}) \quad (8)$$

- Echange au niveau de la face intérieure de la vitre

$$\frac{c_{p_v} \cdot M_v}{surf} \cdot \left(\frac{dT_{vi}}{dt} \right) = \frac{P_v}{2} + h_{vvn} \cdot (T_n - T_{vi}) + h_{rvn} \cdot (T_n - T_{vi}) + h_{cv} \cdot (T_{ve} - T_{vi}) \quad (9)$$

- Echange au niveau de l'absorbeur

$$\frac{c_{p_n} \cdot M_n}{surf} \cdot \left(\frac{dT_n}{dt} \right) = P_n + h_{vvn} \cdot (T_{vi} - T_n) + h_{rvn} \cdot (T_{vi} - T_n) + h_{van} \cdot (T_{(j-1)} - T_n) + h_{rni} \cdot (T_{ii} - T_n) \quad (10)$$

- Echange au niveau de la face intérieure de l'isolant

$$\frac{c_{p_i} \cdot M_i}{surf} \cdot \left(\frac{dT_{ii}}{dt} \right) = h_{rni} \cdot (T_n - T_{ii}) + h_{ci} \cdot (T_{ie} - T_{ii}) + h_{vai} \cdot (T_{(j-1)} - T_{ii}) \quad (11)$$

- Echange au niveau de la face extérieure de l'isolant

$$\frac{cp_i.M_i}{surf} \cdot \left(\frac{dtie}{dt}\right) = h_{ris} \cdot (T_s - T_{ie}) + h_{ci} \cdot (T_{ii} - T_{ie}) + h_{vv} \cdot (T_a - T_{ie}) \quad (12)$$

- Echange au niveau du fluide caloporteur (l'air)

$$\frac{cp.Q}{surf} \cdot (T_j - T_{(j-1)}) = h_{van} \cdot (T_n + T_{ii} - 2 \cdot T_{(j-1)}) \quad (13)$$

4. Résultats et discussions

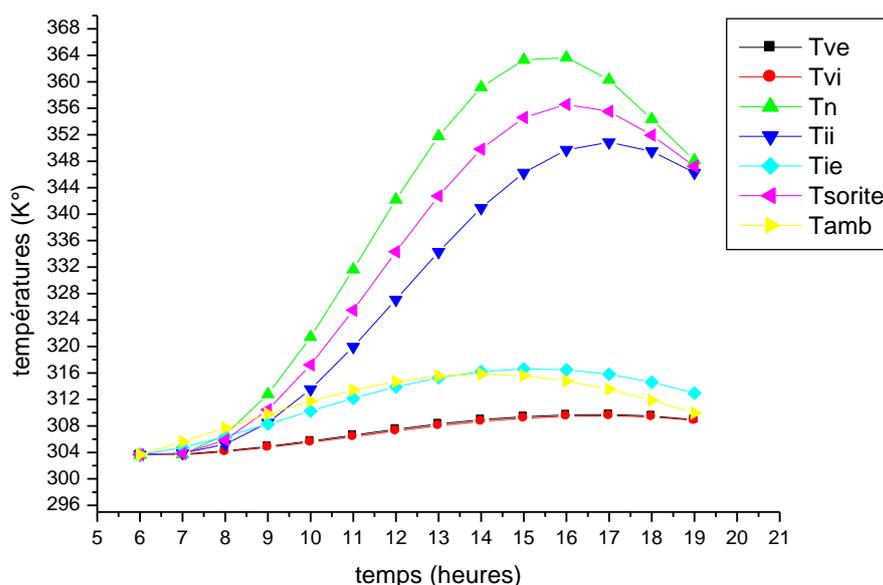


Figure 2 :

Variation des températures des différents niveaux du capteur

Pour la journée de ce travail (14 Juillet 2014), le rayonnement solaire transmis par la vitre ensuite absorbée par l'absorbeur et transformé en énergie thermique qui permet d'augmenter la température de l'air de séchage et atteint à l'entrée du séchoir des températures qui varient avec la surface du capteur, ceci est montré sur les différentes courbes de la *figure 2* et *figure 3*.

Les courbes représentées sur la *figure 2* montrent la distribution des différents températures des éléments du capteur (vitre, isolant, absorbeur, l'entrée et à la sortie de l'air ...) durant la période d'exposition au soleil.

Le graphe sur la *figure 3* se divise en deux parties, avant 8h.00 et après 8h.00. Avant 8h.00, et bien que le capteur est exposé de deux heures au soleil, la température n'augmente que quelques degrés. Cela est expliqué par le fait que la puissance reçue sert essentiellement à réchauffer le capteur. Le réchauffement d'une surface de 2 m² demande moins de puissance, alors que pour 4 m² demande plus. La température atteinte à 8h.00 est dite température d'équilibre [7]. La température de l'air commence à augmenter, avec l'augmentation de la surface de 2 m² à 4 m², jusqu'à atteindre une valeur maximale de 337 K jusqu'à 355 K.

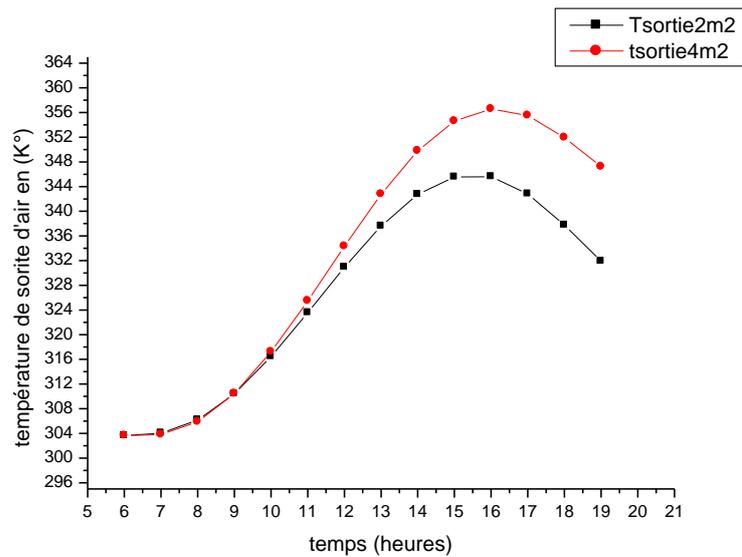


Figure 3 : Influence de la surface du capteur sur la température de sortie du capteur et d'entrée au séchoir

La figure 4 représente la variation de la température de l'air asséchant au niveau des claies 1,5 et 10. Il est expliqué avant que l'air chauffé serve à évaporer l'eau du produit et augmenter sa température jusqu'à atteindre la température de l'air chauffée à l'entrée du séchoir.

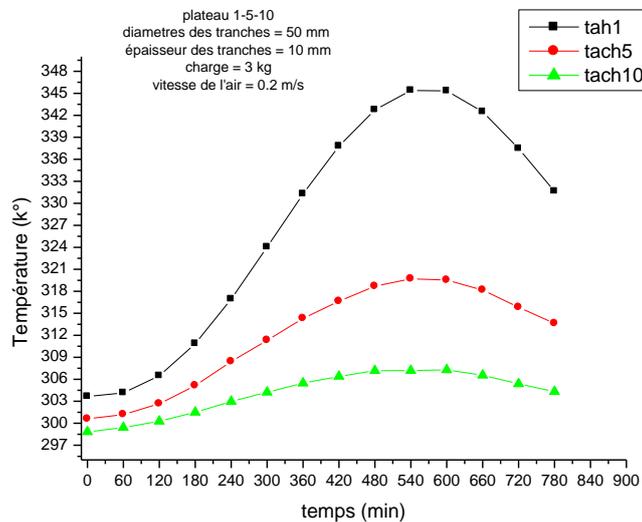


Figure 4 : Evolution de la température de l'air asséchant dans les différentes claies du séchoir

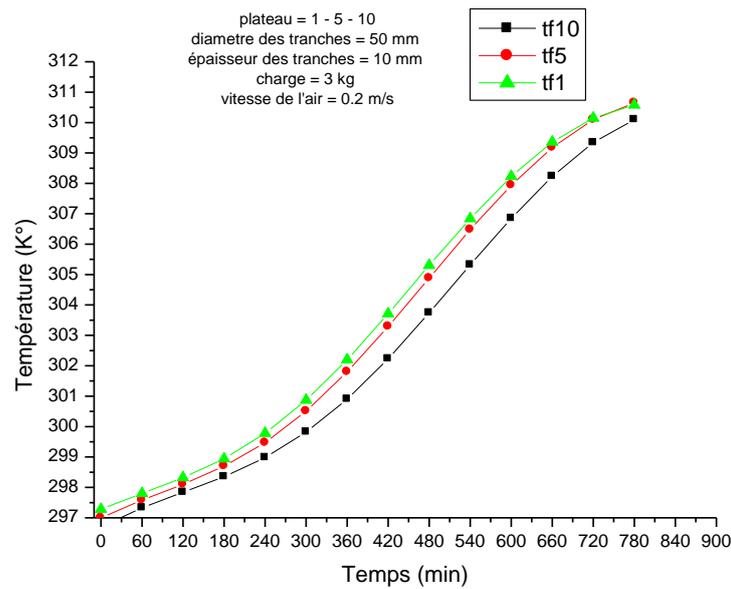


Figure 5 : Evolution de la température des tranches des pommes de terre dans les différentes claies du séchoir

La figure 5 représente la variation de la température du produit au niveau des claies 1,5 et 10. Il est expliqué avant que l'air chauffé serve à évaporer l'eau du produit et augmenter sa température jusqu'à atteindre la température de l'air chauffée à l'entrée du séchoir.

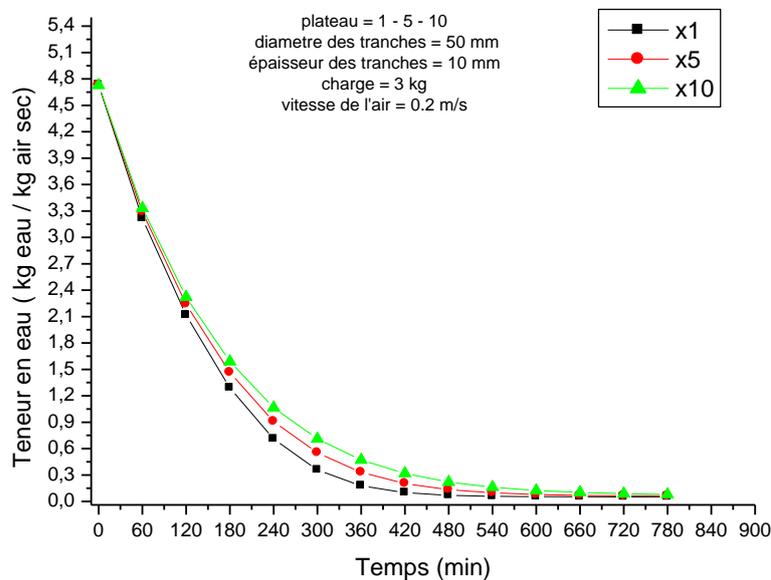


Figure 6 : Evolution de la teneur en eau des tranches dans les différentes claies du séchoir

La figure 6 donne l'évolution en fonction du temps, de la teneur en eau dans le produit, au niveau des différentes claies du séchoir. Le produit sèche plus vite dans les premières claies, comparé au produit posé sur les dernières ; ce qui est tout à fait normal. Puisqu'au fur et à mesure

que l'air avance dans le séchoir, sa température diminue et son humidité augmente. Autrement dit, le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il régit une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air qu'à la surface du produit.

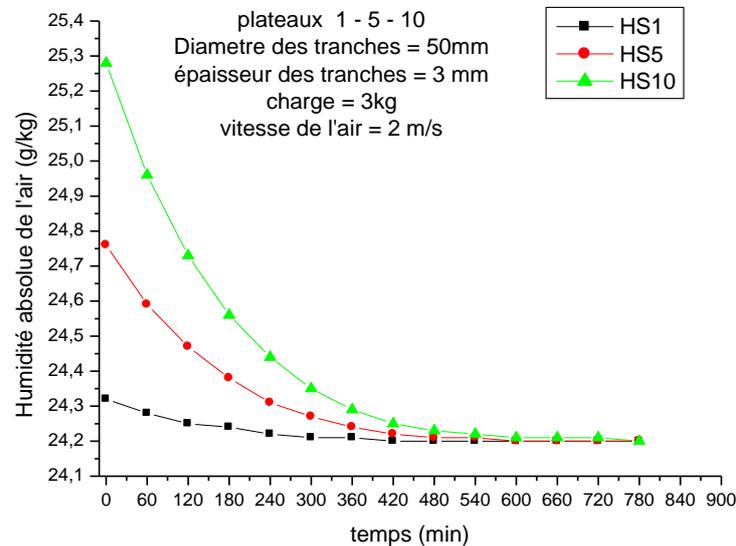


Figure 7 : Evolution de l'humidité absolue dans les différentes claies du séchoir

La figure 7 présente l'évolution temporelle de l'humidité absolue de l'air asséchant au niveau de trois claies différentes. Dans ce cas, l'eau dégagée par évaporation du produit est récupérée par l'air chauffé. C'est-à-dire que l'air chauffé récupère plus d'eau évaporée dans la dernière claie par rapport à la première, où l'humidité récupérée par l'air diminue avec le temps ; puisqu'il y a de moins en moins d'eau à évaporer.

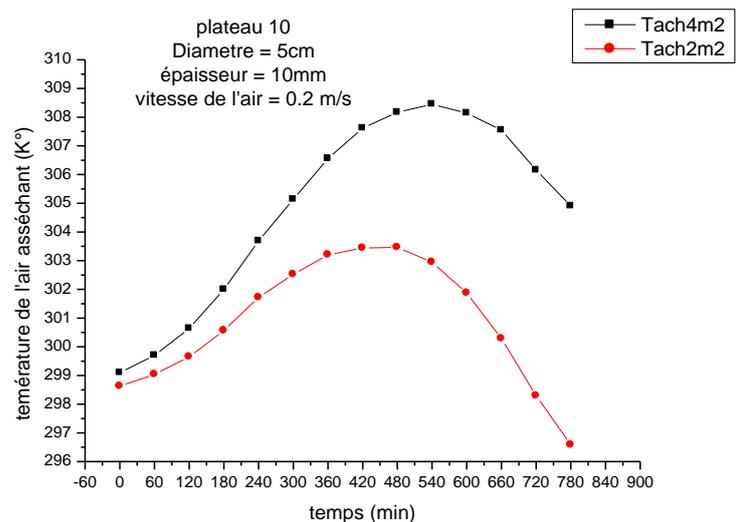


Figure 8 : Influence de la surface du capteur sur la température d'air asséchant du plateau n°

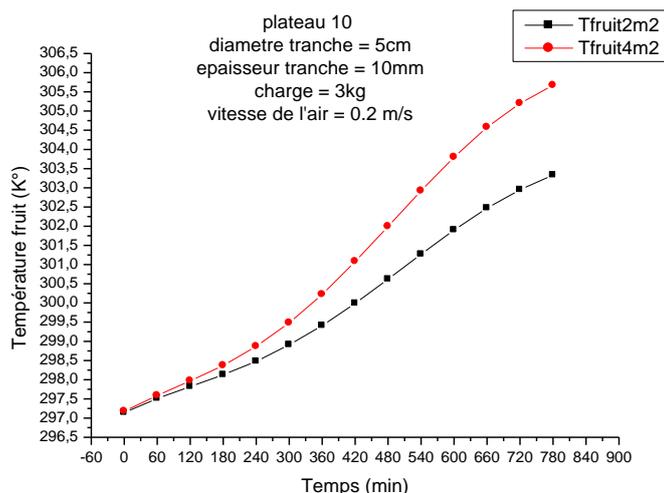


Figure 9 : Influence de la surface du capteur et la température d'entrée de l'air de séchage sur la température des tranches des pommes de terre

Les figures 8 et 9 montrent respectivement l'évolution des températures de l'air asséchant et les températures des tranches au niveau du 10^{ème} plateau qui sont influencées par la variation de la surface du capteur.

5. Conclusion

L'étude théorique de l'enceinte de séchage permet, de distinguer une différence de séchage du produit se trouvant sur les différentes claies du séchoir. L'étude permet également de déterminer l'influence de la Température de l'air chauffé et aussi la variation des épaisseurs des tranches sur la cinétique de séchage.

Il est essentiel de préciser que les résultats obtenus et représentés par les différentes courbes sont en parfaite concordance avec les lois du transfert de chaleur et de masse, en particulier ceux décrivant le processus du séchage.

L'étude paramétrique permet d'évaluer l'influence de la Température de l'air chauffé se trouvant sur les claies, Ainsi la variation de l'épaisseur des tranches des produits. L'augmentation de la température est le paramètre le plus influent, qui permet de diminuer considérablement le temps de séchage.

La progression de l'air chauffé en hauteur, c'est-à-dire son passage par plusieurs claies dans le séchoir, conduit à l'augmentation de la teneur en eau du produit de ces claies. La cause de cela est l'eau dégagée du produit sous forme de vapeur d'eau, récupérée par l'air ce qui diminue sa température et par conséquent la chaleur apportée à ce produit.

Pour ces motifs, il est donc nécessaire de bien choisir les paramètres pour avoir un séchage uniforme de tout le produit, se trouvant dans le séchoir avec une optimisation du temps de séchage.

Les résultats obtenus sont similaires aux résultats des travaux antérieurs des chercheurs dans ce domaine et confirment le processus physique du séchage.

Références

7. Document, D.S.A.S.I., 'Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Informations', Ministère de l'agriculture et du développement rural, Alger, 2003
6. Document, 'Documentation de Travail Destinée aux Agents de Suivi de la Filière Pomme de Terre', I.T.C.M.I., Institut Technique Des Cultures Maraîchères et Industrielles, Alger, 2006.
7. N. Leeratanarak, S. Devahastin and N. Chiewchan, 'Drying Kinetics and Quality of PotatoChips Undergoing Different Drying Techniques', Journal of Food Engineering, Vol. 77, N°3,pp. 512 - 517, 2005
8. L. Bennamoun et A. Belhamri. (2007)
Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles
Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda (2007) 201-204.
9. P.P. Tripathy, Subodh Kumar, Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying (2008) 2941–2948
10. Yves Jannot, (2007) Thermique solaire
11. Lyes Bennamoun. (2001) Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local
Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique
12. Michel Daguene., (1985) Les séchoirs solaires : Théorie et pratique, UNESCO