



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE des Sciences et Technologie

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Taibi Youcef Abd Elhak

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Fabrication mécanique et productique

Thème

ÉTUDE DE SÉCHAGE D'UN PRODUIT AGRICOLE (ANANAS)

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mechikel Mohamed	MAA	Président
Mechraoui Ameer	MAA	Examinateur
Bensahal Djamel	MCA	Rapporteur

Année Universitaire: 2023/2024

ملخص

هذه المذكرة الحالية هي مساهمة في الدراسة التجريبية لتجفيف المنتج الزراعي (الأناناس). تم إجراء جميع الاختبارات التجريبية على منصة الاختبار الخاصة بنا في قسم الميكانيك بجامعة الأغواط. وقد تم أخذ العديد من العوامل بعين الاعتبار مثل درجة الحرارة والرطوبة النسبية للهواء طوال عملية التجفيف: عند مدخل للوحة الشمسية، عند مدخل وداخل غرفة

التجفيف وعند المخرج. تمت دراسة ثلاثة أنماط للتجفيف: في الهواء (في الشمس)، تدفق الهواء بسرعة معينة (قسري)، والنقل الحراري الطبيعي (بدون تدفق قسري). ولكل نمط، تم اختيار ثلاثة عينات بسمك: 4 ملم، 6 ملم و 8 ملم. أظهرت النتائج أن الوقت اللازم لنمط التجفيف القسري أقل بكثير مقارنة بالوضع الأخرى. كما لوحظ ارتفاع درجة الحرارة والرطوبة في وضع النقل الطبيعي مقارنة بوضع التجفيف القسري. تنخفض الرطوبة النسبية (MR) مع انخفاض سمك

العينة.

كلمات مفتاحية: جرة التجفيف، درجة الحرارة، الطاقة الشمسية، الرطوبة النسبية، الأناناس.

Memory title: **Drying study of an agricultural product (pineapple)**

Name: **Taibi** First name: **Youcef Abd Elhak**

Directed by: **Djamel Bensahal**

Abstract

This present dissertation is a contribution to the experimental study of drying an agricultural product (pineapple). All experimental tests were carried out on our test bench in our mechanics department at the University of Laghouat. Several parameters were taken into consideration such as temperature and relative humidity along the drying process: at the entrance of the solar air panel, at the entrance and inside and at the exit of the drying chamber. Three drying modes were studied: in the air (in the sun, forced air flow and natural convection (without forced flow)). For each mode, three thicknesses were chosen: 4 mm, 6 mm and 8 mm. The results show that the time for forced drying mode is very less compared to other modes. It was also observed that the temperature and humidity increased for the natural convection mode compared to the forced drying mode. The relative humidity (MR) decreases with decreasing sample thicknesses.

Key words: Drying chamber, temperature, solar energy, relative humidity, pineapple.

Titre du mémoire: **Étude de séchage d'un produit agricole (ananas)**

Nom: **Taibi**

Prénom: **Youcef Abd Elhak**

Encadreur: **Bensahal Djamel**

Résumé

Ce présent mémoire est une contribution à l'étude expérimentale de séchage d'un produit agricole (ananas). Tous les tests expérimentaux ont été réalisés sur notre banc d'essai au niveau de notre département de mécanique à l'Université de Laghouat. Plusieurs paramètres ont été pris en considérations tels que la température et l'humidité relative le long du processus de séchage : à l'entrée du panneau solaire à air, à l'entrée et à l'intérieure et à la sortie de la chambre de séchage. Trois modes de séchage ont fait l'objet d'étude : à l'air (au soleil, écoulement d'air forcé et convection naturelle (sans écoulement forcé)). Pour chaque mode, on a choisi trois épaisseurs : 4 mm, 6 mm et 8 mm. Les résultats montrent que le temps de séchage forcé est très inférieur par rapport aux autres modes. On a observé que la température et l'humidité croit pour le mode de convection naturelle par rapport au séchage forcé. L'humidité relative (MR) décroît avec la décroissance de l'épaisseur.

Mots clés : Chambre de séchage, température, énergie solaire, humidité relative, ananas.

Tout d'abord, nous remercions Dieu qui m'a donné la force et la patience de faire cette étude humble.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mon père et à toute ma famille pour

Soutien continu et contribution à l'achèvement du voyage scolaire

Je remercie également de tout cœur mon professeur

***Dr. Ben Sahal DJamel** pour ces conseils et ce soutien, et nous remercions.*

*Membres du jury **Mr. Mechikel Mohamed** et **Mr. Mechraoui Aneur***

Merci également à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'entreprendre ce travail, y compris la famille du département d'ingénierie Mécanique.

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

À l'âme pure de mon père, que Dieu lui fasse miséricorde

À ma chère maman, que Dieu la protège

À mes frères, sœurs et à tous les membres de ma famille

À mes professeurs et collègues qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours académique

Et à tous ceux qui m'ont tendu la main pour mener à bien ce travail

Sommaire

Liste des Figures	I
Liste des Tableaux	IV
Sommaire	IV
Introduction générale	VII
Chapitre 01 : Etude bibliographique sur le séchage	1
1.1 Introduction	1
1.2 Capteurs solaires	1
1.3 Séchage des produits agricoles	4
1.3.1 Définition	4
1.3.2 Historique	4
1.3.3 Sécheurs à rayonnement	5
1.3.4 Sécheur par lots	5
1.3.5 Processus de séchage	6
1.3.6 Séchage naturel	6
1.3.7 Séchage des fruits et légumes	8
1.3.8 Changements de qualité pendant le séchage	9
1.3.9 Guides pour réussir le séchage	10
1.3.10 Séchoir à biomasse à assistance solaire utilisé pour la déshydratation des fruits et des légumes	11
1.3.11 Type de séchoir utilisé pour le séchage des cultures périssables	13
1.3.12 Autres techniques de séchage utilisées dans l'industrie alimentaire	15
1.4 Méthodes de séchage	17
1.5 Mode de séchage	18
1.6 Conclusion	19
Références	20
Chapitre 02 : Panneau solaire à air & chambre de séchage	24
2.1 Introduction	24
2.2 Les principaux éléments constituant le banc d'essai	24
2.3 Matériaux utilisés dans la fabrication du banc d'essai	26
2.3.1 La tôle galvanisée	26
2.3.2 Le polystyrène	27
2.3.3 Le verre	28
2.3.4 Le bois [4]	29

2.4 La chambre de séchage	30
2.5 Les différentes étapes de fabrication du banc d'essai	30
2.6 Conclusion	33
Références	34
Chapitre 03 : Résultats et discussion	35
3.1 Introduction	35
3.2 Les conditions d'expérimentation	35
3.3 Séchage forcé	36
a- Température ambiante de l'air	36
b - Humidité relative de l'air ambiant:	37
c-Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	37
d –L'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	38
e-Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage	39
f –L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre	40
g - Température Moyenne dans la chambre de séchage	40
h- Humidité relative Moyenne de l'air dans la chambre de séchage	41
I- Humidité relative expérimentale (MR _{exp})	42
J- Perte de masse	43
3.4 Convection naturelle (sans écoulement forcé +chambre de séchage)	44
a- Température ambiante de l'air	44
b - Humidité relative de l'air ambiant:	45
c-Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	46
d –L'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	46
e-Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage	47
f –L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre	48
g - Température Moyenne dans la chambre de séchage	48
h- Humidité relative Moyenne de l'air dans la chambre de séchage	49
I- Humidité relative expérimentale (MR _{exp})	50
J- Perte de masse	51
3.5 Séchage à l'air ambiant	52
3.6 Conclusion	52
Conclusion générale	54

Liste des Figures

Figure 1.1: Panneau photovoltaïque [3].	02
Figure 1.2: Les principaux composants d'un collecteur à plaques plates [5].	03
Figure 1.3: Exemple de séchage naturel [9].	05
Figure 1.4: Exemple de séchage naturel [13].	06
Figure 1.5: Exemple de séchage de légumes [16].	08
Figure 1.6: Exemple de séchage des fruits [18].	08
Figure 1.7: Cheminée solaire séchoir [23].	12
Figure 1.8: Chambre de séchage [25].	13
Figure 1.9: Sécheurs à plateaux [27].	13
Figure 1.10: Schéma d'un séchoir solaire tunnel [30].	14
Figure 1.11: Sécheurs à courroie [30].	15
Figure 1.12: Photo de Lyophilisateur [34].	16
Figure 1.13: Sécheur de plateau de vide pour pharmaceutique [33].	16
Figure 1.14: Sécheur de plateau de vide pour pharmaceutique [35].	17
Figure 1.15: Superheated Steam Drying [37]	18
Figure 1.16 : Séchage en lit fluidisé [19].	18
Figure 1.17 : Séchage en lit fluidisé [38].	19
Figure 2.1: Une photo du banc d'essai montrant avec ces principaux constituants.	24
Figure 2.2 : Vue en arrière du banc d'essai.	26
Figure 2.3 : Tôle galvanisée.	27
Figure 2.4: Polystyrène expansé [2].	28
Figure 2.5 : Chambre à sécher.	30
Figure 2.6 : Montage du cadre inférieur du panneau solaire	31
Figure 2.7 : Le cadre inferieure du panneau avec une contre plaquée d'épaisseur de 3.6 mm.	31
Figure 2.8 : L'ajout de la plaque de polystyrène au dessus du contre plaquée.	32
Figure 2.9 : Le cadre inferieur du banc d'essai après l'ajout d'une plaque de polystyrène (40 mm) + plaque MDF (e = 2.5 mm) + Tôle galvanisée (e = 1.5 mm).	32
Figure 2.10 : Une photo de la chambre à sécher.	33
Figure 2.11 : Vue à l'intérieure de la chambre à sécher.	33
Figure 3.1: Évolution de la température de l'air ambiant en fonction de temps.	36
Figure 3.2: Variation de l'humidité relative de l'air ambiant (%) en fonction de temps.	37

Figure 3.3: Croissance de la température de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.	37
Figure 3.4: Évolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.	38
Figure 3.5: Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage en fonction de temps.	39
Figure 3.6: Évolution de l'humidité relative de l'air à sortie de la chambre en fonction de temps.	40
Figure 3.7: Variation de la température moyenne dans de la chambre de séchage en fonction de temps.	40
Figure 3.8: Croissance de l'humidité relative moyenne dans la chambre de séchage en fonction de temps.	41
Figure 3.9: Variation de l'humidité relative expérimentale (MR _{exp}) en fonction de temps.	42
Figure 3.10: La perte de masse d'eau en fonction de temps.	43
Figure 3.11: Évolution de la température de l'air ambiant en fonction de temps.	44
Figure 3.12: Variation de l'humidité relative de l'air ambiant (%) en fonction de temps.	44
Figure 3.13: Croissance de la température de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.	45
Figure 3.14: Évolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.	46
Figure 3.15: Température de l'air à la sortie de la chambre à sécher en fonction de temps.	46
Figure 3.16: Évolution de l'humidité relative de l'air à sortie de la chambre en fonction de temps.	47
Figure 3.17: Variation de la température moyenne dans de la chambre de séchage en fonction de temps.	48
Figure 3.18: Croissance de l'humidité relative moyenne dans la chambre de séchage en fonction de temps.	48
Figure 3.19: Variation de l'humidité relative expérimentale (MR _{exp}) en fonction de temps.	49
Figure 3.20: La perte de masse d'eau en fonction de temps.	50
Figure 3.21: La perte de masse d'eau en fonction de temps.	51

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients pour différents mode de séchage.	19
Tableau 2.1 : Éléments principaux du banc d'essai.	25
Tableau 2.2 : La Norme AFNOR NF 35-503 [1].	27
Tableau 2.3: Caractéristiques du matériau verre [3].	28
Tableau 3.1: Les données d'expérimentation avec spécification du jour, épaisseur et masse initiale des échantillons.	35
Tableau 3.2 : Perte de masse d'eau pour les trois épaisseurs étudiées.	42
Tableau 3.3 : Temps de séchage des échantillons.	43
Tableau 3.4 : Perte de masse d'eau pour les trois épaisseurs étudiées.	49
Tableau 3.5 : Temps de séchage des échantillons.	50
Tableau 3.6 : Temps de séchage des échantillons.	51

chapitre 01:

Étude bibliographique sur le séchage

1.1 Introduction

Le séchage des produits agricoles est un processus de stabilité et de conservation qui remonte aux temps anciens, le séchage est naturellement sur le sol, sur les surfaces ou sur les étagères, Il est largement pratiqué dans la plupart des pays africains, Mais la qualité bactériologique des produits artisanaux laisse souvent à désirer. Sans oublier que les emballages peu fiables entraînent souvent une détérioration rapide des produits. Cependant, le séchage reste l'une des options les moins coûteuses pour la conservation des produits agricoles [1].

De nombreuses mises à jour ont déjà été apportées aux systèmes de séchage traditionnels afin de maintenir les produits plus longtemps et d'améliorer leur qualité, offrant ainsi un revenu supplémentaire aux producteurs, tout en déployant de nombreux efforts déployés par les capteurs solaires en Afrique pour développer des techniques de séchage plus efficaces que le séchage conventionnel, notamment par le développement de séchoirs solaires à coût modéré et à usage domestique ou semi-industriel, En particulier dans le domaine du séchage des ananas, ont également émergé comme une solution durable et efficace en exploitant l'énergie solaire renouvelable pour drainer les produits d'ananas, Ces complexes permettent des conditions de séchage idéales, et de maintenir les saveurs naturelles et la texture de l'ananas. L'intégration de capteurs solaires permet également un contrôle minutieux du processus de séchage, ce mécanisme de séchage garantit un avenir dynamique et en constante évolution pour préserver les aliments dans notre monde moderne [1].

1.2 Capteurs solaires

Un capteur solaire est un dispositif qui recueille l'énergie solaire et la transforme en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en chaleur (capteurs thermiques). De manière courante, les capteurs solaires sont appelés panneaux solaires [2]

- **Types de capteurs solaires**

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques. Voici les plus courants.

- a. **Capteurs solaire photovoltaïques**

Qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [3] (voir Figure 1.1).

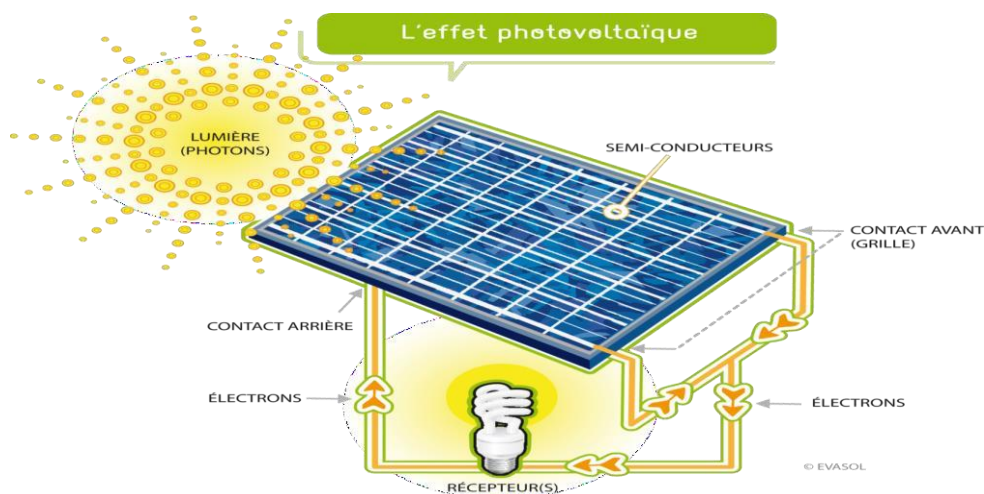


Figure1.1: Panneau photovoltaïque [3].

b. Capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques fonctionnent en absorbant le rayonnement solaire, en le convertissant en énergie thermique, puis en le transportant de sorte qu'il puisse être utilisé pour chauffer un milieu donné [4].

b.1 Technologie des capteurs solaires plats

La technologie des capteurs solaires plats comprend différents types, tels que les capteurs vitrés et non vitrés.

Un capteur solaire plat est un dispositif qui convertit l'énergie solaire en énergie thermique. Il se compose généralement d'une surface plane sombre qui absorbe autant d'énergie solaire que possible et transfère cette énergie à l'eau, à l'air ou à un autre fluide pour diverses applications. Les principaux composants d'un capteur solaire à plaque plate typique comprennent une surface absorbante noire, des tubes ou des passages pour la circulation du fluide caloporteur, une isolation et un couvercle transparent pour permettre à l'énergie solaire de passer et de réduire les pertes de chaleur. Les collecteurs à plat sont faciles à fabriquer, relativement peu coûteux et peuvent collecter à la fois le faisceau et le rayonnement diffus. Ils sont fixés en permanence et nécessitent peu d'entretien. Ces collecteurs sont généralement installés face à l'équateur et

conviennent à une gamme d'applications thermiques, la plage de température moyenne des appareils étant d'environ 100 °C [5].

Les composants principaux d'un collecteur de plaques plates pour l'énergie solaire comprennent (voir Figure 1.2)[5] :

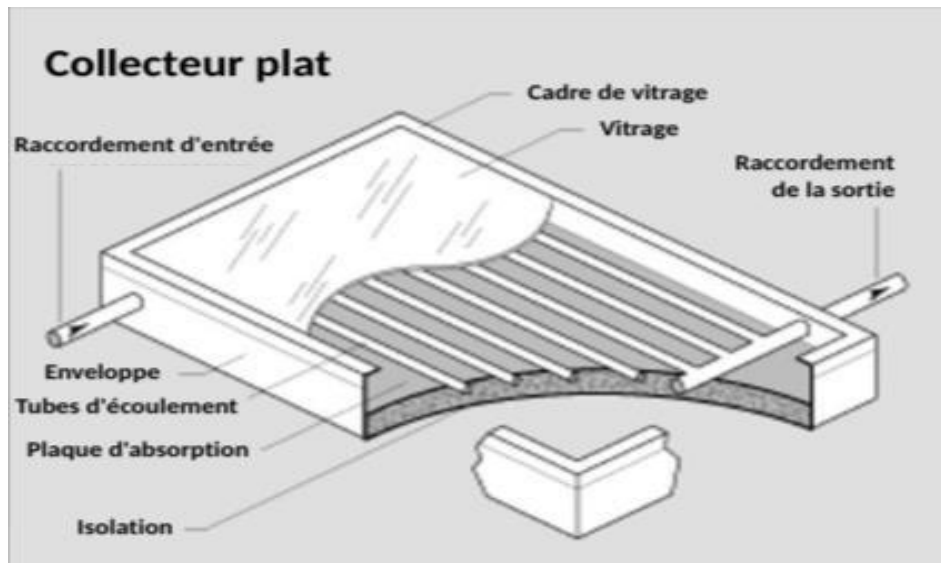


Figure 1.2: Les principaux composants d'un collecteur à plaques plates [5].

Couverture :

Une ou plusieurs feuilles de verre ou de plastique transparent [5].

Plaque absorbante :

Généralement composée d'aluminium et/ou de cuivre, la plaque absorbante capte l'énergie solaire et la convertit en chaleur [5].

Insolation :

Matériaux à faible conductivité thermique pour réduire le transfert de chaleur à la fois de la conduction et de la convection dans les côtés et la face arrière du collecteur de plaque plate [5].

Tuyaux ou passages :

La plaque absorbante est associée à des tuyaux ou des passages pour la circulation du fluide caloporteur, permettant le transfert de chaleur.

-Rendement des capteurs solaires

L'efficacité thermique est une taille sans dimension qui montre que l'efficacité thermique de l'équipement thermique peut être formulée comme dans les capteurs solaires à plaques plates et peut être calculée par l'équation [6].

$$\eta = \text{Flux thermique utilisé} / \text{Flux thermique incident} \quad (01)$$

η : rendement du panneau solaire à air (%) ;

Q_{used} : Flux thermique utilisé (W) ;

Q_{incident} : Flux thermique incident (W).

1.3 Séchage des produits agricoles

1.3.1 Définition

Le séchage est un procédé qui vise à éliminer l'eau ou un autre liquide d'un matériau, généralement un solide. Cela se fait par évaporation, c'est-à-dire en transformant le liquide en vapeur [7].

1.3.2 Historique

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, viandes, poissons, figes, noix, tabac, plantes médicinales, etc.), pour l'élaboration des matériaux (briques, céramique, poterie avant cuisson, bois...), ou pour les textiles et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, en fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel ». Le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantané », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) (voir Figure 1.3) [8].



Figure 1.3: Exemple de séchage naturel [9].

1.3.3 Sécheurs à rayonnement

Dans les sécheurs à rayonnement, la méthode par laquelle la chaleur est transmise au produit est le rayonnement d'un corps chaud ou du soleil. Cette énergie de rayonnement augmente la température du produit et provoque l'évaporation de l'humidité. L'exemple pour le séchoir à rayonnement est celui du séchage au soleil ou des séchoirs solaires [10].

1.3.4 Sécheur par lots

Les sécheurs par lots conviennent principalement aux opérations de séchage à petite échelle, dans lesquelles les produits sont chargés en lots. Un lot de produits humides est chargé et le séchoir est autorisé à fonctionner jusqu'à ce que le produit atteigne le niveau d'humidité souhaité, et le fonctionnement du séchoir est arrêté, puis les produits séchés sont déchargés. Encore une fois, le lot suivant sera chargé pour l'opération de séchage. Les sécheurs par lots sont très simples de conception, de construction et de fonctionnement, mais l'efficacité des sécheurs par lots est moindre en raison des périodes de chargement et de déchargement des sécheurs. Les sécheurs par lots sont des séchoirs à four, des sécheurs solaires [10].

1.3.5 Processus de séchage

Le séchage est l'une des techniques de conservation les plus anciennes et les plus importantes qui implique la réduction de la teneur en humidité de l'aliment au niveau où la croissance microbienne est inhibée et le taux de réactions chimiques détérioratives est minimisé. C'est une opération thermophysique et physico-chimique dans laquelle l'excès d'humidité est éliminé; d'où l'activité de l'eau de la nourriture est réduite. En plus d'augmenter la durée de conservation des produits alimentaires, le séchage présente divers autres avantages, car il facilite la manipulation des matériaux en réduisant le poids en vrac et réduit ainsi les coûts d'emballage et de transport, rend le produit disponible hors saison [11].

1.3.6 Séchage naturel

Ce type de séchage est traditionnel, il est également appelé séchage à l'air libre. C'est l'une des méthodes de conservation des aliments les plus fréquentes et les plus longues dans de nombreux pays en raison de sa simplicité et de son abondance de rayonnement solaire (voir Figure 1.4) [12].



Figure 1.4: Exemple de séchage naturel [13].

- **But du séchage**

La technique de déshydratation a pour but d'éliminer partiellement ou en quasi-totalité l'eau des aliments en vue d'y abaisser l'activité d'eau. De plus, l'élimination quasi-totale de l'eau permet une conservation encore plus longue [15].

- **Facteurs affectant le taux de séchage**

Les facteurs suivants influencent le taux de séchage lors du traitement de divers matériaux [15] :

Température : La chaleur favorise l'évaporation de l'eau et augmente le taux de transfert de masse et de chaleur entre le milieu sec et le matériau

Humidité et ventilation: Une faible humidité permet une meilleure évaporation de l'eau, tandis qu'une bonne ventilation assure un renouvellement continu de l'air autour du matériau

Vitesse du vent ou du courant d'air : Un flux rapide d'air facilite la récupération de la chaleur et la suppression de l'humidité condensée autour du matériau

Structure et propriétés du matériau: Le type de matériau, sa densité, sa taille et sa forme influent directement sur le taux de séchage.

Lorsque ces facteurs sont bien maîtrisés et adaptés aux besoins spécifiques du matériau, ils contribuent à un taux de séchage optimal et à une qualité finale du produit satisfaisante.

- **Avantages de la déshydratation par rapport au séchage au soleil**

Le processus de déshydratation est beaucoup plus rapide que le séchage au soleil :

- La déshydratation nécessite moins de surface au sol et moins de plateaux.
- La déshydratation se fait dans des conditions très hygiéniques
- Le séchage au soleil n'est pas possible par temps nuageux ou pendant les pluies, tandis que la déshydratation ou le séchage mécanique ne dépend pas des conditions météorologiques
- La couleur des fruits et légumes déshydratés ou séchés mécaniquement demeure uniforme en raison de la température de séchage uniforme.

Le séchage solaire présente plusieurs avantages, notamment le coût faible, l'absence de consommation d'électricité, et la possibilité de conserver certaines espèces végétales telles que les fruits confits.

Cependant, le séchage solaire est moins rapide, moins contrôlable, et peut poser des problèmes de conservation si les conditions météorologiques ne sont pas idéales [14].

1.3.7 Séchage des fruits et légumes

- **Séchage des légumes :**

Les légumes peuvent également être conservés par séchage. Parce qu'ils contiennent moins d'acide que les fruits, les légumes sont séchés jusqu'à ce qu'ils soient cassants. À ce stade, il ne reste que 10% d'humidité et aucun microorganisme ne peut se développer (voir Figure 1.5) [15].



Figure 1.5: Exemple de séchage de légumes [16].

- **Séchage des fruits :**



Figure 1.6: Exemple de séchage des fruits [18].

Les fruits secs sont les bonbons de la nature, mais contrairement aux bonbons, ils conservent la plupart des vitamines, des minéraux et des fibres inhérentes aux fruits, ce qui les rend plus

nutritifs et plus nourrissants. Les fruits secs conservent les minéraux, la teneur calorique et les fibres présents dans les fruits frais (voir Figure 1.6) [17].

1.3.8 Changements de qualité pendant le séchage

- **Qualité physique et chimique [19]**

Durant le processus de séchage, plusieurs types de modifications de la qualité du produit peuvent se produire. Voici quelques exemples basés sur les résultats fournis :

Couleur :

L'apparence visuelle du produit peut être altérée, avec des variations telles que l'oxydation ou la diminution de la pigmentation.

Texture :

La structure physique du produit peut subir des transformations, allant de l'assèchement jusqu'à des changements plus significatifs tels que la fragilité ou la durabilité.

Qualité nutritionnelle :

Certains composants nutritifs peuvent être conservés ou perdus pendant le séchage, ce qui influence directement la valeur nutritionnelle finale du produit.

Rétrécissement :

Lorsque l'humidité est éliminée dans le réseau solide d'un produit alimentaire pendant le séchage, un déséquilibre de pression est produit entre la partie interne et externe du matériau alimentaire, générant des contraintes de contraction qui entraînent un retrait du matériau. Les changements de forme et parfois la fissuration du produit L'attrait visuel est également affecté si le produit subit un retrait sévère [20].

Porosité :

La porosité est une mesure des pores ou des espaces vides d'un matériau à celle du volume total ou simplement elle peut être définie comme la fraction volumique de l'air dans le produit alimentaire [20].

Il est important de noter que ces modifications ne sont pas universelles et varient grandement en fonction du type de produit, des méthodes de séchage employées, et des conditions environnementales sous lesquelles le séchage se fait.

- **Qualité nutritionnelle [20]**

La qualité nutritionnelle des produits agricoles séchés est influencée par différents facteurs liés au séchage et aux conditions de stockage. Voici quelques points clés concernant la qualité nutritionnelle des produits agricoles séchés :

Préservation des nutriments :

Le séchage approprié peut permettre de conserver les nutriments essentiels des produits, y compris les vitamines, minéraux, acides aminés essentiels et acides gras insaturés.

Pertes de nutriments :

Certaines méthodes de séchage peuvent entraîner des pertes de nutriments, notamment si le temps de séchage est trop long ou si les températures excessives sont appliquées.

Variations de composition :

Le séchage peut provoquer des variations dans la composition des produits, comme une augmentation des concentrations en sucre et en acides aminés non essentiels.

Effets positifs :

Le séchage peut accentuer certaines caractéristiques nutritives, comme les niveaux d'oligo-éléments et d'acides gras polyinsaturés.

1.3.9 Guides pour réussir le séchage [21]

Le séchage des aliments est une méthode de conservation qui élimine l'humidité, empêchant la croissance des bactéries, des levures et des moisissures. Voici quelques points clés pour un séchage réussi en fonction des sources fournies :

- **Température :**

La chaleur est fournie par le soleil ou la chaleur électrique. Si la température de séchage est trop basse, le produit devient acide. Le séchage doit être effectué le plus rapidement possible, à une

température qui n'affecte pas sérieusement la texture, la couleur et la saveur du fruit ou du légume. Si la température est trop élevée ou l'humidité trop faible, il y a un risque que l'humidité soit éliminée trop rapidement. Cela peut provoquer un durcissement des cellules externes du produit (cémentation) qui empêche la vapeur d'eau de se diffuser à partir des cellules internes. Le séchage est mieux accompli lorsque le processus est continu. Lorsque la chaleur est appliquée par intermittence, des températures propices à la croissance bactérienne peuvent se développer.

- **Sélection du bon produit :**

Les fruits et légumes sélectionnés pour le séchage doivent être sains, frais et dans le "pic" de l'état; mûrs, mais toujours fermes et au bon état de maturité. La matière fanée ou inférieure ne fera pas un produit satisfaisant. Les fruits immatures seront faibles en couleur et en saveur. Les légumes trop mûrs sont généralement durs et boisés. Les fruits trop mûrs ou meurtris risquent de se gâter avant que le processus de séchage puisse être effectué. Les fruits et légumes qui sont inférieurs avant le séchage seront inférieurs après le séchage.

- **Circulation de l'air :**

Chaque morceau d'aliment devrait être bien exposé à l'air. Les aliments ne devraient être qu'à une seule couche de profondeur avec de l'espace autour. Cet espace n'a pas besoin d'être grand puisque le produit rétrécira pendant le processus de séchage. Un bon flux d'air est nécessaire. L'air absorbera toute l'humidité qu'il peut contenir; par conséquent, l'air frais doit être forcé de circuler pour éliminer la vapeur d'eau et évacuer l'humidité de la nourriture séchée. La force de l'air en circulation ne doit pas être si forte qu'elle puisse faire sauter les aliments séchés du panier.

1.3.10 Séchoir à biomasse à assistance solaire utilisé pour la déshydratation des fruits et des légumes :

- **Cheminée :**

Le principe de base de la cheminée solaire est similaire à celui du capteur solaire; une cheminée solaire vise à chauffer l'air. Il se compose d'une surface sombre qui est exposée au rayonnement solaire et est également en contact avec l'air à chauffer. La cheminée absorbe l'air de la chambre de séchage principale et en le chauffant davantage, diminue sa densité provoquant l'élévation et la sortie de la cheminée motivant ainsi le flux d'air hors de la chambre de séchage solaire. La cheminée augmente la force de flottabilité, qui dépend de la densité de l'air à l'extérieur de la

structure et à l'intérieur de la cheminée, et favorise des débits d'air plus élevés dans les séchoirs solaires (voir Figure 1.7) [22].

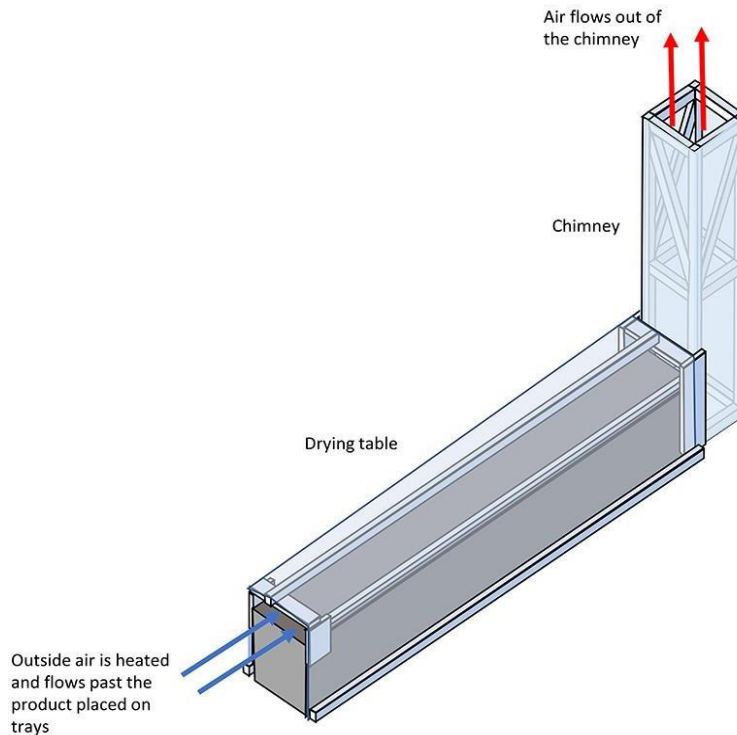


Figure 1.7: Cheminée solaire séchoir [23].

- **Chambre de séchage :**

La chambre de séchage a des plateaux d'écran de fil d'aluminium pour tenir les produits. Le capteur solaire à plaque plate utilisé a un seul couvercle en plexiglas placé environ au-dessus d'une feuille d'absorbeur en métal peint noir mat. Tous les murs de collecteur à l'exception de la couverture en verre transparent sont isolés à l'épaisseur pour réduire les pertes de chaleur. Le capteur solaire est fixé à l'arrière de la chambre de séchage. Un ventilateur d'échappement fixé dans la cheminée de la chambre de séchage force l'air ambiant à passer à travers le collecteur et à monter à travers les fruits en cours de séchage. Le poêle à gaz à biomasse aide au séchage lorsque le rayonnement solaire est insuffisant (voir Figure 1.8) [24].

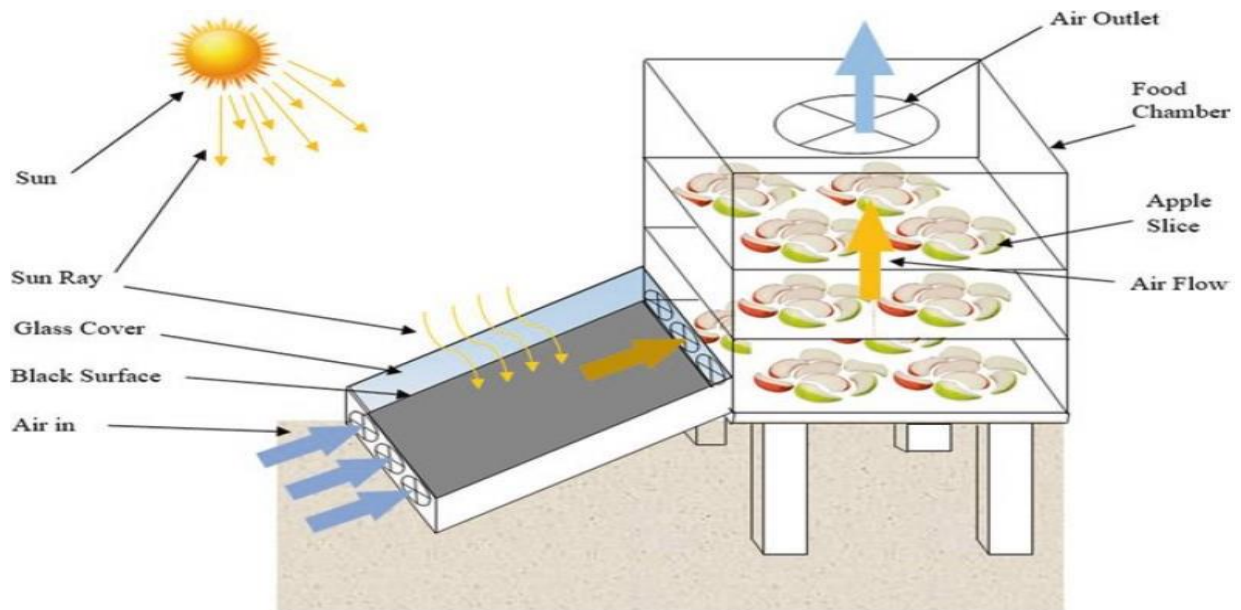


Figure 1.8: Chambre de séchage [25].

1.3.11 Type de séchoir utilisé pour le séchage des cultures périssables

Dans ce qui suit, nous citons quelques exemples de séchoirs réalisés et testés par des chercheurs à travers le monde :

- **Sécheurs à plateaux :**



Figure 1.9: Sécheurs à plateaux [27].

Les séchoirs à plateaux sont un autre type de sécheur par lots qui est souvent utilisé dans les opérations de séchage des aliments à petite échelle. À bien des égards, ils ressemblent à des sécheurs d'armoire. Les sécheurs à plateaux sont classés comme type de lot et sécheur à bande et peuvent sécher presque tout (voir Figure 1.9) [26].

- **Sécheurs pneumatiques :**

La partie de base de ces sécheurs est la chambre ou le tube dans lequel le matériau dispersé est séché pendant le transport pneumatique. La vitesse de l'air doit être supérieure à la vitesse de lévitation des particules (10 à 20% de la vitesse de lévitation des plus grandes particules) principalement, le travail des sécheurs pneumatiques est continu. Ils sont utilisés pour sécher les grains, les aliments laitiers hachés, les feuilles de légumes.

- **Séchoirs à tunnel :**

Ce modèle de séchoir dédié essentiellement pour la production agro-alimentaire. Il est destiné principalement pour les régions tropicales et subtropicales et est en exploitation commerciale dans une soixantaine des pays partout dans le monde.

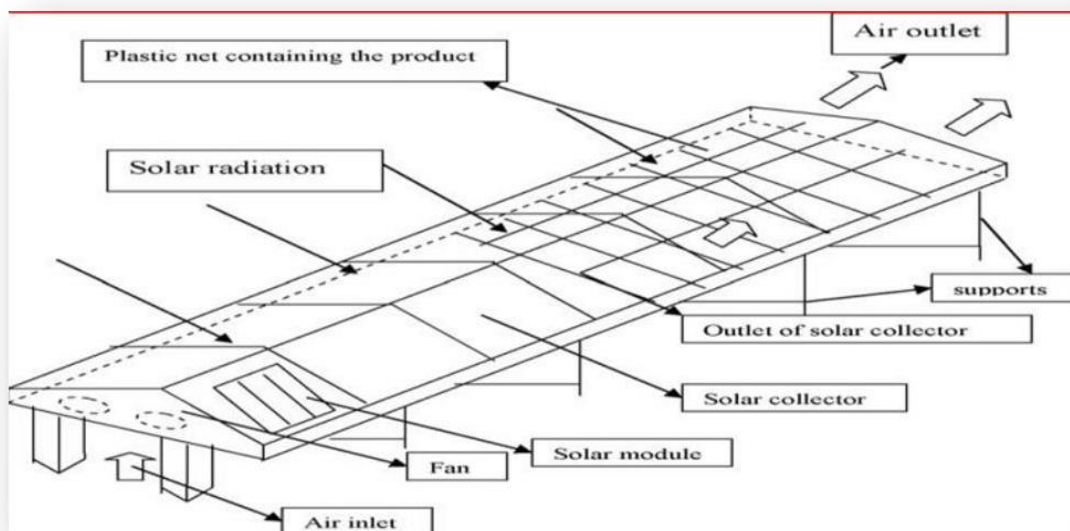


Figure 1.10: Schéma d'un séchoir solaire tunnel [30].

Le séchoir Tunnel utilise les cellules photovoltaïques pour alimenter les ventilateurs et ainsi pour faire circuler l'air dans la zone de séchage. Le ventilateur permet de réduire le temps de séchage

d'une manière considérable. L'air circule à travers une zone généralement peinte en noir (zone du collecteur) pour absorber la chaleur du soleil et passe à travers les plateaux qui contiennent les produits destinés à être séchés (voir Figure 1.10) [28].

- **Sécheurs à courroie :**

Le séchoir à bande est particulièrement adapté aux légumes coupés, les principaux composants de ce séchoir se composent de treillis métallique finement tissé soutenu sur des rouleaux pour former un bac à bande, un conduit fournissant de l'air chaud au fond du bac et une brosse de nettoyage rotative (voir Figure 1.11) [29].

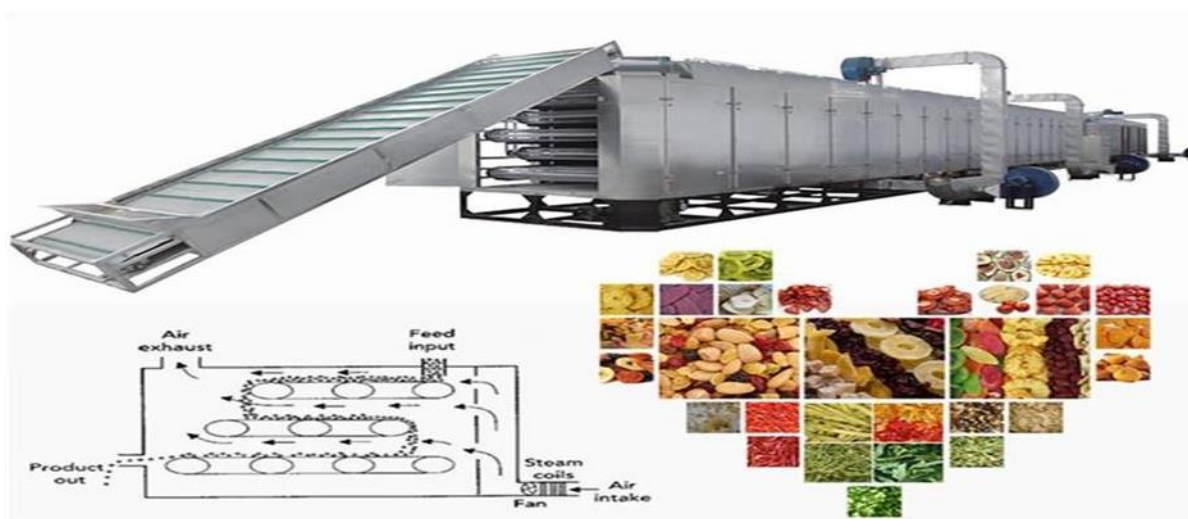


Figure 1.11: Sécheurs à courroie [30].

1.3.12 Autres techniques de séchage utilisées dans l'industrie alimentaire

- **Lyophilisation:**

La lyophilisation ou la lyophilisation par déshydratation est une méthode de conservation des aliments qui consiste à éliminer l'eau des aliments congelés par sublimation ou par évaporation de l'eau, c.-à-d. l'évaporation à mesure qu'elle se déplace du solide (congelé). au statut invasif sans passer par l'état liquide dans certaines conditions de basse température et de basse pression entourant la substance, également connu sous le nom de cryodation (excessive) (voir Figure 1.12) [31].



Figure 1.12: Photo de Lyophilisateur [34].

- **Séchage sous vide:**

Le séchage sous vide est un procédé de purification thermique utilisé pour éliminer l'humidité présente dans un matériau en créant un vide. Le séchage sous vide est utilisé dans de nombreux secteurs industriels pour sécher les matériaux rapidement, doucement et efficacement.



Figure 1.13: Sécheur de plateau de vide pour pharmaceutique [33].

Le liquide contenu dans le matériau traité est évaporé en réduisant la pression et extrait sous forme de vapeur. Cette technique est particulièrement adaptée au séchage de produits sensibles qui seront endommagés ou dégradés s'ils sont séchés par la chaleur, tels que les produits chimiques, les médicaments ou les denrées alimentaires. De plus, le séchage sous vide est la procédure choisie pour sécher des produits avec une grande surface, tels que des granulés de

plastique ou d'autres matériaux hygroscopiques et des composants industriels (voir Figure 1.13) [33].

- **Séchage de micro-ondes :**

Le séchage assisté par micro-ondes est une méthode de séchage qui utilise les ondes électromagnétiques pour accélérer le processus de séchage. Cette technique peut être réalisée en batch ou en continu, sous vide ou à pression. Le séchage conventionnel se fait au moyen du transfert de chaleur au produit, par le biais des parois internes du sécheur chauffé par une chemise. En revanche, le séchage assisté par micro-ondes est un procédé plus rapide et efficace, car il permet de transférer la chaleur directement au produit sans passer par les parois du sécheur.

Les avantages du séchage assisté par micro-ondes incluent une meilleure conservation des aliments, une réduction de la masse et du volume des aliments, une diminution de l'encombrement, et une facilitation du transport. Cependant, il est important de noter que le séchage par micro-ondes peut entraîner des modifications dans le goût, l'odeur, l'arôme et les propriétés nutritionnelles des aliments (voir Figure 1.14) [34].



Figure 1.14: Sécheur de plateau de vide pour pharmaceutique [35].

1.4 Méthodes de séchage

Cette opération est assurée par plusieurs méthodes par l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolé thermiquement pour assurer la continuité de l'opération de séchage [39].

Séchage mécanique : C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression et filtration).

Séchage chimique : C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants par équilibre osmotique pour extraire l'eau (chlorure de calcium, ...).

Séchage thermique : Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne.

1.5 Mode de séchage

- **Séchage au soleil** :

Le séchage au soleil est l'une des positions de séchage les plus couramment utilisées. C'est une façon naturelle d'exposer les aliments ou les objets à la déshydratation dans la chaleur du soleil. Cette méthode est facile à mettre en œuvre et ne nécessite pas de coûts supplémentaires. Cependant, cela dépend des conditions météorologiques et peut prendre plus de temps que les autres méthodes de séchage.

- **Séchage à l'air** :

Le séchage à l'air est une méthode de séchage qui utilise simplement l'air ambiant pour éliminer l'humidité des aliments ou des objets à sécher. Cette méthode est plus rapide que le séchage au soleil, mais il faut toujours veiller à ce que les aliments ou les objets soient bien ventilés pour éviter la moisissure. De plus, cette méthode peut être affectée par les conditions météorologiques, comme l'humidité de l'air.

- **Séchage au four** :

Le séchage au four est une méthode de séchage qui utilise la chaleur générée par un four pour éliminer l'humidité des aliments ou des objets à sécher. Cette méthode est rapide et permet un contrôle précis de la température. Cependant, il est important de surveiller attentivement le processus de séchage, car une température trop élevée peut brûler les aliments ou endommager les objets. De plus, cette méthode nécessite l'utilisation d'un four, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires en énergie.

- **Comparaison des modes de séchage:**

Méthode	Avantage	Inconvénient
Séchage au soleil	Gratuit, méthode naturelle	Dépend des conditions météorologiques, prend du temps
Séchage à l'air	Rapide, nécessite peu de ressources	Doit être bien ventilé, peut être affecté par l'humidité de l'air
Séchage au four	Contrôle précis de la température, rapide	Peut brûler les aliments/objets, coûts supplémentaires d'énergie

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients pour différents mode de séchage.

1.6 Conclusion

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable très précieuse et respectueuse de l'environnement. Son abondance et sa nature non polluante augmentent l'utilisation de l'énergie solaire pour diverses applications thermiques, y compris le chauffage, la distillation de l'eau et le séchage. Le processus de séchage lui-même vise à extraire l'eau des solides, semi-solides ou liquides par évaporation, dans le but ultime de préserver les aliments en arrêtant la croissance microbienne et les réactions enzymatiques. De plus, le séchage réduit le poids et la taille des produits, facilitant leur transport et leur stockage. Dans ce chapitre, nous avons exploré différentes façons et techniques de séchage solaire et les différentes méthodes et modes de séchage. Nous avons ouvert un volet sur les types de capteurs solaire suite à l'utilisation de ce dernier dans l'opération de séchage de produit agricole ananas.

Références

- [1] Le séchage des produits agricoles, Programme de Radio Rurale 08/1, CTA Centre technique de coopération agricole et rurale, Postbus 380, 6700 A J Wageningen, Pays Bas. <http://www.cta.int>
- [2] Marco Riccia, Enrico Boccie, Emanuele Michelangelib, Andrea Micangelic, Mauro Villarinid, Vincenzo Nasoc (2015). Experimental Tests of Solar Collectors Prototypes Systems. *EnergyProcedia* 82, (2015), pp. 744 –751.
- [3] Nadia.Nadir (2009), Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah –Ouargla.
- [4] James Allan, Zahir Dehouche¹, Sinisa Stankovic et Lascelle Mauricette, (2015). Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors. *Energy Science & Engineering*, 3(4), pp. 310–326.
- [5] R. Vipul Mahajan, Prof. A.K. Battu, (2022). Case Study of Solar Flat Plate Collector. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(2), pp. 618-624.
- [6] EkoYohanes Setyawan, Arif Kurniawan, Febi Rahmadianto, Richard A. M Napitupulu, Parulian Siagian, (2020). Flat Plate Type Solar Collector Performance Using Double Thermal Insulation. *Materials Science and Engineering*, 852 012044.
- [7] Benamar Roumaïssa et gouri Kaouther, (2018). Séchage Solaire des Produits Agricoles mémoire de master, université de kasdi merbah, Ouargla.
- [8] A.Benseddik,(2011). Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirectes fonctionnant en convection forcée. Mémoire de Magistère : université Aboubeker Belkaid, Tlemcen.
- [9] <https://dryingallfoods.com/how-to-dry-flowers/> (consulté le 25/05/2024).
- [10] Om Prakash. Anil Kumar, (2017). *Solar Drying Technology*. Library of Congress Control Number: 2017949696

- [11] Jasmina Skerlic, Danijela Nikolic, Dragan Cvetkovic, Aleksandar Miškovic, (2018). Optimal position of solar collectors: a review. Applied Engineering Letters Vol.3, No.4, pp.129-134.
- [12] Houhou Hatem, (2012).,Etude théorique et expérimentale de séchage solaire de certains produit agro-alimentaire, mémoire de majister, université de Mohamed Khider – Biskra.
- [13] A. TOM, (2015). Contribution au séchage solaire des produits carnés: modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux, Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.
- [14] Thanjavur, Tamil Nadu, (2020). Drying and Dehydration of Fruits and Vegetables. Indian Institute of Food Processing Technology, 233340582/233340582.
- [15] <https://extension.okstate.edu/programs/oklahoma-gardening/recipes/drying-fruits-and-vegetables.html> (consulté le 02/05/2024)
- [16] <https://www.dreamstime.com/stock-photo-dried-vegetables-image28537450> (consulté le 02/05/2024)
- [17] Brett L. Markham (2014). The Food Dehydrating Bible. E-book ISBN: 978-1- 62914286-9
- [18] Akroum Yassine .Belhadi Zakaria, “Drying study of an agricultural product (banana) Experimental study”, mémoire de master. Université de Ammar Thlidji Laghouat ,2023 .
- [19] Dadda Maroua et Medjouri Rayhana , ‘ ‘ Séchage et qualité des aliments par le procédé de séchage solaire (indirecte) dans une zone aride ‘ ’, mémoire de master . Université de Kasdi Merbah, Ouargla.
- [20] Sachin V. Jangam, Chung Lim Law and Arun S. Mujumdar (2010). Drying of Foods, Vegetables and Fruits (Volume 1).

- [21] Charlotte P. Brennand (1994). Home Drying of Food. Extension Food Science Specialist (FN-330), Publisher Utah State University Extension.
- [22] Caitlyn Chappell & Sarah Lebel (2009). Solar Drying Shed for Cassava in Malawi. Department of bioresource engineering, 2111 Lakeshore road, Ste-Anne de belle vue, H 9 X 3 V 9, Quebec, Canada.
- [23] <https://horticulture.ucdavis.edu/information/chimney-solar-dryer-manual> (consulté le 25/05/2024)
- [24] Weiss, W. and Buchinger, J. (2003) Solar Drying: Establishment of a Production, Sales and Consulting Infrastructure for Solar Thermal Plants in Zimbabwe. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (AEE) of the Institute for Sustainable Technologies, Austria.
- [25] <https://www.greenhousesolardryer.com/2021/05/shall-we-get-to-know-some-facts-regarding-types-of-solar-dryers/> (consulté le 25/05/2024).
- [26] M. Veerakumar¹, KCK.Vijayakumar², P. Navaneethakrishnan³ (2014). Different Drying Methods for Agriculture Products and Eatables – A Review. International Journal of Mathematical Sciences and Engineering (IJMSE)
- [27] Belachi Bouchekima, Slimane Boughali, Belachi, Warda, (2009), Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires, Mémoire de magister en physique, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [28] Manaa Saadeddine, 2017,.Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques. Thèse de doctorat. Université de Mohamed Khider – Biskra.
- [29] <https://www.gemdryers.com/belt-dryer-typical-applications/>
- [30] <https://www.gc-machinery.com/fruit-drying-machines/> (consulté le 25/05/2024).
- [31] <https://ar.laboao.com/news/technical-knowledge/what-are-the-benefits-of-a-freeze-dryer> (consulté le 25/05/2024).
- [32] https://arabic.smallfreezedryer.com/photo/pl38190323-240_tfd0_4.jpg (consulté le 25/05/2024).

- [33] <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/vacuum-drying>
- [34] Le séchage combiné convection-micro-ondes : modelisation-validation-optimisation Thiéry Constant To cite this version: Thiéry Constant. Le séchage combiné convection-micro-ondes : modélisation-validation-optimisation. Matériaux. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1992. Français. ffNNT : 1992INPL115Nff. fftel-01751093
- [35] <https://backend.weiss-technik.com/webapp/weisstechnik/products/pharmaceutical-technology/vhm-hephaistos-patented-microwave-technology/vhm-hephaistos-patented-microwave-technology-1.png> (consulté le 25/05/2024).
- [36] Rashid eang. NakornTippayawong (2017). Superheated Steam Drying of Cashew Kernels with Testa. Energy Procedia, 138, pp. 674–679.
- [37] <https://www.eurobest.co.th/en/superheated-steam-dryer/> (consulté le 25/05/2024).
- [38] <https://www.bxdrymachine.com/heat-pump-fruit-drying-machine.html> (consulté le 25/05/2024).
- [39] Dadda Maroua .Medjouri Rayhana (2020), Séchage et qualité des aliments par le procédé de séchage solaire (indirecte) dans une zone aride. Mémoire de master. Université de Kasdi Merbah, Ouargla.

chapitre 02:

Panneau solaire à air & chambre de séchage

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, je vais présenter une fiche technique sur les différents composants constituant : le panneau solaire à air, la chambre de séchage et la partie qui fait la jonction entre les deux parties. Le banc d'essai a fait l'objet de thème pour des étudiants de master en fabrication mécanique & productique pour l'année universitaire 2020-2021. Ces étudiants ont participé à la fabrication du panneau solaire à air avec une chambre à sécher dans l'atelier de génie mécanique de l'université d'Ammar Tlédji-Laghouat. Le but de banc d'essai était de bénéficier de l'énergie solaire très abondante dans la région de Laghouat pour minimiser le coût du séchage en premier lieu et en deuxième lieu voir la progression du processus de séchage dans la région de Laghouat. Cette année, on a choisi le fruit d'Ananas pour l'exploitation expérimentale.

2.2 Les principaux éléments constituant le banc d'essai



Figure2.1: Une photo du banc d'essai montrant avec ces principaux constituants.

Numéro	Désignation
01	Absorbeur
02	Afficheurs des thermocouples (pour l'absorbeur et la plaque inférieure)
03	Structure métallique (support)
04	Chambre à sécher
05	Extracteur d'air
06	Balance de poids
07	Tuyau d'extraction d'air
08	Plaque des afficheurs thermiques
09	Plaque en bois pour distribution d'air

Tableau 2.1 : Éléments principaux du banc d'essai.



Figure 2.2 : Vue en arrière du banc d'essai.

2.3 Matériaux utilisés dans la fabrication du banc d'essai

2.3.1 La tôle galvanisée

« La galvanisation à chaud ne consiste pas uniquement à déposer du zinc à la surface de l'acier. Le revêtement de zinc est métallurgiquement lié à l'acier de base, car il se produit une réaction métallurgique de diffusion entre le zinc et le fer.

Quand on retire l'acier du bain, il s'est formé à sa surface plusieurs couches d'alliages zinc-fer sur lesquelles le zinc entraîné se solidifie. Ces différentes couches d'alliages plus dures que l'acier de base ont une teneur en zinc de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface du revêtement. Ainsi, cette spécificité liée au procédé de galvanisation offre au revêtement protecteur adhérence, imperméabilité, et résistance mécanique. » [1]

L'épaisseur de la tôle utilisée est égale 1.5mm (voir Figure 2.3).

	Aspect	Résistance mécanique du revêtement	Masse de revêtement	Utilisation
Cat. A	Excellent	Excellente	Standard, conforme au minimum de la norme	Recherche esthétique et anticorrosion
Cat. B	Bon	Bonne	Standard, généralement supérieure au minimum de la norme	Recherche anticorrosion et aspect correct
Cat. C	Moyen	Moyenne	Plus forte - pour milieux agressifs	Recherche optimum de protection

Tableau 2.2 : La Norme AFNOR NF 35-503 [1].



Figure 2.3 : Tôle galvanisée.

2.3.2 Le polystyrène

Le terme « polystyrène » codé PS désigne un polymère dont le monomère –comprenez l'élément moléculaire répété est le styrène. Ce dernier est formé d'un benzène accroché au composé CH-CH₂.

Le polystyrène est obtenu dans un autoclave, par polymérisation du styrène. Le styrène est, quant à lui, l'un des produits du raffinage du pétrole. Solide et dur, le polystyrène peut être mélangé à un gaz pour créer un matériau très léger [2]. Dans notre projet on a utilisé le Polystyrène pour assurer une isolation efficace, on a choisi une plaque de polystyrène d'une épaisseur égale 40mm (voir Figure 2.4).



Figure 2.4: Polystyrène expansé [2].

Le polystyrène est un matériau issu de la famille des isolants synthétiques. Il en existe deux types : le polystyrène expansé (PSE) et le polystyrène extrudé (XPS). On les trouve sous différentes formes mais le panneau de polystyrène est sans doute le plus utilisé [2].

2.3.3 Le verre

Le verre est un matériau fragile et transparent. Le rôle du verre dans ce projet est qu'il condense et concentre la chaleur de soleil sur la tôle galvanisée.

Propriété	Valeur
Module d'élasticité	68935N/mm ²
Coefficient de dilatation thermique	9e-006/K
Conductivité thermique	0.74976W/(m·K)
Chaleur spécifique	834.61J/(kg·K)

Tableau 2.3: Caractéristiques du matériau verre [3].

2.3.4 Le bois [4]

Le bois est un matériau naturel d'origine végétale. Il est constitué par un tissu végétal formant la plus grande partie du tronc des plantes ligneuses. Le bois assure, chez la plante, le rôle de conduction de la sève brute des racines jusqu'aux feuilles et le rôle de soutien mécanique de l'arbre [4].

➤ Bois d'œuvre

Le bois d'œuvre est celui qu'on utilise pour la construction de charpentes de maisons et pour la fabrication d'une multitude d'autres produits, souvent reliés à la construction et à la rénovation résidentielles³⁰.

(1) Bois brut sous forme de poteaux et rondins, après sciage ou refente généralement.

Scié à partir de grumes

(2) Bois de structure: charpentes, maison en bois (bois empilé, maison à ossature bois ou poteaux poutre) et bardages, terrasses, traverses de chemins de fer. Ces bois peuvent être bruts de sciage ou rabotés. Le bois permet de réguler le taux d'humidité et la température à l'intérieur. C'est un excellent isolant acoustique. En cas d'incendie, le bois transmet la chaleur 10 fois moins vite que le béton et 250 fois moins vite que l'acier.

(3) Bois de marine, bois tors, bois de mâture: membrures, bordés, espars (mât, bôme...), pièce de quille.

(4) Bois aéronautiques : structures des premiers avions. Le contreplaqué moulé est une invention de l'aéronautique, aussi employé dans les avions monocoques en bois. Aujourd'hui plutôt utilisé pour les petits avions de tourisme en construction amateur ou industrielle. Sciages bruts, bois à usage domestique : coffrages à béton, échafaudages, palettes, emballages...

(5) Bois rabotés : lambris (frise murale), parquets, menuiserie, clin, lame de terrasse, etc.

Placages : Bois déroulés ou tranchés. Essences fines ébénisterie...

(6) Bois d'ingénierie, bois de la seconde transformation : lamellé-collé, reconstitué, abouté, contreplaqué, laminé, poutrelle en "I"...

(7) Bois de tournage : boules, quilles, manches à outils, jouets...

(8) Bois de tranchage : contreplaqués...

(9) Bois cintré : chaises « Thonet ».

(10) Panneaux : aggloméré, contre plaqué, panneaux de grande particule (OSB), panneaux de particule ou aggloméré, panneaux de fibre moyenne densité (MDF) ou haute densité (HDF).

2.4 La chambre de séchage

C'est un coffre d'une hauteur de 550 mm, d'une largeur de 550 mm et une longueur de 960 mm. Le coffre est équipé d'une isolation thermique à l'intérieure par une plaque de polystyrène de 20 mm d'épaisseur. Tous les joints ont été fermés par l'utilisation de la silicone.

L'air chauffé pénètre à travers une ouverture rectangulaire pour sortir par la voie d'un collecteur cylindrique en utilisant un extracteur d'air alimentée par une source d'énergie électrique pour la création d'un écoulement d'air forcé (voir Figure 2.5).



Figure 2.5 : Chambre à sécher.

2.5 Les différentes étapes de fabrication du banc d'essai

1. Montage du cadre inférieur du panneau solaire (voir Figure 2.6);
2. Le cadre inférieure du panneau avec une contre plaquée d'épaisseur de 3.6 mm (voir Figure 2.7);
3. L'ajout de la plaque de polystyrène au dessus du contre plaquée (voir Figure 2.8);
4. Le cadre inférieure du banc d'essai après l'ajout d'une plaque de polystyrène (40 mm) + plaque MDF (e = 2.5 mm) + Tôle galvanisée (e =1.5 mm) (voir Figure 2.9);
5. L'ajout à l'intérieur de la chambre de séchage une plaque isolante en polystyrène (20 mm) + une couche en papier d'aluminium (voir Figure 2.10 et Figure 2.11).



Figure 2.6 : Montage du cadre inférieur du panneau solaire.



Figure 2.7 : Le cadre inferieure du panneau avec une contre plaquée d'épaisseur de 3.6 mm.



Figure 2.8 : L'ajout de la plaque de polystyrène au dessus du contre plaquée.



Figure 2.9 : Le cadre inferieur du banc d'essai après l'ajout d'une plaque de polystyrène (40 mm) + plaque MDF ($e = 2.5$ mm) + Tôle galvanisée ($e = 1.5$ mm).



Figure 2.10 : Une photo de la chambre à sécher.

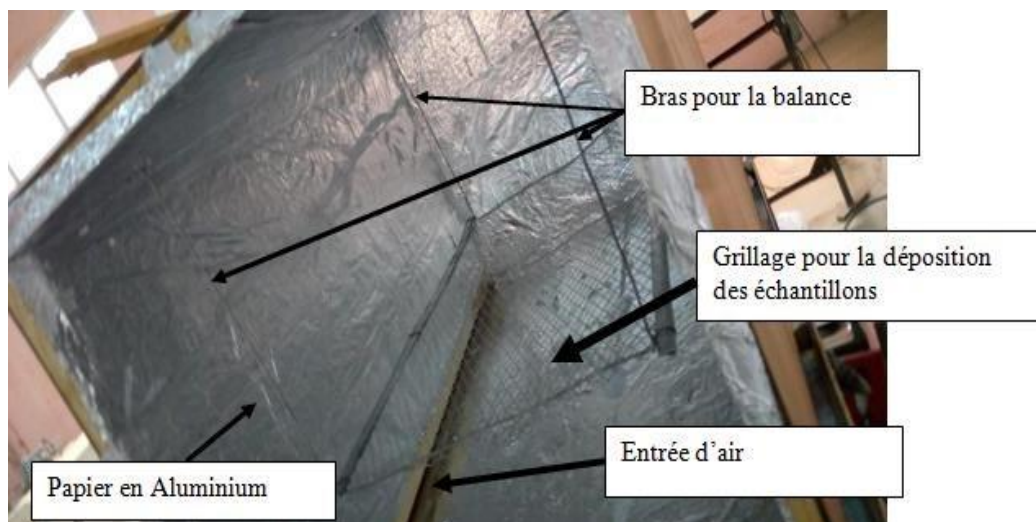


Figure 2.11 : Vue à l'intérieure de la chambre à sécher.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principaux constituants du panneau solaire à l'air avec la chambre à sécher. On a présenté aussi les différents matériaux locaux utilisés pour la fabrication du banc d'essai. Nous avons essayé de donner les différentes étapes de fabrication du banc d'essai dans l'atelier de mécanique à l'université de Laghouat.

Références

[1] « ISO 1461:2022 - Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis en fonte et en acier — Spécifications et méthodes d'essai [archive] », sur iso.org, août 2022 (consulté le 12 septembre 2022).

[2] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-polystyrene-10176/>

(Consulté le 8/05/2021).

[3] Bibliothèque des matériaux de logiciel SolidWorks 2016.

[4] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois> (consulté le 27/05/2024).

chapitre 03:
Résultats et discussion

3.1 Introduction

Le chapitre III vise à déterminer la masse finale après chaque type de séchage : par air, séchage forcé à l'aide d'un panneau solaire d'air et d'une pièce à sécher avec un flux d'air forcé et la dernière charge thermique naturelle (sans flux forcé) en utilisant uniquement un panneau solaire d'air et une salle de séchage. Deuxièmement, voyez l'effet de la variation d'épaisseur d'échantillon (4mm, 6mm et 8mm) sur le phénomène de séchage sur le produit réfléchi. Les températures et les taux d'humidité relative ont été enregistrés tout au long du processus de séchage.

3.2 Les conditions d'expérimentation

Pour réaliser notre expérimentation, des préparations sont nécessaires pour le bon déroulement de l'expérience concernant:

- Le découpage des échantillons selon les épaisseurs choisies;
- Le diamètre des échantillons ;
- La masse initiale des échantillons ;
- La date et l'état du ciel pour chaque type de séchage

Type de séchage	Épaisseur (mm)	Date	Diamètre de L'échantillon (mm)	Masse initiale (g)	Etat de ciel
A l'air	04	04.04.2024	87	102	Clair
	06			122	Clair
	08			144	Clair
Forcé	04	18.04.2024		72	Clair
	06	24.04.2024		86	Clair
	08	17.04.2024		176	Clair
Convection naturelle (chambre de séchage)	04	28.04.2024		100	Partiel
	06	02.05.2024		120	Clair
	08	06.05.2024		168	Clair

Tableau 3.1: Les données d'expérimentation avec spécification du jour, épaisseur et masse initiale des échantillons.

Toutes les valeurs des paramètres cités ci-dessus sont présentées dans le Tableau 3.1. Trois modes de séchage ont fait l'objet d'étude :

- Séchage forcée ;
- Séchage non forcé ou par convection naturelle ;
- Et finalement, le séchage à l'air (au soleil).

3.3 Séchage forcé

Dans ce type de séchage, on a utilisé un extracteur d'air pour l'écoulement forcé et un variateur de tension pour le contrôle du débit d'écoulement ($Dv = 0.0129402 \text{ m}^3/\text{s}$). Le processus de séchage comporte l'enregistrement des paramètres suivants : la température ($^{\circ}\text{C}$) et l'humidité relative (%) pour différents points tels que :

a- Température ambiante de l'air

On remarque que les deux courbes pour les épaisseurs 4 mm et 8 mm sont en voisinage avec un intervalle de température [$26.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $36.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$] par rapport à la troisième courbe (6 mm) qui est un peu éloignée des deux autres en présentant un intervalle [$18.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $26.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$] comme le montre la Figure 3.1.

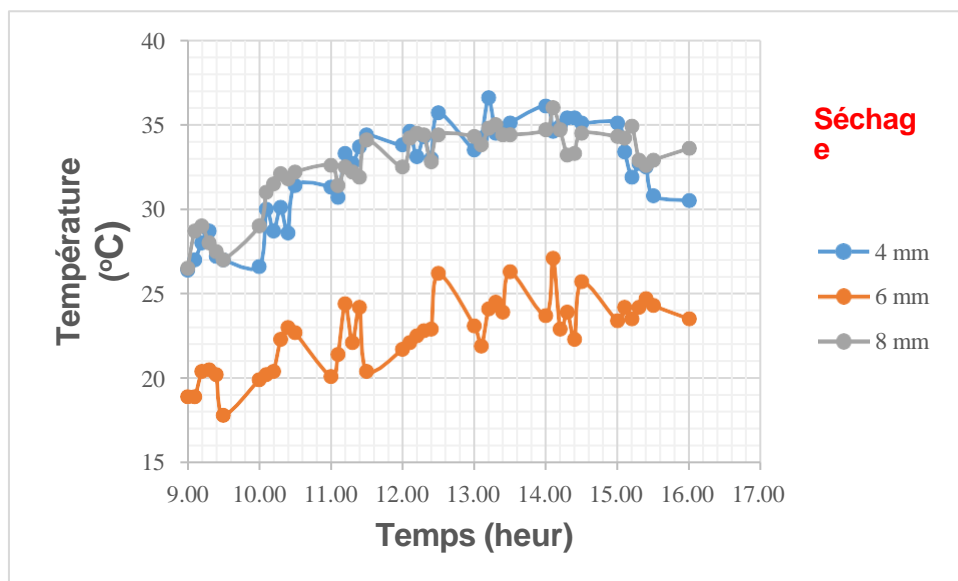


Figure 3.1: Évolution de la température de l'air ambiant en fonction de temps.

b - Humidité relative de l'air ambiant:

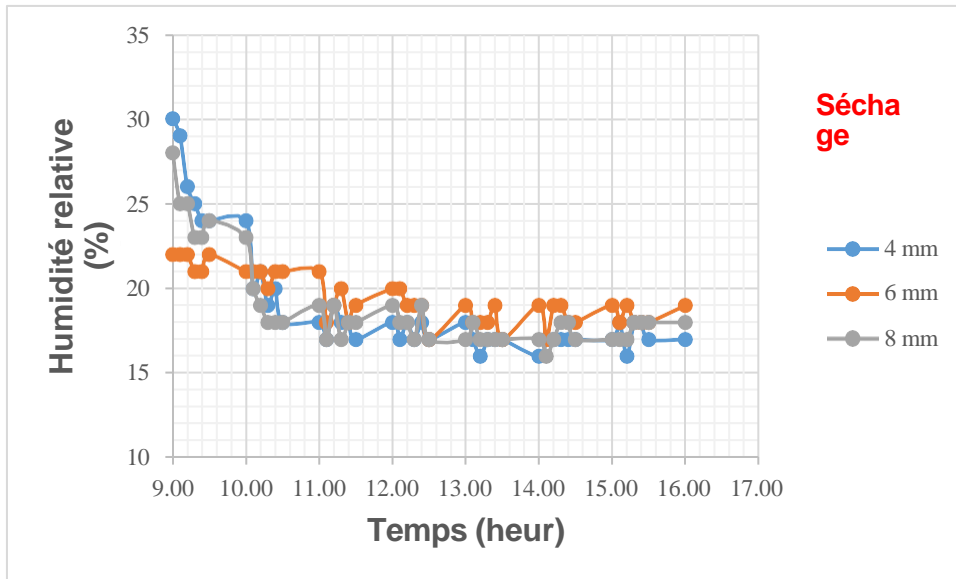


Figure 3.2: Variation de l'humidité relative de l'air ambiant (%) en fonction de temps.

Au début de 9h00 jusqu'à 10h00, on remarque une décroissance de l'humidité relative variant entre 30% et 20%. Après cette heure, elle représente des fluctuations restant dans les bornes de 16% et 19% (voir Figure 3.2).

c-Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

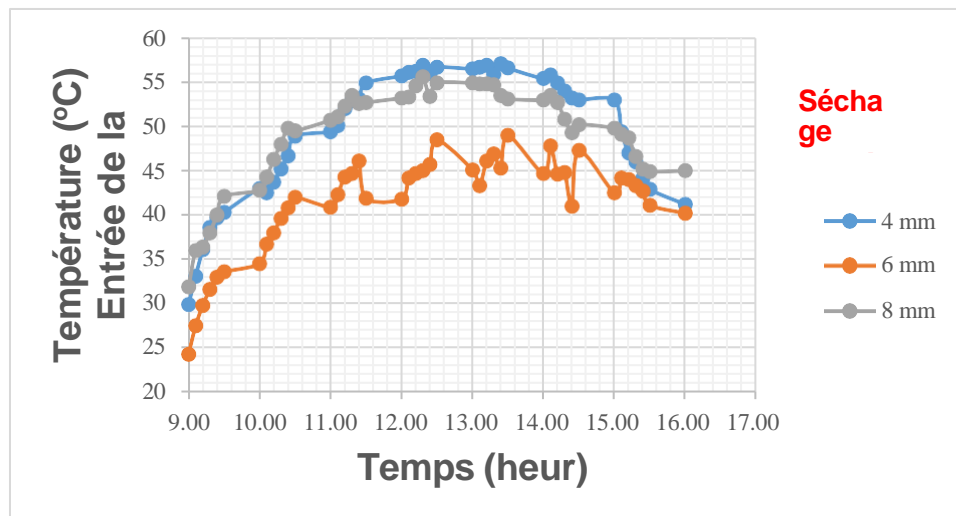


Figure 3.3: Croissance de la température de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.

La Figure 3.3 décrit la variation de la température de l'air à l'entrée du panneau solaire à air (milieu ambiant) et la sortie du panneau (entrée de la chambre de séchage). Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de 56.5 °C (4 mm), 45.1 °C (6 mm) et 54.9 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

d –L'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 10h00 avec un intervalle de 26% à 17%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 17% (voir Figure 3.4).

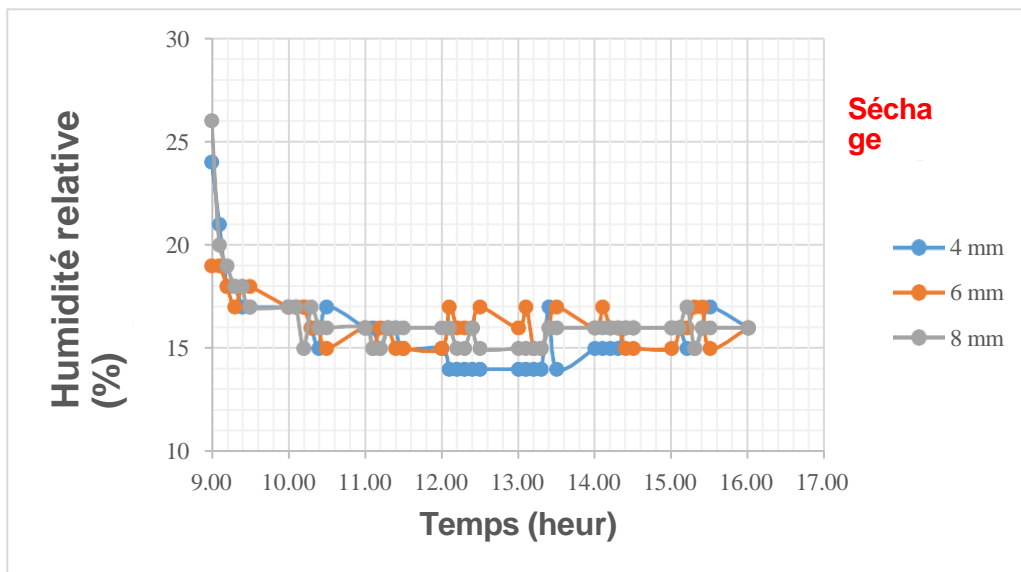


Figure 3.4:Évolution de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.

e-Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage

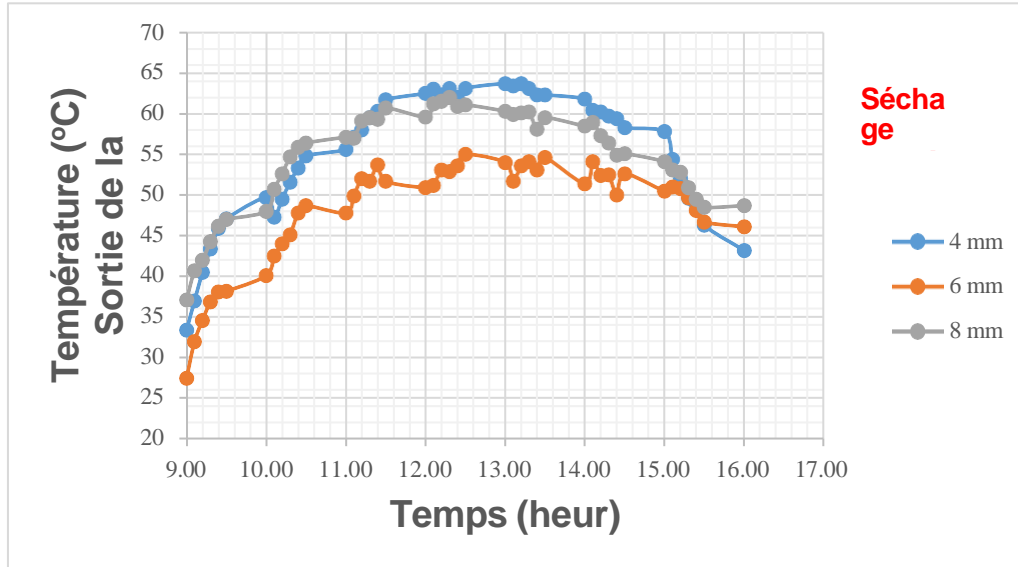


Figure 3.5: Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage en fonction de temps.

La Figure 3.5 décrit la variation de la température de l'air à la sortie de la chambre de séchage. Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de 63.7 °C (4 mm), 54 °C (6 mm) et 60.3 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00 avec un intervalle variant entre 43.2 °C et 48.7 °C. Les trois courbes suivent la même allure que la température de l'air à l'entrée de la chambre.

f-L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre

On observe la même chute brutale de l'humidité relative à la sortie de chambre par rapport à l'humidité relative à l'entrée de chambre en présentant un intervalle de 20% à 15% (9h00 jusqu'à 09h30) puis des fluctuations variant entre 14% et 17% pour le reste de la journée étudiée (voir Figure 3.6). La diminution en valeur pour les trois épaisseurs est due à l'écoulement forcé du fluide (air).

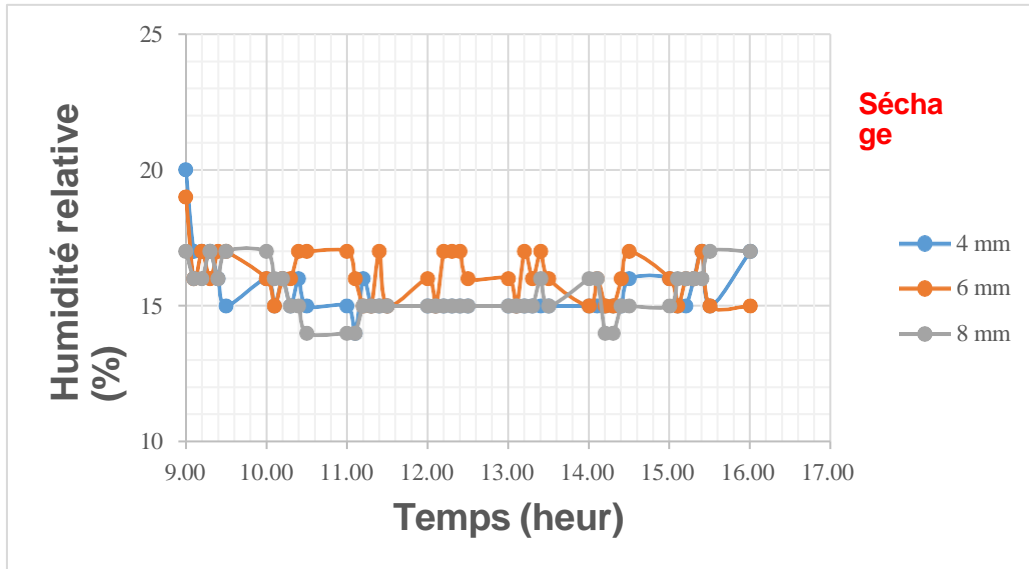


Figure 3.6:Évolution de l’humidité relative de l’air à sortie de la chambre en fonction de temps.

g - Température Moyenne dans la chambre de séchage

La Figure 3.7 décrit la variation de la température moyenne de l’air à l’intérieur de la chambre à sécher. Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de 52.5 °C (4 mm), 43.9 °C (6 mm) et 51.3 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu’à 16h00. En comparaison avec les températures à l’entrée de la chambre, on remarque une légère perte de température avec une valeur de 4 °C (4 mm), 1.2 °C (6 mm) et 3.6 °C (8 mm) à 13h00. Cela est dû à l’absorption des échantillons de la température afin d’assurer le phénomène de séchage. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

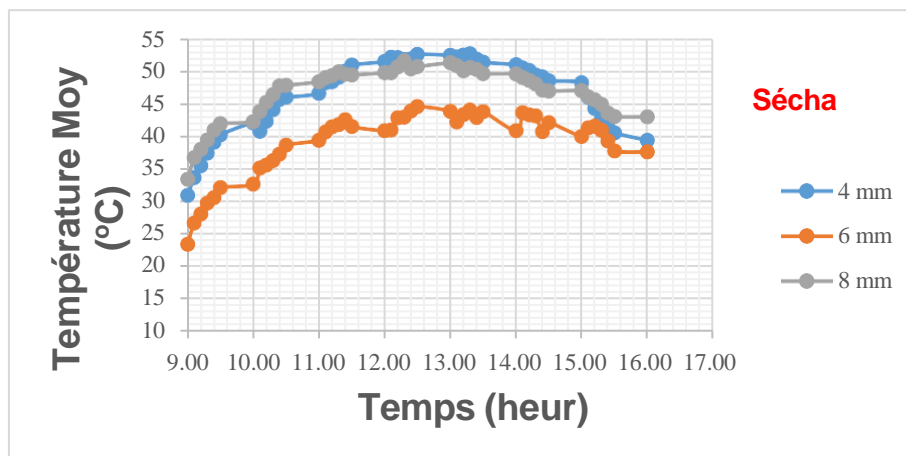


Figure 3.7: Variation de la température moyenne dans de la chambre de séchage en fonction de temps.

h- Humidité relative Moyenne de l'air dans la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 10h00 avec un intervalle de 22% à 18.5%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 17% (voir Figure 3.8). En comparaison avec les valeurs de l'humidité relative à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de l'humidité relative avec une valeur de 2 % (4 mm), 0.5 % (6 mm) et 6 % (8 mm) à 10h00. Cela est du à l'écoulement forcé de l'air.

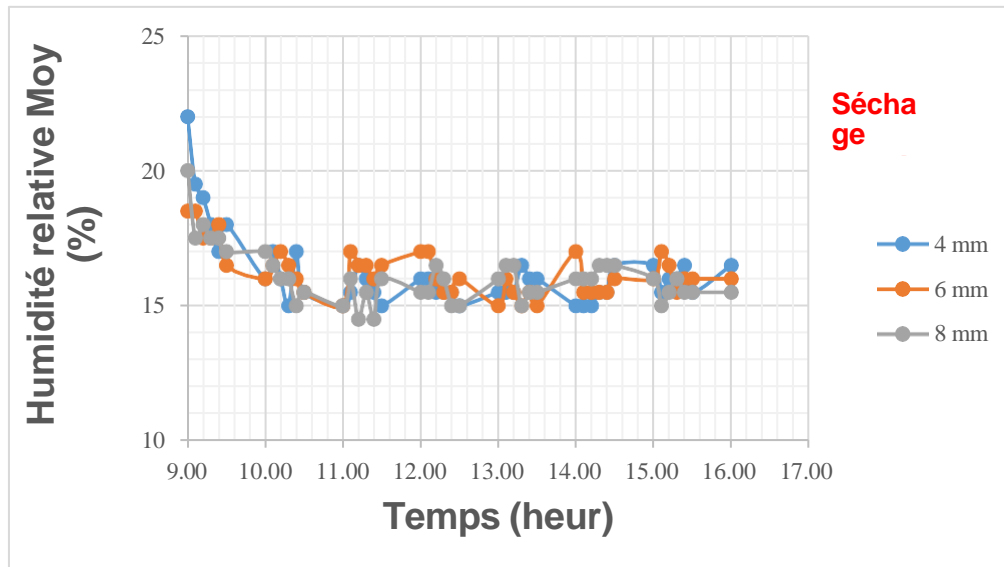


Figure 3.8: Croissance de l'humidité relative moyenne dans la chambre de séchage en fonction de temps.

I- Humidité relative expérimentale (MR_{exp})

$$MR_{exp} = \frac{m_t}{m_i} \quad (01)$$

Avec

m_t : masse instantanée pendant le processus de séchage (g) ;

m_i : masse initiale (g).

D'après la littérature, l'humidité relative expérimentale décroît de plus grande épaisseur à la petite épaisseur normalement on a la décroissance suit la manière suivante : $MR_{exp}(8 \text{ mm})$, $MR_{exp}(6 \text{ mm})$ et $MR_{exp}(4 \text{ mm})$. La Figure 3.9 montre la perte de masse d'eau par rapport à la masse initiale pour l'échantillon en fonction de temps. On remarque que la courbe $MR_{exp}(6 \text{ mm})$ est en troisième position en dessous de la courbe $MR_{exp}(4 \text{ mm})$ ce qu'est en contradiction avec la littérature . Cet ordre inverse est du que la journée de 6 mm est une journée froide par rapport aux autres courbes. Pour chaque masse d'échantillon, on donne la masse initiale et la masse finale (voir Tableau 3.2) on a :

Épaisseur (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)
4	72	10
6	87	11
8	176	27

Tableau 3.2 : Perte de masse d'eau pour les trois épaisseurs étudiées.

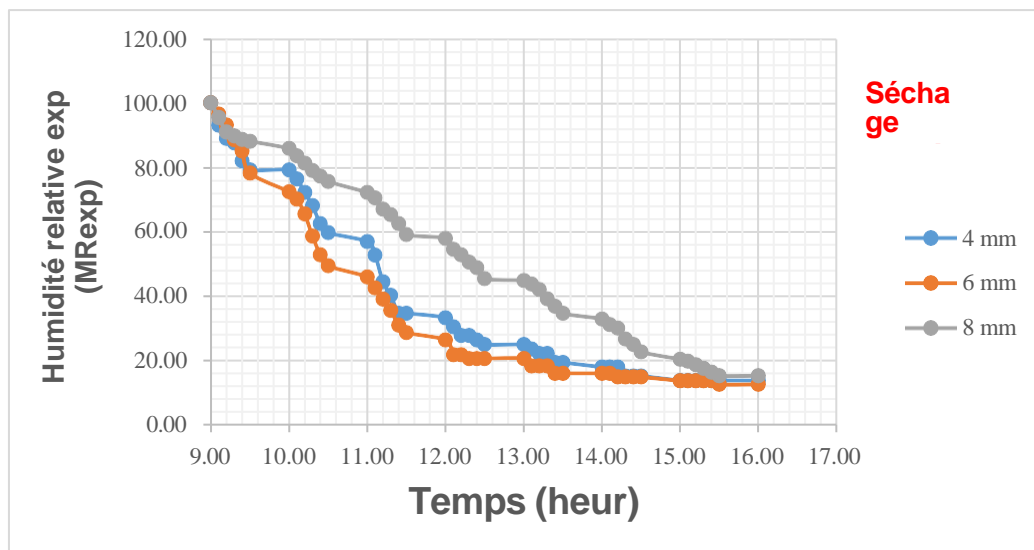
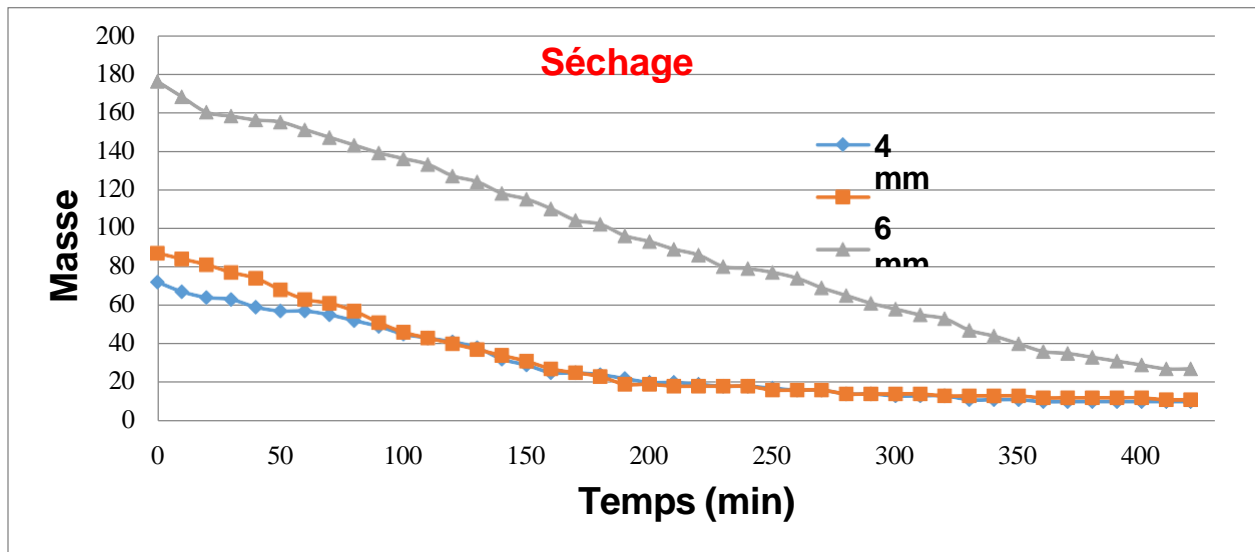


Figure 3.9: Variation de l'humidité relative expérimentale (MR_{exp}) en fonction de temps.

J- Perte de masse

Épaisseur (mm)	Temps de séchage (min)
4	300
6	360
8	410

Tableau 3.3 : Temps de séchage des échantillons.**Figure 3.10:**La perte de masse d'eau en fonction de temps.

La Figure 3.10 montre que plus on a une augmentation dans l'épaisseur plus le temps de séchage de l'échantillon est plus grand comme il est présenté par le Tableau 3.3.

3.4 Convection naturelle (sans écoulement forcé +chambre de séchage)

Dans ce mode de séchage, on arrête l'écoulement forcé par la mise hors tension de l'extracteur d'air et on laisse le panneau solaire à air a lui-même (convection naturelle). Le processus de séchage comporte l'enregistrement des paramètres suivants : la température (°C) et l'humidité relative (%) pour différents points tels que :

a- Température ambiante de l'air

On remarque que les trois courbes pour les épaisseurs 4 mm, 6 mm et 8 mm sont en voisinage avec un intervalle de température [16.6 °C, 31.9 °C] comme le montre la Figure 3.11.

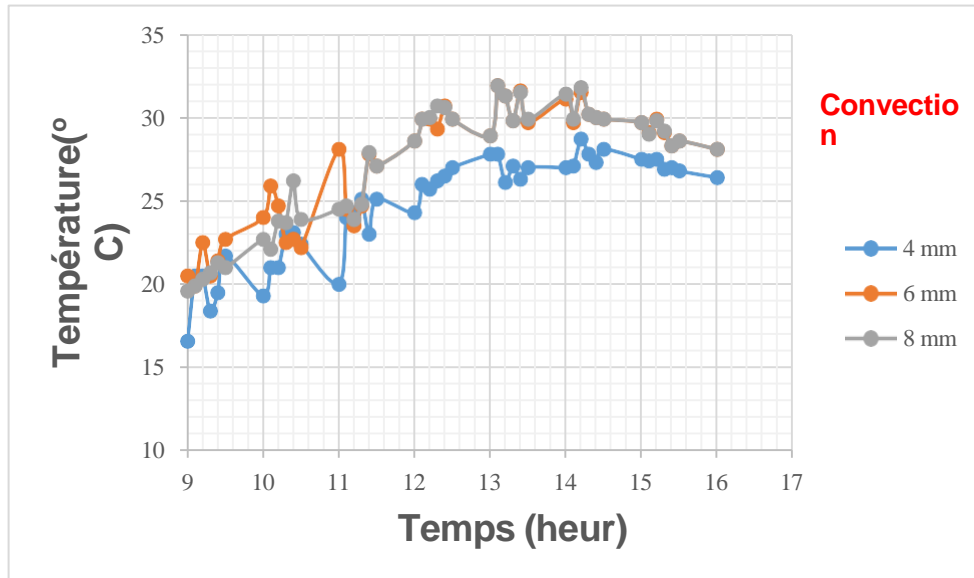


Figure 3.11: Évolution de la température de l'air ambiant en fonction de temps.

b- Humidité relative de l'air ambiant

On remarque une décroissance de l'humidité relative de l'air pour les épaisseurs 6 mm et 8 mm variant entre 33% et 18%. Pour l'épaisseur 4 mm, la même remarque reste valable sauf que le taux de l'humidité relative est très élevé par rapport aux autres épaisseurs présentant un intervalle entre 48 et 29 (voir Figure 3.12).

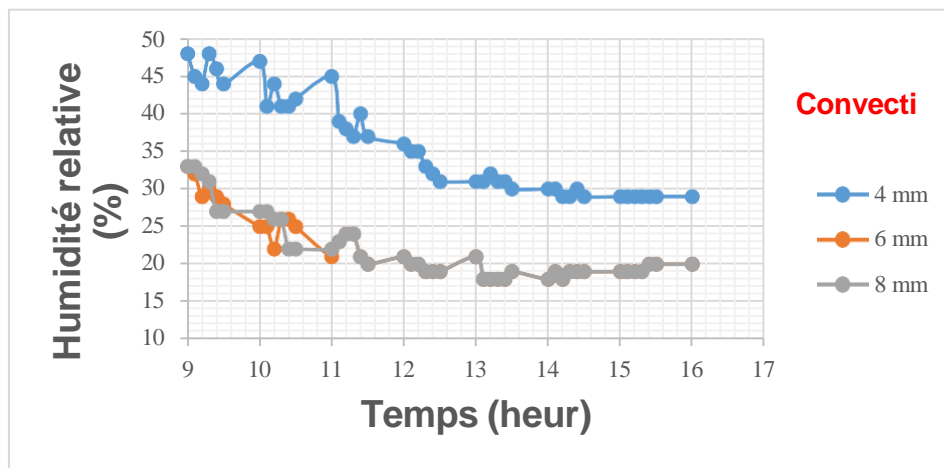


Figure 3.12: Variation de l'humidité relative de l'air ambiant (%) en fonction de temps.

C- Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

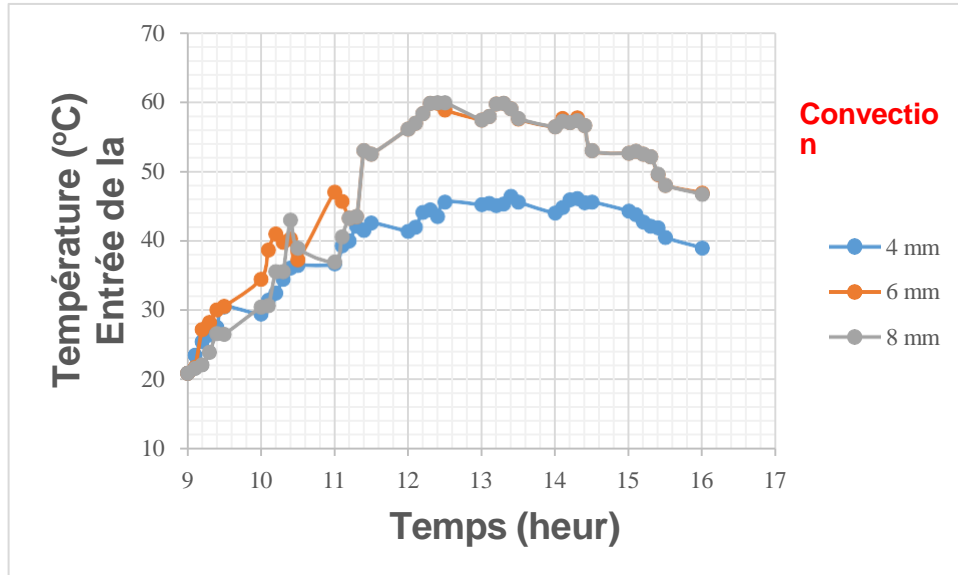


Figure 3.13: Croissance de la température de l'air à l'entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.

La Figure 3.13 décrit la variation de la température de l'air à l'entrée du panneau solaire à air (milieu ambiant) et la sortie du panneau (entrée de la chambre de séchage). Elle atteint à 13h00 une valeur de 45.2 °C (4 mm), 57.4 °C (6 mm) et 57.4 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage. On remarque aussi un accroissement de température ΔT variant entre 20.6 °C et 23 °C pour le séchage forcé et entre 17.4 °C et 28.5 °C pour le séchage convection naturelle pour les trois épaisseurs.

d - Humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 11h00 avec un intervalle de 37% à 15%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 18% (voir Figure 3.14).

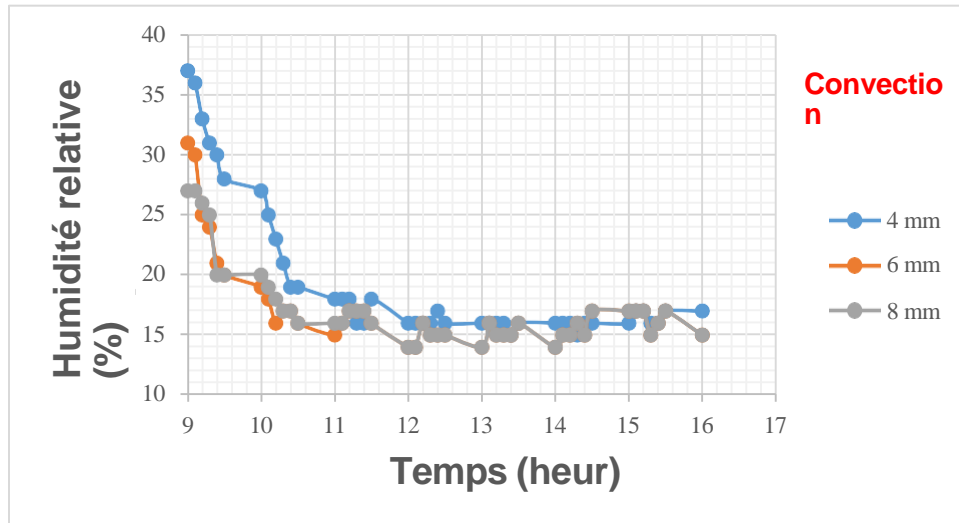


Figure 3.14:Évolution de l’humidité relative de l’air à l’entrée de la chambre à sécher en fonction de temps.

e- **Température de l’air à la sortie de la chambre de séchage**

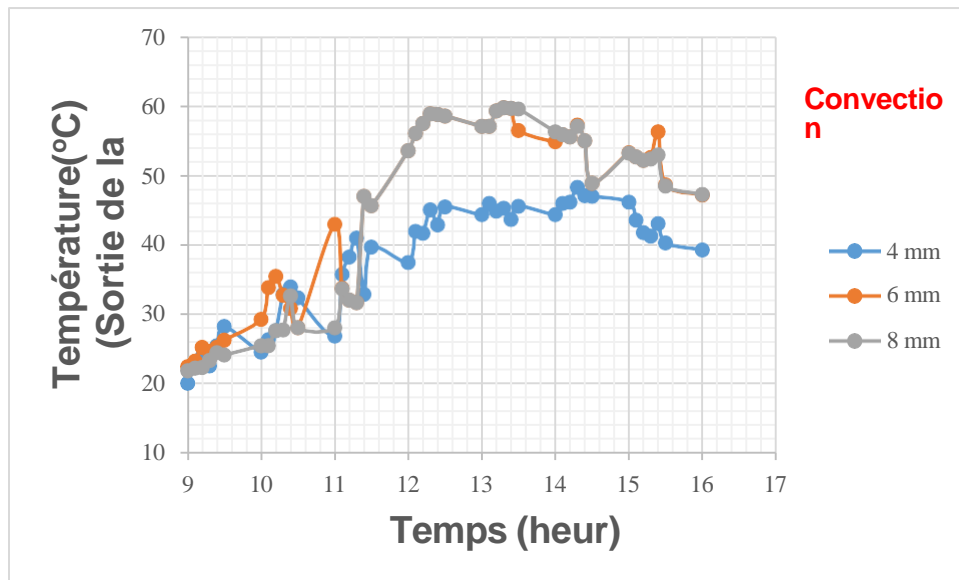


Figure 3.15: Température de l’air à la sortie de la chambre à sécher en fonction de temps.

La Figure 3.15 décrit la variation de la température de l’air à la sortie de la chambre de séchage. Elle atteint son maximum à 13h10 avec une valeur de 46 °C (4 mm), 57.1 °C (6 mm) et 57.1 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu’à 16h00 avec un intervalle variant entre 39.3 °C et 47.2 °C. Les trois courbes suivent la même allure que la température de l’air à l’entrée de la chambre avec une légère diminution de la température à la sortie de la chambre pour les trois épaisseurs étudiées.

f- Humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage

On observe la même chute brutale de l'humidité relative à la sortie de chambre par rapport à l'humidité relative à l'entrée de chambre en présentant un intervalle de 34% à 17% (9h00 jusqu'à 12h00) puis des fluctuations variant entre 14% et 18% pour le reste de la journée étudiée (voir Figure 3.16) avec une légère augmentation de l'humidité relative à la sortie de la chambre (1%-2%) pour les trois épaisseurs étudiées.

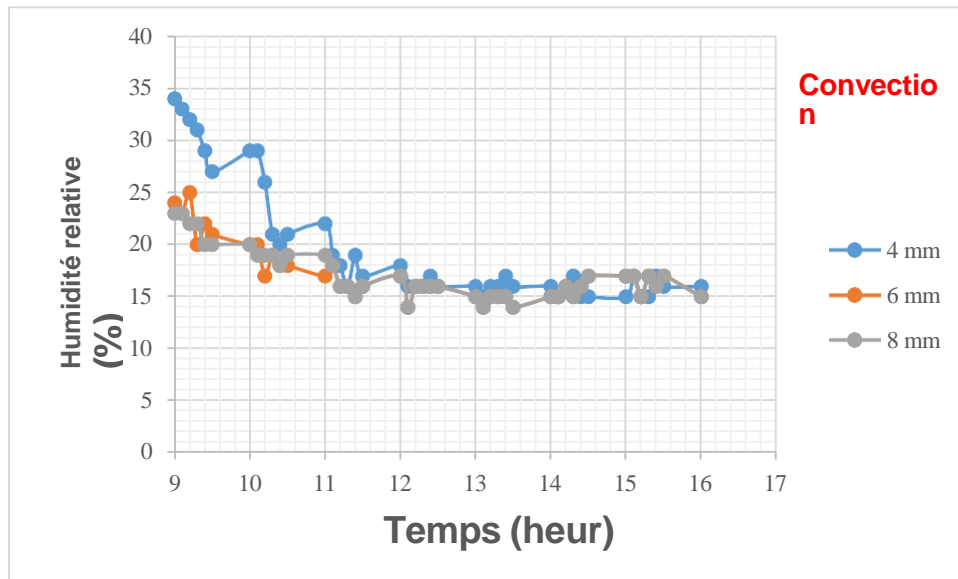


Figure 3.16:Évolution de l'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre en fonction de temps.

g- Température Moyenne (Moy) de l'air dans la chambre de séchage

La Figure 3.17 décrit la variation de la température moyenne de l'air à l'intérieur de la chambre à sécher. Elle atteint son maximum à 13h30 avec une valeur de 40.5 °C (4 mm), 51.5 °C (6 mm) et 50.4 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. En comparaison avec les températures à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de température avec une valeur de 4.8 °C (4 mm), 8.3 °C (6 mm) et 9.4 °C (8 mm) à 13h30. Cela est dû à l'absorption des échantillons de la température afin d'assurer le phénomène de séchage. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

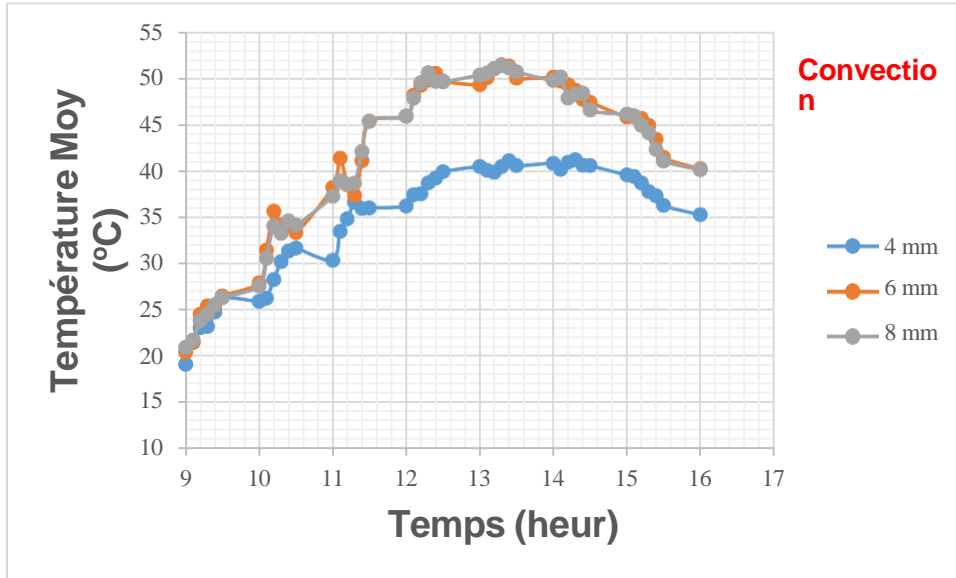


Figure 3.17: Variation de la température moyenne dans de la chambre de séchage en fonction de temps.

h- Humidité relative Moyenne (Moy) de l’air dans la chambre de séchage

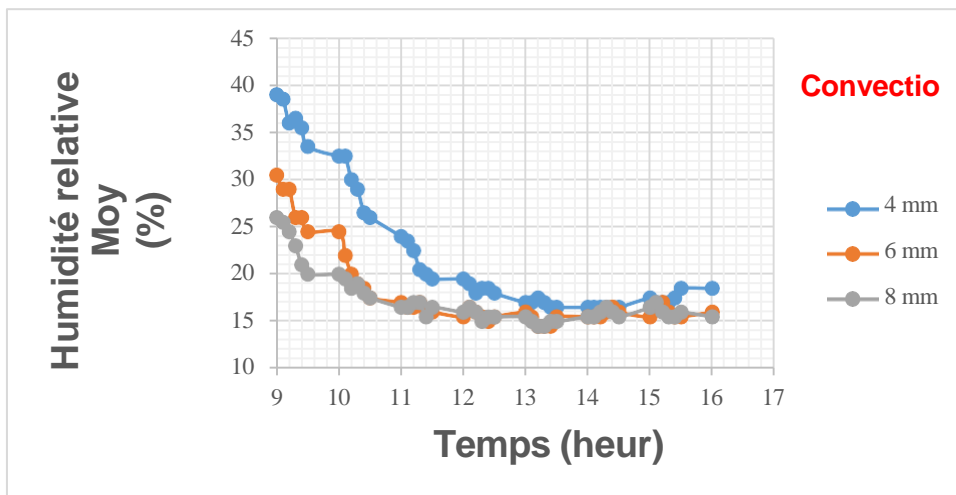


Figure 3.18: Croissance de l’humidité relative moyenne dans la chambre de séchage en fonction de temps.

On remarque une chute brutale de l’humidité relative de l’air allant de 9h00 à 12h00 avec un intervalle de 39% à 15.5%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14.5% et 19.5% (voir

Figure 3.18). En comparaison avec les valeurs de l'humidité relative à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de l'humidité relative avec une valeur de 3.5 % (4 mm), 1.5 % (6 mm) et 2 % (8 mm) à 12h00.

I- Humidité relative expérimentale (MR_{exp}) :

Pour chaque masse d'échantillon, on donne la masse initiale et la masse finale (voir Tableau 3.4) on a :

Épaisseur (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)
4	100	16
6	120	20
8	168	27

Tableau 3.4 : Perte de masse d'eau pour les trois épaisseurs étudiées.

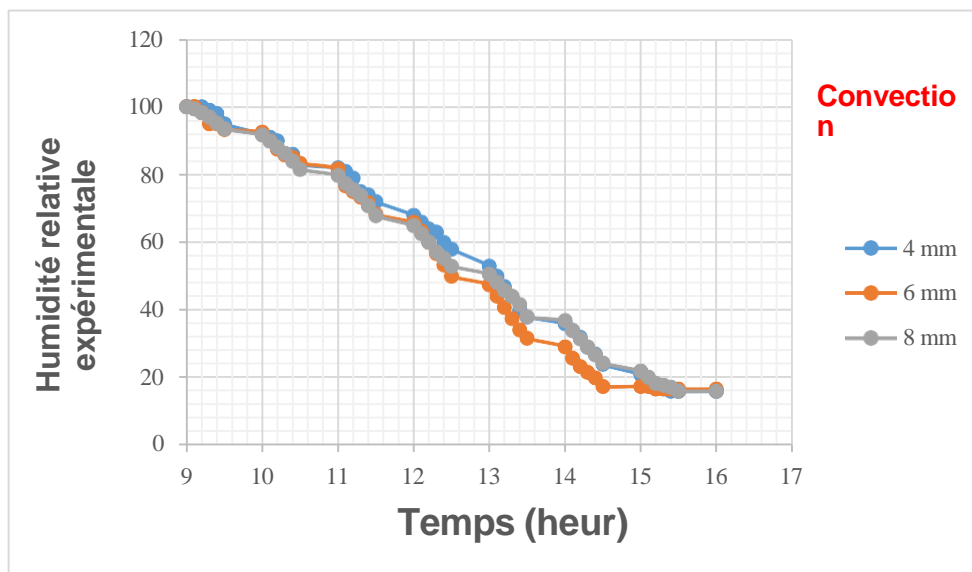


Figure 3.19: Variation de l'humidité relative expérimentale (MR_{exp}) en fonction de temps.

D'après la littérature, l'humidité relative expérimentale décroît de plus grande épaisseur à la petite épaisseur normalement on a la décroissance qui suit la ordre suivant : MR_{exp}(8 mm), MR_{exp}(6 mm) et MR_{exp}(4 mm). La Figure 3.19 montre la perte de masse d'eau par rapport à la

masse initiale pour l'échantillon en fonction de temps. On remarque que la courbe MRexp(4 mm) est en première position en dessus de la courbe MRexp(8 mm) ce qu'est en contradiction avec la littérature . Cet ordre inverse est du que la journée de 4 mm est une journée froide par rapport aux autres courbes ce qui entraine un temps de séchage long et une perte de masse très minime.

J- Perte de masse

La Figure 3.20 montre que plus on a une augmentation dans l'épaisseur plus le temps de séchage de l'échantillon est plus grand comme il est présenté par le Tableau 3.5.

Épaisseur (mm)	Temps de séchage (min)
4	360
6	380
8	410

Tableau 3.5 : Temps de séchage des échantillons.

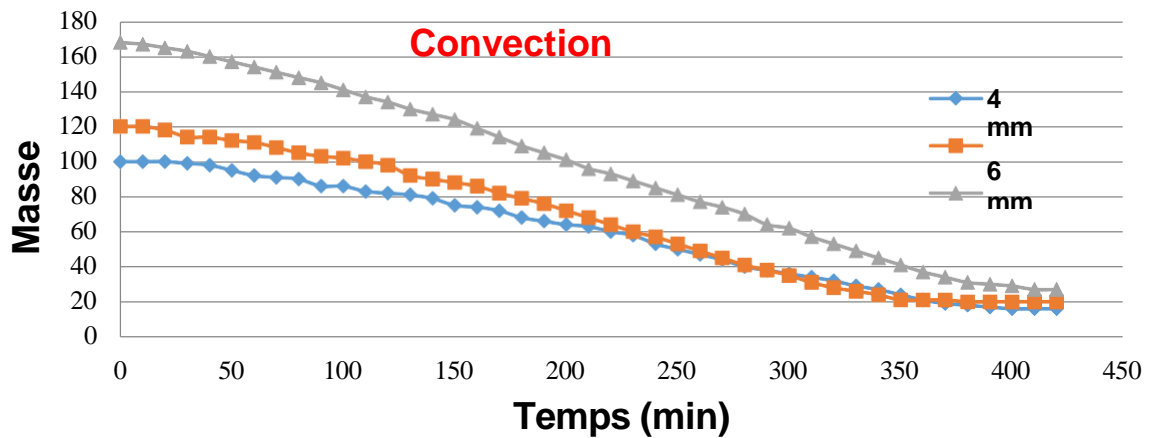


Figure 3.20: La perte de masse d'eau en fonction de temps.

3.5 Séchage à l'air ambiant

La Figure 3.21 montre que plus on a une augmentation dans l'épaisseur plus le temps de séchage de l'échantillon est plus grand comme il est présenté par le Tableau 3.6.

Épaisseur (mm)	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de séchage (Heur)
4	102	18	12
6	122	20	14
8	144	20	19

Tableau 3.6 : Temps de séchage des échantillons.

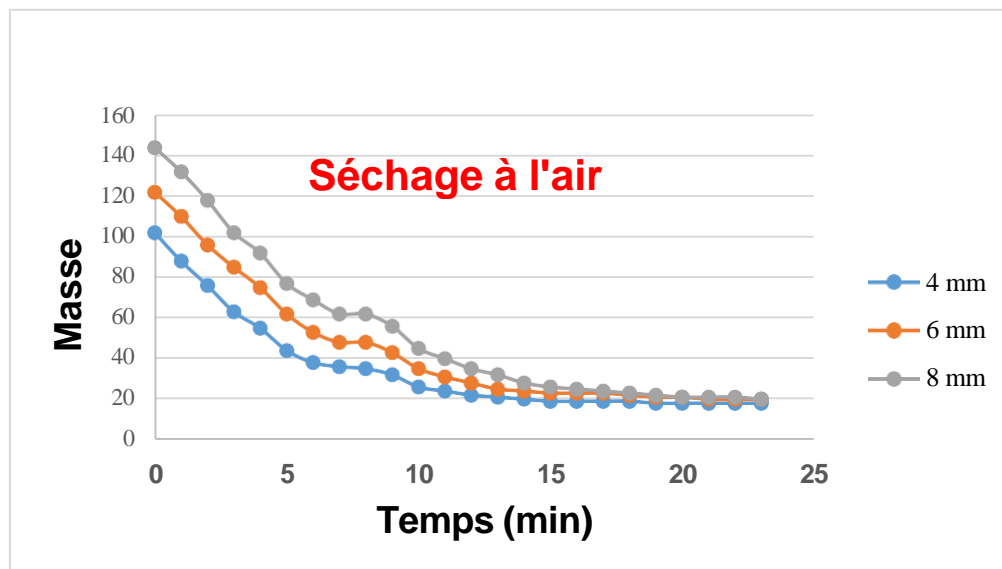


Figure 3.21: La perte de masse d'eau en fonction de temps.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les trois modes de séchage utilisés dans l'expérimentation pour les trois épaisseurs (4 mm, 6 mm et 8 mm) sont : séchage à l'air ambiant, séchage forcé et séchage à convection naturelle. Dans ce travail, deux paramètres sont pris en considération : la température (°C) et l'humidité relative (%). Les résultats montrent que plus l'épaisseur est grande

plus on a un temps de séchage long comme il est donné dans le Tableau 3.4, Tableau 3.5 et Tableau 3.6. On a remarqué plus la journée est froide plus le temps de séchage est long. On observé un accroissement de température ΔT variant entre 20.6 °C et 23 °C pour le séchage forcé et entre 17.4 °C et 28.5 °C pour le séchage convection naturelle pour les trois épaisseurs. On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 11h00 avec un intervalle de 37% à 15%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 18%.

En comparaison avec les températures à l'entrée de la chambre, on a remarqué une légère perte de température pour les deux modes séchage (forcé et convection naturelle). Cela est dû à l'absorption des échantillons de la température afin d'assurer le phénomène de séchage. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage. Le mode séchage forcé présente un temps de séchage minime par rapport au mode de séchage à convection naturelle tandis que le mode de séchage à l'air ambiant prend un temps très long par rapport aux autres modes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le séchage des fruits et légumes reconnaît une croissance continue suite à la demande qui ne cesse d'augmenter dans le marché commercial. L'agriculteur veut suivre cette démarche dont le but de bénéficier sur deux cotés : la conservation des produits agricoles et l'enrichissement par l'élévation de son capital pour plus d'investissement de son argent. L'agriculteur souhaitait toujours minimiser les pertes quand la récolte est immense. Notre étude expérimentale entre dans ce contexte en espérant donnant une aide et un encouragement pour élargir ses investissements d'un côté et élargir de l'autre côté son horizon. Nous avons pris comme produit agricole l'ananas avec l'utilisation d'un banc d'essai qui se compose de : panneau solaire à une seule passe d'air, une chambre de séchage et un extracteur d'air pour produire un écoulement forcé dans le panneau et la chambre à sécher ($Dv = 0.0129402 \text{ m}^3/\text{s}$). Trois épaisseurs ont fait l'objet d'étude : 4 mm, 6 mm et 8 mm. Notre étude expérimentale a pour but de voir l'effet de l'épaisseur et le temps mis au cours du processus de séchage. Trois paramètres ont été enregistrés le long du processus de séchage qui sont : la température ($^{\circ}\text{C}$), l'humidité relative (%) et la variation de masse (g). Nous avons examiné trois modes de séchage : à l'air (au soleil), convection naturelle (sans écoulement d'air forcé et forcé (avec un écoulement d'air forcé. Les résultats obtenus sont :

- **Séchage forcé :**

- Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage**

Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de $56.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 mm), $45.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (6 mm) et $54.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

- L'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage**

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 10h00 avec un intervalle de 26% à 17%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 17%.

- Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage**

Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de $63.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 mm), $54 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (6 mm) et $60.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00 avec un intervalle variant entre $43.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $48.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Les trois courbes suivent la même allure que la température de l'air à l'entrée de la chambre.

- L'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre**

On observe la même chute brutale de l'humidité relative à la sortie de chambre par rapport à l'humidité relative à l'entrée de chambre en présentant un intervalle de 20% à 15% (9h00 jusqu'à 09h30) puis des fluctuations variant entre 14% et 17% pour le reste de la journée étudiée. La diminution en valeur pour les trois épaisseurs est due à l'écoulement forcé du fluide (air).

- Température Moyenne dans la chambre de séchage

Elle atteint son maximum à 13h00 avec une valeur de 52.5 °C (4 mm), 43.9 °C (6 mm) et 51.3 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. En comparaison avec les températures à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de température avec une valeur de 4 °C (4 mm), 1.2 °C (6 mm) et 3.6 °C (8 mm) à 13h00. Cela est dû à l'absorption des échantillons de la température afin d'assurer le phénomène de séchage. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

-Humidité relative Moyenne de l'air dans la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 10h00 avec un intervalle de 22% à 18.5%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 17%. En comparaison avec les valeurs de l'humidité relative à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de l'humidité relative avec une valeur de 2 % (4 mm), 0.5 % (6 mm) et 6 % (8 mm) à 10h00. Cela est dû à l'écoulement forcé de l'air.

-Humidité relative expérimentale (MR_{exp})

On remarque que la courbe MR_{exp}(6 mm) est en troisième position en dessous de la courbe MR_{exp}(4 mm) ce qui est en contradiction avec la littérature. Cet ordre inverse est dû au fait que la journée de 6 mm est une journée froide par rapport aux autres courbes.

- Perte de masse

La perte de masse à la fin de processus de séchage est de l'ordre 85% de la masse initiale avec un temps 300 min (4 mm), 360 min (6 mm) et 410 min (8 mm).

• Séchage par convection naturelle :

- Température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

Elle atteint à 13h00 une valeur de 45.2 °C (4 mm), 57.4 °C (6 mm) et 57.4 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage. On remarque aussi un accroissement de température ΔT variant entre 20.6 °C et 23 °C pour le séchage forcé et entre 17.4 °C et 28.5 °C pour le séchage convection naturelle pour les trois épaisseurs.

- Humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 11h00 avec un intervalle de 37% à 15%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14% et 18%.

-Température de l'air à la sortie de la chambre de séchage

Elle atteint son maximum à 13h10 avec une valeur de 46 °C (4 mm), 57.1 °C (6 mm) et 57.1 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00 avec un intervalle variant entre 39.3 °C et 47.2 °C. Les trois courbes suivent la même allure que la température de l'air à l'entrée de la chambre avec une légère diminution de la température à la sortie de la chambre pour les trois épaisseurs étudiées.

- Humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage

On observe la même chute brutale de l'humidité relative à la sortie de chambre par rapport à l'humidité relative à l'entrée de chambre en présentant un intervalle de 34% à 17% (9h00 jusqu'à 12h00) puis des fluctuations variant entre 14% et 18% pour le reste de la journée étudiée avec une légère augmentation de l'humidité relative à la sortie de la chambre (1%-2%) pour les trois épaisseurs étudiées.

-Température Moyenne (Moy) de l'air dans la chambre de séchage

Elle atteint son maximum à 13h30 avec une valeur de 40.5 °C (4 mm), 51.5 °C (6 mm) et 50.4 °C (8 mm) puis commence à décroître jusqu'à 16h00. En comparaison avec les températures à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de température avec une valeur de 4.8 °C (4 mm), 8.3 °C (6 mm) et 9.4 °C (8 mm) à 13h30. Cela est dû à l'absorption des échantillons de la température afin d'assurer le phénomène de séchage. Les fluctuations des courbes sont dues à la variation du rayonnement solaire global le long du processus de séchage.

- Humidité relative Moyenne (Moy) de l'air dans la chambre de séchage

On remarque une chute brutale de l'humidité relative de l'air allant de 9h00 à 12h00 avec un intervalle de 39% à 15.5%. Puis, elle présente des fluctuations variant entre 14.5% et 19.5%. En comparaison avec les valeurs de l'humidité relative à l'entrée de la chambre, on remarque une légère perte de l'humidité relative avec une valeur de 3.5 % (4 mm), 1.5 % (6 mm) et 2 % (8 mm) à 12h00.

- Humidité relative expérimentale (MR_{exp}) :

On remarque que la courbe MR_{exp}(4 mm) est en première position en dessus de la courbe MR_{exp}(8 mm) ce qu'est en contradiction avec la littérature . Cet ordre inverse est dû que la journée de 4 mm est une journée froide par rapport aux autres courbes ce qui entraîne un temps de séchage long et une perte de masse très minime.

- Perte de masse

A la fin de processus de séchage, on a un temps 360 min (4 mm), 380 min (6 mm) et 410 min (8 mm). Le temps du séchage augmente avec la croissance de l'épaisseur.

- **Séchage à l'air (au soleil) :**

Les résultats montrent que plus on a une augmentation dans l'épaisseur plus le temps de séchage de l'échantillon est plus grand. A la fin de processus de séchage, on a un temps 12 heures (4 mm), 14 heures (6 mm) et 19 heures (8 mm).