

*Algérienne Démocratique et Populaire*

*Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique*



*Université de Ghardaïa*

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'Automatique et électromécanique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Électromécanique*

**Spécialité :** *Energies Renouvelables*

**Par: BEN SAHA Abdelhamid & SEDDIKI Bousmaha**

**Thème**

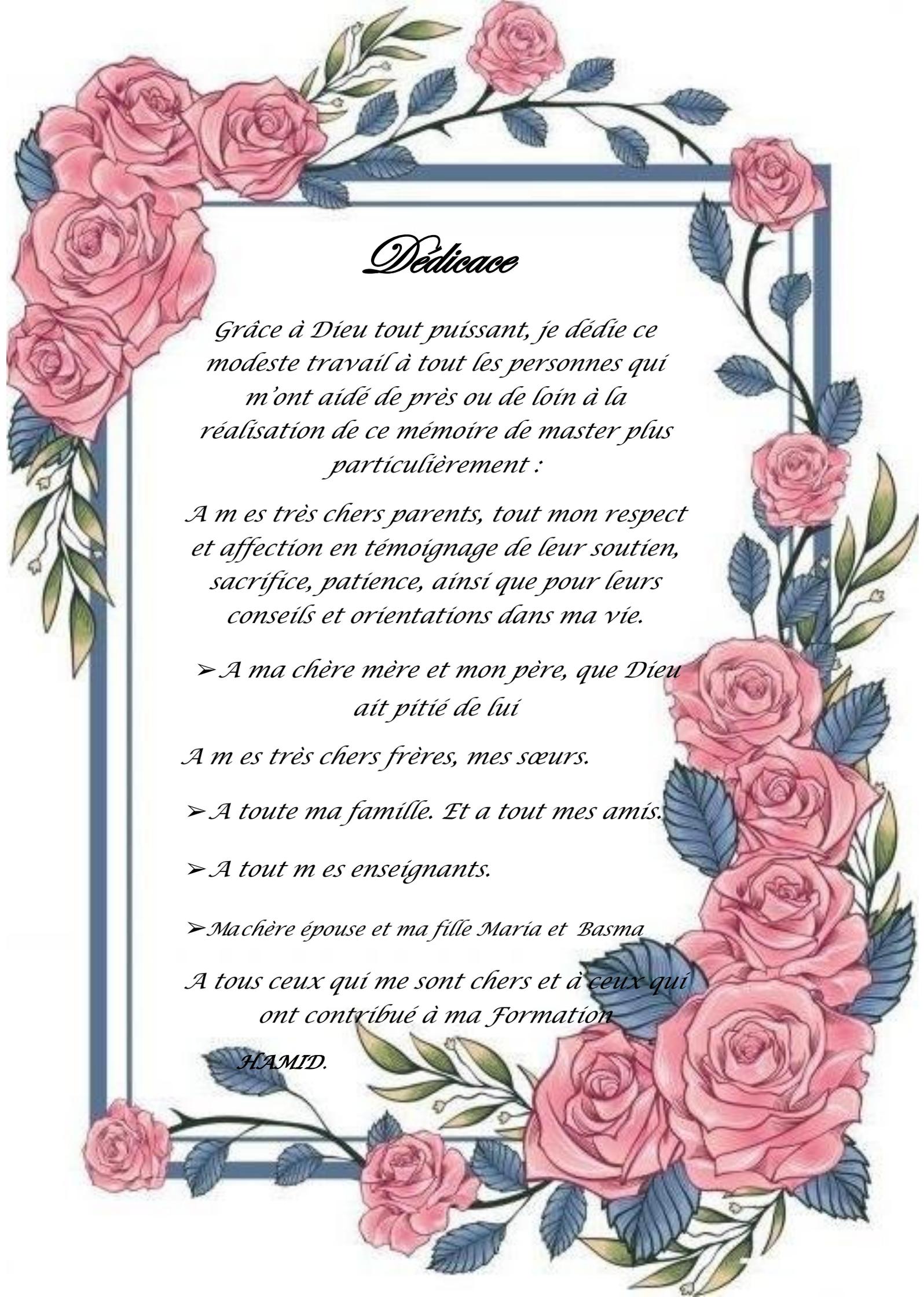
**ETUDE COMPARATIVE DES PROCÉDES DE SECHAGE  
SOLAIRE DES PRODUITS AGROALIMENTAIRE SOUS  
CLIMAT DE LA REGION DE GHARDAÏA**

**Soutenu publiquement le 29/09/2020**

**Devant le jury :**

<b>AKERMI Faouzi</b>	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>LALMI Djemoui</b>	Maître Assistant B	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>AISSAOUI Faris</b>	Maître de conférences B	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>BENSEDDIK Abdelouahab</b>	Maître de Recherche B	URAER. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>HAMDOUNE Ghania</b>	Ingénieur chargé d'études	URAER. Ghardaïa	<b>Co- Encadreur</b>

**Année universitaire 2019/2020**



## *Dédicace*

*Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail à tout les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de master plus particulièrement :*

*A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.*

*➤ A ma chère mère et mon père, que Dieu ait pitié de lui*

*A mes très chers frères, mes sœurs.*

*➤ A toute ma famille. Et à tout mes amis.*

*➤ A tout mes enseignants.*

*➤ Ma chère épouse et ma fille Maria et Basma*

*A tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à ma Formation*

*HAMID.*



## *Dédicace*

*Je ne trouve aucun mot ou expression, qui  
vont exprimer mes vifs  
sentiments de gratitude et remerciement :*

- ❖ A mes chers parents qui n'ont jamais cessés de m'apporter tout ce dont j'ai besoin pour réaliser ce travail et tout au long de mon parcours éducatif, ainsi que leur tendresse et leur compréhension.*
- ❖ A mes chérés frères qui m'ont beaucoup aidé.*
- ❖ A tous mes amis et à toute les étudiant de Spécialité de Energie Renouvelable.*
- ❖ A toute l'équipe de URAER de Ghardaïa.*

*BOUSMAHA*

# *Remerciement*

*On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions*

*On tient à remercier également notre codirecteur de mémoire de master Monsieur **Abdelouahab BENSEDDIK**, pour l'honneur qu'il nous a fait en nous confiant ce travail et en acceptant de le codiriger dans le cadre de la convention de notre université et l'unité de recherche de Ghardaïa. On a eu la chance de profiter de son expérience, de ses grandes qualités humaines, et professionnelles*

*Nous exprimons également nos sincères remerciements et notre gratitude à "**Mahfoud BEN ABD RAHMANE**" "**Hocine BEN SAHA** et **Abd Elmajid** qui nous ont beaucoup aidés dans ce travail, en plus de nos collègues dans cette stage, "**Shihab**" **Yasser** et **Abd Allah**.*

*Nous tenons à remercier l'équipe de laboratoire de systèmes énergétique pour l'agriculture à savoir **Ghania Hamdoune** et **Khadidja OULED HADJ YUCEF**, pour leurs assistance permanente et leurs efforts à notre égard afin de mettre terme à notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté de juger ce modeste travail D'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques*

*On remercie également nos enseignants du Spécialité Energie Renouvelable, pour leur soutien et d'avoir collaboré à notre formation ainsi à toute l'équipe de URAER de Ghardaïa Surtout monsieur le directeur.*

# Sommaire

Introduction générale	03
<b>I- LE SECHAGE ET LES SECHOIRS SOLAIRES</b>	<b>04</b>
I.1 Séchage et l'énergie	05
I.1.1 Séchage	05
I.1.2 Historique	06
I. 1.3 Principes de séchage	06
I. 1.4 Intérêt du séchage	06
I .2 Avantages et les inconvénients du séchage	07
I .2.1 . Avantages	07
I .2.2 Inconvénients	07
I .3.Séchoirs solaires	07
I. 4. Type de séchoir solaire	08
I. 4.1. Séchoirs naturels	09
I. 4.2 Séchoirs solaires directs	10
I. 4.3 Séchoirs solaires indirects	11
I.4.4 Séchoirs solaires hybrides	12
I .4.5 Séchoirs solaires mixtes	14
<b>III- MATÉRIELS ET MÉTHODES</b>	<b>25</b>
III .1 Description du prototype expérimental	25
III.2 Instrumentation des capteurs	26
III. 2.1 Mesure des températures	26
III. 2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air	27
III. 2.3 Acquisition et traitement des données	27
III.2.4 Mesure de poids	28
III.2.5 Mesure du rayonnement solaire, de la vitesse de l'air et d'humidité relative	28
III. 2.6 Mesure de la teneur en eau	29
III.3 Matières premières	30
III .3.1 Carotte (Daucus carotta)	30
III.3.2 Protocole de séchage de La carotte (Daucus carotta)	31
III .3.3Menthe	33
III.3.4 Protocole de séchage de la menthe	33
III.4 Séchage de la menthe, la carotte	35

III.4.1 Conditions de séchage	35
III. 4.2 Modélisation des cinétiques de séchage	35
III. 4.3 Détermination de la diffusivité effective de l'eau	38
IV- RESULTATS ET DISCUSSION	40
IV.1 Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes	40
IV2. Séchage solaire dans les prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes	43
IV.3 Cas 1: séchage solaire de la carotte	43
IV.3.1 Caractéristiques de séchage de la carotte	43
IV.3.2 Modélisation empirique du processus de séchage en couche mince de la carotte	44
IV.3.3 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la carotte	47
IV.4 Cas 2: séchage solaire de la menthe	48
IV.4.1. Caractéristiques de séchage de la menthe	48
IV.4.2 Modélisation empirique du processus de séchage en couche mince de la menthe	49
IV.4.3 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la menthe	51
Conclusion Générale	53
REFERENCE	56

## Liste des Figures

Figure 1 Séchoirs solaire.....	07
Figure I-1 Principe de séchage à l'air libre Souheyla,2018.....	08
Figure I-2 Le principe d'un échoir solaire direct. Souheyla,2018.....	09
Figure I-3 Principe de séchoir solaire indirect .....	11
Figure I-4 Principe de séchoire solaire hybride .....	12
Figure I-5 Le principe d'un échoir solaire mixte. Souheyla,2018.....	13
Figure II Deux type de séchoirs utilisés dans l'étude .....	15
Figure II -2 Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999.....	16
Figure II-3 Schéma descriptif du séchoir utiliser par Khalil, Al-Juamily. et al. 2007..	17
Figure I- 4 Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle Singh et al. 2004..	18
Figure II 5 Séchage sous serre (a) convection naturelle et (b) convection force Tiwari	18
Figure II 6 Serre tunnel Sacilik et al,2006.....	19
Figure II 7 Vue panoramique de la sécheuse à effet de serre améliorée (a) vue extérieure (bande) à l'intérieur de la vue Sethi et al, 2009.....	19
Figure II 8 Séchoir de type serre à grande échelle avec brûleur GPL .....	20
Figure II 9 Schéma de séchoir solaire de type serre .....	20
Figure II 10 Séchoir solaire de type serre Elkhadraoui et al, 2015.....	21
Figure II.11 Séchoir solaire indirecte à convection forcée utilisé par Shanmugan .....	21
Figure II.12 Schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle Dilip R.....	22
Figure II.13 Séchoir solaire de mode indirect (gauche) et au soleil libre (droite). .....	23
Figure II.14 Séchoir solaire à convection forcée indirect Mohamed et al. 2008.....	23
Figure.15 Diagramme d'un séchoir hybride à biomasse Prasad & al,2006.....	24
Figure.16 Séchoir solaire indirect actif. Mohanraj & Chandrasekar,2008.....	24
Figure 17 Séchoir solaire mixte à convection forcée. Li et al,2006.....	25
Figure III.1 Prototypes de séchoir solaire de type indirect .....	26
Figure III.2 Prototypes de séchoir solaire de type direct .....	26
Figure III.3 Montre des photographies du capteur lors de la phase l'instrumentation...	26
Figure III.4 Anémomètre Testo 440 + thermo-hygromètre testo 610.....	27
Figure III.5 Photographie du séchoir solaire équipé avec la centrale de mesure.....	27
Figure III.6 Balance analytique.....	28
Figure III.7 Station de météo.....	29
Figure III.8 Matériels utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale.....	30

Figure III.09 Carotte préparé pour la découpe.....	30
Figure III .10 Préparation de l'échantillon de Carotte.....	31
Figure III .11 Diagramme schématique du processus de séchage de la carotte.....	32
Figure III.12 Menthe.....	33
Figure III.13 Préparation de l'échantillon de la menthe.....	33
Figure III.14 Diagramme schématique du processus de séchage de la menthe .....	34
Figure III.15 Prototype réalisé pour le séchage de la carotte et la menthe.....	35
Figure IV.1 Evolution de rayonnement solaire, de la température de l'air ambiant, interne des séchoirs solaires direct et indirect pendant cinq jours successifs du 02/03/2020 au 07/03/2020.....	41
Figure IV.2 Evolution de l'humidité relative de l'air ambiant, interne des séchoirs solaires direct et indirect pendant cinq jours successifs du 02/03/2020 au 07/03/2020...	42
Figure IV.3 Variation de la teneur en eau en fonction du temps dans l'air libre, les séchoirs solaires direct et indirect au cours de séchage des échantillons de la carotte....	43
Figure IV.4 Dispositions des échantillons de la carotte dans la chambre de séchage pour les séchoirs direct et indirect.....	44
Figure IV.5 Variation de la teneur en eau en fonction du temps dans l'air libre, les séchoirs solaires direct et indirect au cours de séchage des échantillons de la menthe ...	48
Figure IV.6 Dispositions des échantillons de la menthe dans la chambre de séchage pour les séchoirs direct et indirect.....	49

## Liste Des Tableaux

Tableau I-1 Avantages et des inconvénients du les séchoirs naturel	09
Tableau I-2 Avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire direct	10
Tableau I-3 Avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire indirect	11
Tableau I-4 Avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire hybride	12
Tableau III.1 Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces	39
Tableau IV.1 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la carotte	45
Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la carotte en couche mince	47
Tableau IV. 3 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la menthe	50
Tableau IV.4 Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la menthe en couche mince	52

## NOMENCLATURE

<b><i>C<sub>p</sub></i></b> : Chaleur massique de l'air libre, $C_p = 1005$	<i>J/kg. K</i>
<b><i>M</i></b> : Teneur en eau (base sèche)	kg eau/kg MS
<b><i>M<sub>h</sub></i></b> : Teneur en eau (base humide)	kg eau/kg Mh
<b><i>P<sub>vp</sub></i></b> : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	(Pa)
<b><i>P<sub>vs</sub></i></b> : pression partielle de vapeur saturante	(Pa)
<b><i>H</i></b> : enthalpies du matériau	J
<b><i>Deff</i></b> : la diffusivité effective	$m^2/s$
<b>HR =MR</b> : humidité relative de l'air	(%)
<b>(initiale)</b> : masse de l'échantillon avant mise à l'étuve	g
<b>(finale)</b> : masse de l'échantillon après mise à l'étuve	g
<b><i>W</i></b> : tenure en humidité absolue de l'air	kg vap a/kg as
<b><i>TE</i></b> : Température d'entrée au capteur	(K)
<b><i>TS</i></b> : Température de sortie du capteur	(K)
<b><i>I</i></b> : Puissance solaire incidente	(W/m <sup>2</sup> )
<b><i>E</i></b> : coefficient de transmissivité pour le vitrage.	(E = 87%)
<b><math>\Delta T</math></b> : la variation de température	K
<b><i>MR<sub>pré</sub></i></b> : la teneur en eau issue de prédite	
<b><i>MR<sub>exp</sub></i></b> : la teneur en eau issue de l'expérience	
<b><i>RMSE</i></b> : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne	
<b><math>\chi^2</math></b> : khicarré réduit	
<b><i>R2</i></b> : coefficient de corrélation	
<b><i>N</i></b> : nombre d'observations	
<b><i>n</i></b> : nombre de constantes du modèle	
<b><i>t</i></b> : le temps	
<b><i>L</i></b> : la demi d'épaisseur de la tranche	

## الملخص

الهدف من هذا العمل هو تجربة نموذجين للمجفف الشمسي الأول من النوع المباشر من البولي كربونات والثاني من النوع الغير مباشر ذات الحواجز ومقارنتها مع التجفيف في الهواء الطلق. تم اختبار هذين النموذجين وتحليلهما تجريبياً في وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة بالتوميرات غرداية ، في ظروف مناخية حقيقية للمنطقة.

تم إجراء اختبارات مختلفة من أجل تقييم أداء هذين النموذجين. أشارت اختبارات الفراغ (عدم تجفيف المنتج ) خلال الأسبوع الأول من مارس 2020 ، إلى أن درجة الحرارة قد ترتفع إلى 72 درجة مئوية في المجفف الشمسي الغير مباشر مع الحواجز و 63 درجة مئوية في المجفف الشمسي المباشر المغطى بالبولي كربونات. تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف الطبقة الرقيقة للجزر والنعناع. أظهرت النتائج أن نموذجي Midilli-Kucuk و Two-Terms كانا الأنسب لوصف عملية تجفيف الجزر لكلا المجففين سواء المجفف المباشر المغطى بالبولي كربونات أو المجفف الغير مباشر مع الحواجز وأيضا بالنسبة للتجفيف الشمسي في الهواء الطلق. ومع ذلك، فإن نماذج Midilli-Kucuk و Logarithmic كانت الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي للنعناع. تم تقليل كمية الماء في الجزر والنعناع من 13.28 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%93) و 6.69 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%87) إلى 0.14 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%12.6) و 0.14 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%12) ، على التوالي في نموذج المجفف الشمسي الغير مباشر مع الحواجز وتم تقليلها إلى 0.09 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%9) و 0.10 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%9) ، على التوالي في نموذج المجفف الشمسي المباشر المغطى بالبولي كربونات. أما بالنسبة للتجفيف الشمسي في الهواء الطلق فتم تقليل كمية الماء في الجزر والنعناع إلى 0.39 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%28) و 0.64 كغ / H<sub>2</sub>O d.b (%39) على التوالي.

باستعمال المجفف الشمسي الغير مباشر مع الحواجز , كان معدل الانتشار الفعال للنعناع  $1.45 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$  بينما كان للجزر  $10.74 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$ . تم العثور على هذه القيم لتكون  $4.829 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$  و  $9.799 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$  ، على التوالي للنعناع والجزر ، عندما تم إجراء التجفيف الشمسي باستخدام المجفف الشمسي المباشر من النوع البولي كربونات. ومع ذلك بالنسبة للتجفيف بالهواء الطلق كان معدل الانتشار الفعال للنعناع  $0.631 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$  بينما كان للجزر  $7.89 \times 10^{-9} \text{ م}^2 / \text{ثانية}$ .

**الكلمات الدالة:** تجفيف المنتجات الغذائية, التجفيف الشمسي من النوع المباشر و الغير مباشر, التجفيف بالهواء الطلق, حركية التجفيف, الأداء الحراري.

## Résumé

L'objectif de ce travail est l'expérimentation des deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes et leur comparaison avec le séchage à l'air libre. Les deux prototypes de séchoir solaire sont testés et analysés expérimentalement à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, sous des conditions météorologiques réelles de la région. Différents tests ont été réalisés afin d'évaluer les performances des deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes. Les tests à vide, c'est-à-dire sans produit à sécher durant la première semaine de Mars 2020, ont indiqué que la température pouvait monter jusqu'à 72 °C dans le séchoir

solaire direct en polycarbonate et 63 °C dans le séchoir solaire indirect avec chicanes. Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la carotte et de la menthe. Les résultats ont montré que les modèles de Midilli-Kucuk et Two-Terms était les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire de la carotte dans les deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes et à l'air libre. Cependant, les modèles de Midilli-Kucuk et Logarithmic était les plus approprié pour décrire le processus de séchage solaire de la menthe. La teneur en eau de la carotte et de la menthe a été réduite de 13.28 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (93%) et 6.69 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (87%) à 0.14 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (12.6%) et 0.14 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (12%), respectivement dans le prototype de séchoir solaire indirect avec chicanes et a été réduite à 0.09 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (9%) et 0.10 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (9%), respectivement dans le prototype de séchoir solaire direct en polycarbonate. Néanmoins, la teneur en eau de la carotte et de la menthe a été réduite à 0.39 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (28%) et 0.64 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (39%), respectivement au séchage à l'air libre. En utilisant le séchoir solaire indirect avec chicanes, la diffusivité effective de la menthe était de  $1.45 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s alors que pour la carotte, il était de  $10.74 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs se sont avérées être de  $4,829 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s et  $9.799 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, respectivement pour la menthe et la carotte, lorsque le séchage solaire était effectué avec le séchoir solaire direct en polycarbonate. Cependant, dans le séchage à l'air libre la diffusivité effective de la menthe était de  $0,631 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s alors que pour la carotte, il était de  $7,89 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

Mots clefs : séchage des produits alimentaires ; séchoir solaire de type direct et indirect ; séchage à l'**air libre** ; cinétique de séchage ; performances thermiques.

## **Abstract**

This work aims to experiment with two prototypes of direct polycarbonate and indirect solar driers with baffles and their comparison with open air-drying. The two prototypes of solar driers are tested and analyzed experimentally at the Applied Renewable Energies Research Unit (URAER) Ghardaïa, under real practical conditions in the region.

Various tests were carried out in order to evaluate the performance of the two prototypes of direct polycarbonate solar dryer and indirect with baffles. No-load test, that is to say without product to dry during the first week of March 2020, indicated that the temperature could rise up to 72 ° C in the polycarbonate direct solar dryer and 63 ° C in the indirect solar dryer with baffles. Ten mathematical models were used to describe the thin-layer drying kinetics of

carrot and mint. The results showed that the Midilli-Kucuk and Two-Terms models were the most appropriate for describing the solar carrot drying process in both the direct polycarbonate and indirect solar dryer prototypes with baffles and in the open air. However, the Midilli-Kucuk and Logarithmic models were the most appropriate to describe the solar drying process of mint.

The water content of carrot and mint has been reduced from 13.28 kg H<sub>2</sub>O / kg db (93%) and 6.69 kg H<sub>2</sub>O / kg db (87%) to 0.14 kg H<sub>2</sub>O / kg db (12.6%) and 0.14 kg H<sub>2</sub>O / kg db (12%), respectively in the prototype indirect solar dryer with baffles and was reduced to 0.09 kg H<sub>2</sub>O / kg db (9%) and 0.10 kg H<sub>2</sub>O / kg db (9%), respectively in the prototype polycarbonate direct solar dryer. However, the water content of carrot and mint was reduced to 0.39 kg H<sub>2</sub>O / kg d.b (28%) and 0.64 kg H<sub>2</sub>O / kg d.b (39%), respectively by air-drying.

Using the indirect solar dryer with baffles, the effective diffusivity of mint was  $1.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  while for carrot it was  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ . These values were found to be  $4.829 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  and  $9.799 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ , respectively for mint and carrot, when solar drying was performed with the direct polycarbonate solar dryer. However, in air drying the effective diffusivity of mint was  $0.631 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  while for carrot it was  $7.89 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

**Keywords:** drying of food products; direct and indirect solar dryer; Drying in the open air; dryingKinetics;thermal;performance

## Introduction générale

L'augmentation des prix de l'énergie et la réduction continue des ressources en combustibles conventionnels de la Terre ainsi que l'augmentation du réchauffement climatique mondial ont été la motivation de l'intérêt croissant récent pour les sources d'énergie alternatives, telles que l'énergie solaire. Le soleil est l'une des sources d'énergie les plus riches dans ce contexte et est presque inépuisable. L'efficacité énergétique et la technologie solaire sont des éléments importants de toute conception. De plus, ils sont importants pour la nation et pour la Terre. Le Soleil est un immense réservoir d'énergie propre et la puissance provenant des rayons du soleil qui atteignent la terre est appelée énergie solaire. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus facilement disponible. L'énergie solaire reçue sous forme de rayonnement peut être convertie directement ou indirectement en d'autres formes d'énergie telles que la chaleur et l'électricité qui peuvent être utilisées par l'homme. Étant donné que le soleil devrait rayonner essentiellement à un taux constant pendant un milliard d'années, il peut être considéré comme une source inépuisable d'énergie utile. L'énergie solaire est utilisée depuis la préhistoire, mais de la manière la plus primitive. Avant 1970, des travaux de recherche et développement étaient menés dans quelques pays pour exploiter plus efficacement l'énergie solaire, mais la plupart de ces travaux restaient principalement académiques. Après la hausse spectaculaire des prix du pétrole dans les années 1970, plusieurs pays ont commencé à formuler de vastes programmes de recherche et développement pour exploiter l'énergie solaire. Tout à fait raison le séchage est une opération énergivore, il s'agit d'un processus d'élimination de l'humidité hygroscopiques des matériaux. Elle implique l'application de chaleur pour vaporiser l'eau liquide des produits alimentaires et agricoles. Le processus de séchage varie du simple séchage au soleil ouvert au séchage industriel très complexe. En plus le séchage des produits alimentaires et agricoles est indispensable pour la conservation et le stockage, la manipulation facile et la réduction des coûts de transport. Diverses sources d'énergie sont utilisées pour fournir l'énergie nécessaire au processus de séchage. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus utilisée dans le processus de séchage. Il est utilisé directement ou indirectement pour sécher les aliments et les produits agricoles. Le séchage au soleil ouvert est l'application directe de l'énergie solaire. Dans l'application indirecte, l'énergie solaire est utilisée pour produire de l'air chaud qui est utilisé pour l'application de séchage. Différents types de collecteurs peuvent être incorporés pour produire de l'air chaud pour le séchage. Ainsi, le séchage solaire trouve ses applications à des fins industrielles et domestiques pour sécher différents types de produits.

De nombreux chercheurs ont étudié les caractéristiques de séchage des fruits, des légumes, etc. Mais aucun d'entre eux n'a séché la carotte dans les conditions climatiques aride et semi-aride. La comparaison expérimentale des cinétiques de séchage entre le séchage au soleil ouvert et les séchoirs solaire de type direct et indirect ne se fait pas dans les conditions climatiques des zones aride et semi-aride. L'objectif de ce travail de Master est de comparer les performances des séchoirs solaires de type direct et indirect au séchage au soleil ouvert en termes de cinétique de séchage dans les conditions climatiques de la région de Ghardaïa (zone semi-aride).

L'objectif principale de cette recherche est d'étudier expérimentalement les performances des prototypes de séchoir solaires de type direct et indirect ainsi que les comparer par apport au séchage au soleil ouvert pour déferrent produites locaux. L'investigation expérimentale détermine les performances thermiques des séchoirs, les cinétiques de séchage et sa modalisation mathématique empirique.

## **CHAPITRE I :**

# **Séchage Et Séchoirs Solaires**

## CHAPITRE I

### Séchage et Séchoirs Solaires

#### I-1 Séchage et Energie

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie, globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ **15 %** de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés, dans une démarche économique mais aussi écologique. Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres. Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre" et lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure. Il suffit pour la vaporiser d'environ **2250 kJ/kg**. Lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée". L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie. Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée : aussi la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage [**Angélique., 2002**].

#### I-1.1 Séchage

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur. Plusieurs techniques sont possibles pour sécher et conserver les récoltes: le séchage sur champ au soleil, les cabines de déshydratation, l'ensilage pour les fourrages et le séchage en grange. Contrairement aux combustibles fossiles à l'avenir incertain, le soleil est une source d'énergie gratuite et inépuisable. Le séchage en grange permet d'obtenir des produits de qualité constante, en grandes quantités et affranchit l'agriculteur des contraintes météorologiques, pour un coût de fonctionnement modique. Il offre de nouveaux débouchés aux produits. Les utilisations sont multiples, il est possible d'y sécher fourrages, plantes aromatiques, graines, céréales, fruits et légumes.

La technique de séchage traditionnelle, qui est généralement réalisée sur sol, est la plus utilisée dans les pays en voie de développement pour préserver les denrées alimentaires, telles que les céréales, les légumes, la viande et le poisson, etc. Dans cette méthode traditionnelle, le taux de séchage est contrôlé par des facteurs externes, tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative, et des facteurs internes,

tels que la teneur en eau initiale, le type des produits et la masse du produit par unité de surface d'exposition [Dadda., 2008].

Il y a des avantages considérables dans cette technique de séchage puisque la source d'énergie est renouvelable. Quoique, ça ne permet pas d'avoir une qualité convenablement bonne et reproductible du produit, principalement à cause des limitations inhérentes dans le contrôle du processus de séchage et du fait que les produits sont exposés à l'air, la pluie, les insectes et le vent, ce qui cause des pertes énormes dans la qualité du produit. [Dadda., 2008].

### **I.1.2 Historique**

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'un et ethnique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [Touati., 2017].

### **I. 1.3 Principes de séchage.**

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement. [Roland., 2000].

### **I. 1.4 intérêt du séchage**

- améliorer la conservation des produits.
- faciliter leur transport.
- réduire les risques de pertes de produits après récolte .
- élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année

[Roland.,2000].

## **I.2 Avantages et Inconvénients du séchage**

Comme toutes les méthodes de préservation thermique des produits, l'utilisation du séchage présente des avantages et des inconvénients.

### **I.2.1 . Avantages**

Les principaux avantages du procédé de séchage sont :

- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement.
- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau.
- Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes.
- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massive.

### **I.2.2 Inconvénients**

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier,

- des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments
- des réactions de brunissement, des durcissements superficiels. Des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation,
- des pertes de constituants volatils. La modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

## **I.3. Séchoirs solaires**

Le séchage naturel connu et pratiqué par nos ancêtres consiste à exposer le produit à sécher directement au soleil, en l'étalant au sol sur des nattes ou des claies. Ce type de séchage, bien qu'il soit simple et gratuit, a l'inconvénient de nécessiter de longues durées de séchage, d'exposer le produit à la poussière, à la pluie et aux insectes. D'où altération de la qualité et risque de pourrissement et de moisissures qui peuvent atteindre jusqu'à 50% des récoltes. Ce n'est qu'au 20<sup>ème</sup> siècle avec l'apparition du concept de l'activité de l'eau et la connaissance des mécanismes de transfert de l'humidité dans les produits que furent développés les premiers séchoirs artificiels conçus selon des règles scientifiques [ **Angélique., 2002**].



**Fig. 1.** Séchoirs solaire

#### **I. 4. Type de séchoir solaire**

Les séchoirs solaires sont classés généralement, selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories:

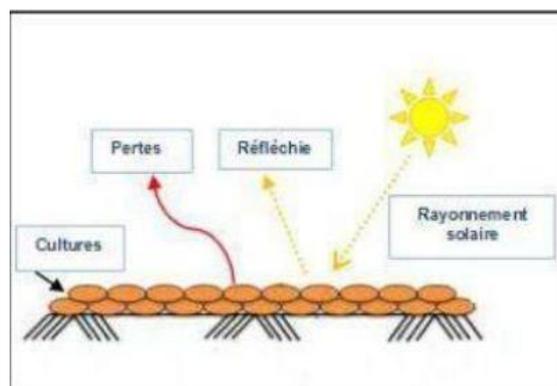
- Les séchoirs naturels
- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes.

### I. 4.1. Séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement.

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles

[Souheyla., 2018].



**Fig. I-1.** Principe de séchage à l'air libre [Souheyla, 2018]

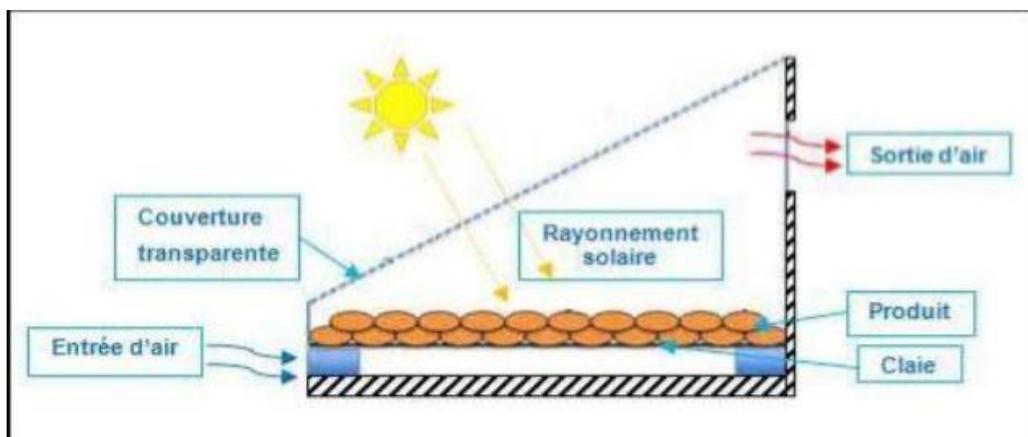
**Tableau I-1:** Avantages et des inconvénients du les séchoirs naturels:

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est un type de séchage qui n'impose pas un outillage particulier</li> <li>• C'est un séchage lent à basse température qui donne des bois avec peu de tentions</li> <li>• Il utilise une énergie gratuite : Le soleil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ne permet pas de descendre sous 13 à 17 % d'humidité</li> <li>• L'immobilisation du stock de bois est longue dans le temps.</li> <li>• Il y a des risques d'attaque du bois par des insectes et champignons.</li> </ul>

#### I. 4.2 Séchoirs solaires directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher.

La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud . La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage. [Souheyla., 2018].

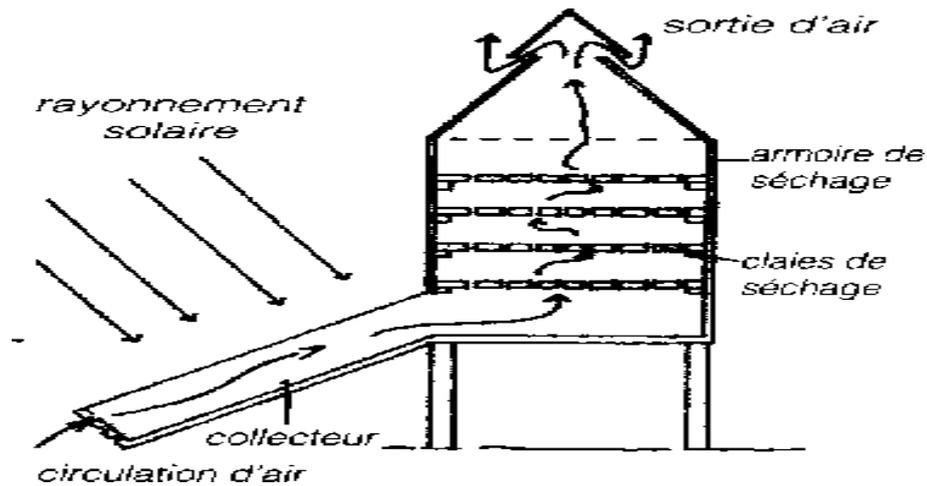
**Fig. I-2.** Principe d'un séchoir solaire direct. [Souheyla., 2018]

**Tableau I.2:** Avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire direct:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.</li> <li>• Pas besoin de main-d'œuvre qualifié</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température élevée en fin de séchage</li> <li>• Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil</li> <li>• Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure</li> </ul>

### I. 4.3 Séchoirs solaires indirects

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (FigI.3). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage . [Souheyla., 2018]



**Fig. I-3.** Principe de séchoir solaire indirect [Dudez., 1996]

**Tableau I-3:** Avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire indirect:

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).</li> <li>• Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit.</li> <li>• Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.</li> <li>• Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement</li> </ul>

#### I. 4.4 Séchoirs solaires hybrides

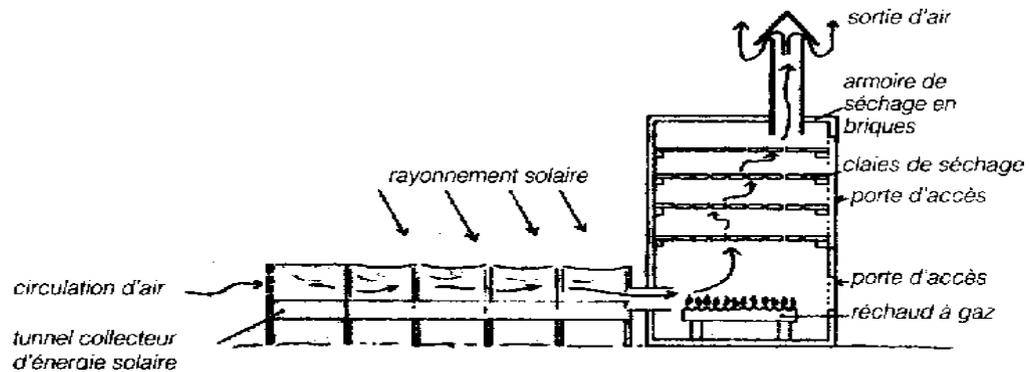
Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas, de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications

commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit finie peuvent dépendre des conditions climatiques.

Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- Le séchage à la vapeur surchauffée.
- Le séchage par pompe à chaleur.
- Le séchage par chambre chaude.
- Le séchage sous vide.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage du bois. [Touati., 2017].



**Fig. I-4.** Principe de séchoir solaire hybride [Dudez, 1996]

**Tableau I-4:** Tableau des avantages et des inconvénients d'un séchoir solaire hybride:

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.</li> <li>• Meilleur contrôle du séchage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de production et d'investissement élevé.</li> <li>• Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.</li> </ul>

### I.4.5 Séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires directes sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents [Amar., 2010].

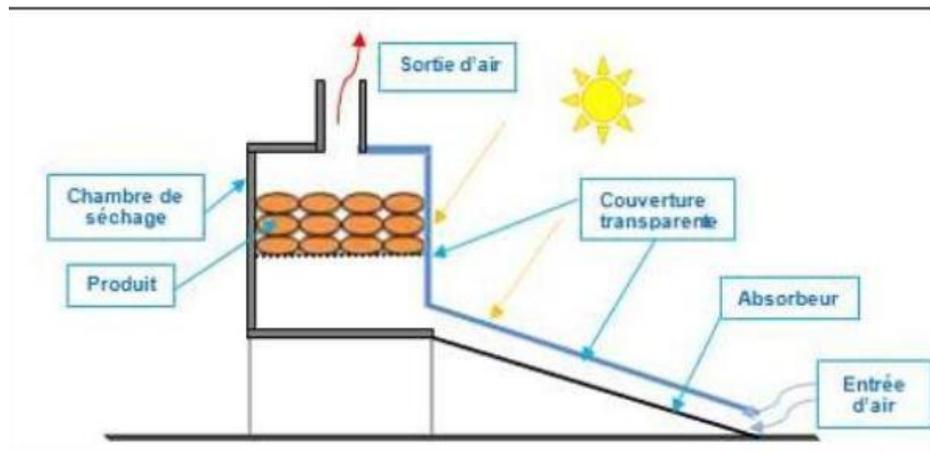


Fig. I-5. principe d'un séchoir solaire mixte [Souheyla.,2018].

## **CHAPITRE II**

### **Etude bibliographique**

## CHAPITRE II

### Etude bibliographique

Dans la suite de section, nous présentons les principales recherches ayant abordé le séchage et les séchoirs solaires. Dans tous ces travaux les chercheurs se sont motivé leur contribution par l'avantage à ce type de séchage qui est principalement la propreté et le caractère, renouvelable de l'énergie utilisée à savoir l'énergie solaire. L'ensemble de ces travaux peuvent être divisés en deux classes: les séchoirs directs et le système indirect.

[**Ben khelfellah, et al. 2005**] leur travail est consacré à une étude comparative entre le séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir direct et indirect. Dans leur travail, ils ont entrepris l'étude du bilan d'énergie des modèles expérimentaux des séchoirs solaires de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agro-alimentaires, compte tenu les conditions ambiantes du site donné. La figure montre les deux types de séchoirs utilisés dans cette étude.



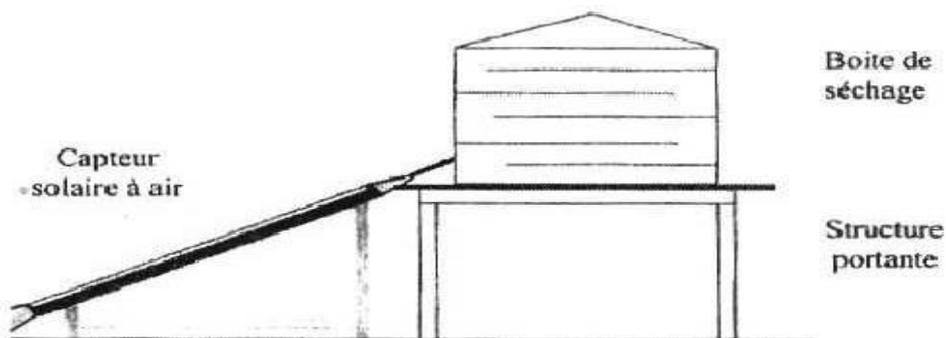
Séchoir solaire de type direct

Séchoir solaire de type indirect

**Fig. I1.** Deux type de séchoirs utilisés dans l'étude [**Ben khelfellah, et al,2005**].

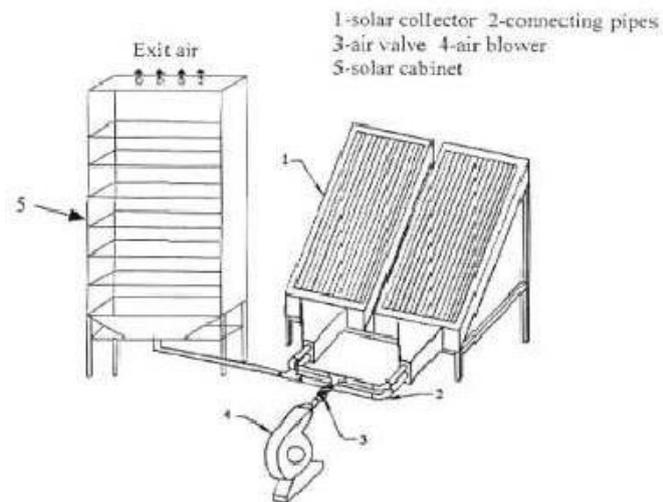
[Boulemtafes et Semmar, 1999] ont présentés un travail sur la conception et la réalisation d'un séchoir indirect .Dans leur travail qui a eu pour objectif la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes. Le séchoir est constitué d'une boîte parallélépipédique, elle est alimentée en air chaud par un capteur solaire plan à air. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique.

La connaissance de l'évolution de tous ces paramètres et leur interdépendance, permet de sélectionner les types de produits susceptibles d'être séchés par ce séchoir..



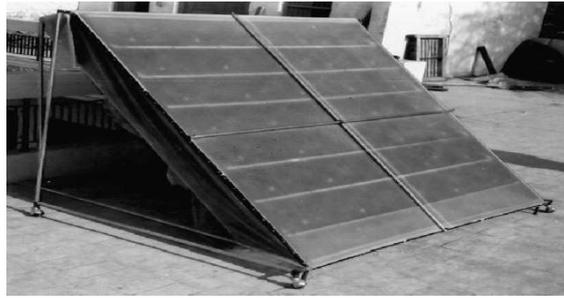
**Fig. II-2.** Schéma descriptif du dispositif utilisé [Boulemtafes et Semmar, 1999]

[Khalil, Al-Juamily et al., 2007] ont réalisés une étude expérimentale est basée sur l'efficacité thermique d'un séchoir solaire indirect à convection forcée, qui se compose de trois parties : collecteur solaire, chambre de séchage et un ventilateur. Ce type de séchoir est destiné à sécher certains produits tels que le raisin, abricot, et haricots. Des expériences ont été faites en fonction de trois débits différents respectivement 0.076, 0.063 et 0.046 m<sup>3</sup>/s. Le procédé expérimental indique que la température de l'air à la sortie du capteur, est le facteur le plus important et montre que lorsque le débit augmente la température diminue.



**Fig. II-3.** Schéma descriptif du séchoir utilisé par [Khalil, Al-Juamily et al. 2007]

[Singh et al., 2004] ont réalisés une étude expérimentale au sein d'un séchoir à effet de serre de simple conception et à des petites exploitations agricoles. Dans cette étude, ils ont conclu que ce type de séchoir ne peut engendrer que des faibles vitesses pour l'air asséchant ; la différence de niveau entre le bas et le haut du séchoir est petite. Dans ces conditions, il est à craindre la présence des températures trop élevées qui risqueraient de détériorer le produit. Le séchage ne dépassait pas les six heures les premiers jours (figure II.4) à cause de l'effet du rétrécissement du produit. Au début, ce sont les premières claies qui séchaient, puis et à cause du vide entre les produits crée par le phénomène de rétrécissement, le séchage est inversé, c'est-à-dire que les dernières claies sèchent avant les premières. Ce qui reprend le séchage au jour suivant après avoir vidé les premières claies et remplie les dernières claies.



**Fig. II 4.** Schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle [Singh et al., 2004]

[Tiwari et al, 2004] ont déterminé les coefficients de transfert de masse convectif (CMTC) pour le séchage de jaggery sous serre à convection naturelle et forcée (Figure II 5 (a) et (b)). On a constaté que les valeurs de CMTC pour le séchage de jaggery varient de  $0,55 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$ - $1,43 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$  et  $0,33 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$ - $1,80 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$  sous des modes de séchage sous serre solaire à convection naturels et forcés respectivement.



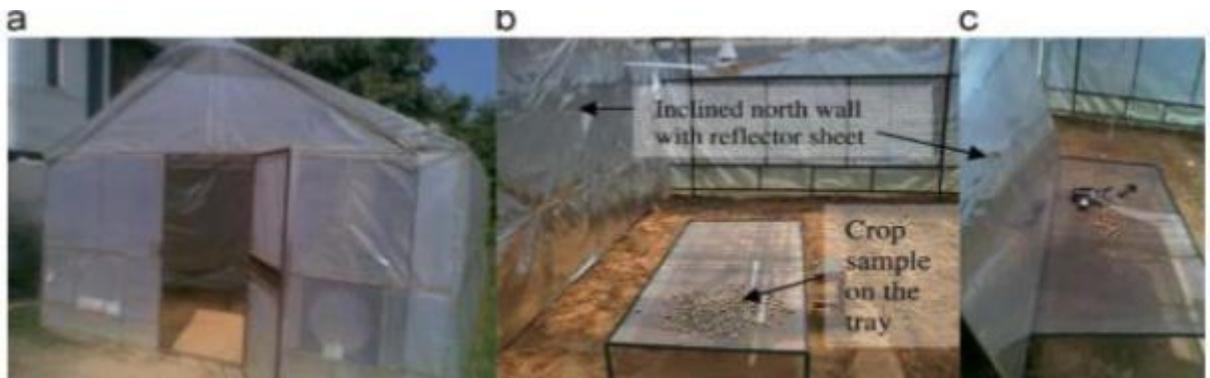
**Figure II 5.** Séchage sous serre (a) convection naturelle et (b) convection forcée

[Sacilik et al,2006] ont présenté les caractéristiques de séchage en couches minces de la tomate organique dans une serre tunnel sous les conditions climatiques d'Ankara, en Turquie (Figure II 6). Les tomates ont été séchées à partir de la teneur en eau initiale de 93,35% (w.b.) jusqu'à la teneur en eau finale de 11,50% (w.b.) en 4 jours dans un séchoir solaire à effet de serre par rapport à 5 jours de séchage sous soleil ouvert. Le produit séché était protégé contre les insectes, les oiseaux, les pluies et les poussières.



**Fig. II 6:** Serre tunnel [Sacilik et al, 2006]

[Sethi et al, 2009] ont amélioré la serre conventionnelle en utilisant une réflexion inclinée du mur nord (INWR) pour un séchage plus rapide des tranches de gourdes amères sous des modes de convection naturelle et forcée (Figure II 7). La température de l'air à l'intérieur de la serre est améliorée selon les modes de convection naturelle et forcée a été augmentée de 1 °C ,à 6,7 °C et de 1 °C à 4 °C, respectivement. .



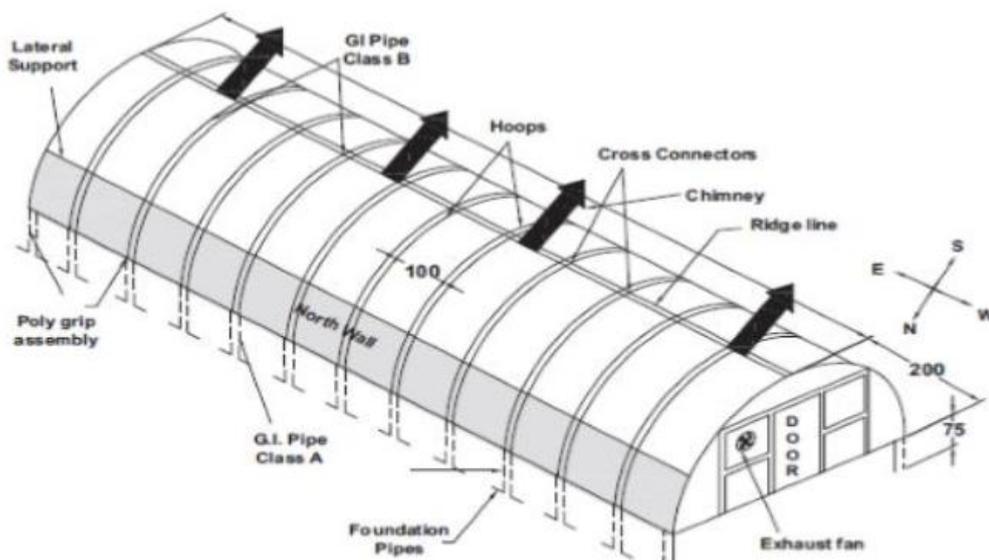
**Fig. II 7.**Vue panoramique de la sécheuse à effet de serre améliorée (a) vue extérieure (bande) à l'intérieur de la vue [Sethi et al, 2009]

[Janjai et al, 2011] ont développé un séchoir solaire à effet de serre modifié à grande échelle (sol en béton noir) ayant une capacité de chargement de 1000 kg (Figure II 8). Le chili, la banane et le café ont été utilisés pour être sécher à l'intérieur du séchoir à effet de serre modifié d'une teneur en eau initiale de 75% (wb) en 3 jours, 68% (wb) en 5 jours et 52% (wb) en 2 jours par rapport à 5 jours , 7 jours et 4 jours dans des conditions de séchage au soleil ouvertes respectivement. La période de récupération de la sécheuse a été estimée à 2,5 ans .



**Fig. II 8.** Séchoir de type serre à grande échelle avec brûleur GPL [Janjai et al, 2011]

[Rathore et al, 2010] ont développé et étudié la performance d'un séchoir solaire de type serre (Figure II 9) avec une paroi nord protectrice de chaleur pour sécher les raisins sans pépins (mutant: Sonaka). Les raisins ont été séchés à partir de la teneur en eau initiale de 85% (wb) jusqu'à une teneur en eau finale de 16% (wb) en environ 7 jours dans la sécheuse, où il a fallu environ 11 jours en séchage à soleil ouvert.



**Fig. II 9.** Schéma de séchoir solaire de type serre [Rathore et al, 2010].

[Elkhadraoui et al, 2015] ont étudié la performance d'un nouveau séchoir solaire à serre solaire mixte (Figure II 10) avec convection forcée pour le séchage du poivron rouge et du raisin *Sultana*. Un collecteur à plaque plate a été intégré à la serre pour augmenter la température de l'air à effet de serre. La teneur en eau du poivre rouge et des raisins *Sultana* a été réduite à 16% (wb) et 18% (wb) en 24 h et 50 h respectivement. .



Fig. II 10. Séchoir solaire de type serre [Elkhadraoui et al, 2015].

[Shanmugan et al,2005], ont développé un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée (Figure II.11), fabriqué et exécuté dans des conditions climatiques chaudes et humides en Chiennai à l'Inde, pour étudier l'efficacité thermique et l'humidité enlevée pendant le séchage de 75 kg de pois. Ce système est couplé par un capteur solaire orienté vers le sud pour maximiser le rayonnement solaire incident. La conclusion de ces résultats montre que le séchage dans un séchoir de type intégré se continue dans les heures non ensoleillées en plus la qualité du produit est améliorée pour un débit d'air varie entre 0.01, 0.02 et 0.03 kg/spar rapport au produit qui sèche en continuité, ainsi que l'efficacité thermique atteint 63 %, et le taux d'extraction d'humidité varie de 0.55 à 0.85 kg/kWh.

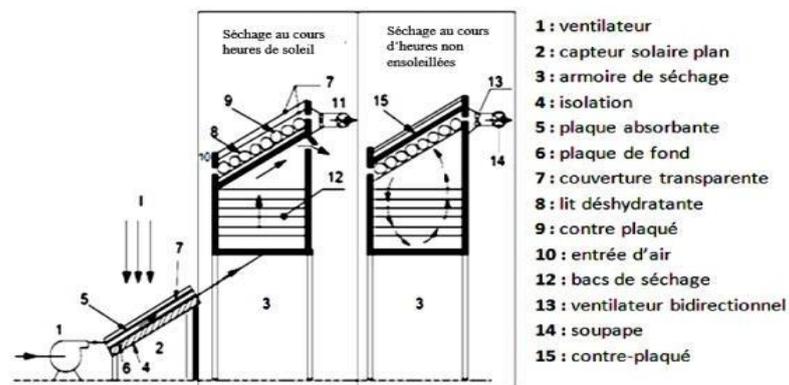


Fig. II.11 Séchoir solaire indirecte à convection forcée utilisé par [Shanmugan et al,2005]

[Dilip et al, 2002] Au sein de l'école de l'énergie et Etude environnementales à l'Inde, dans ce travail, ont utilisé un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle (figure I.12), leur séchoir est composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Les résultats obtenus par ce séchoir, concernant la température qui varient entre 50 °C et 55 °C. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de Mars à Mai, les températures obtenues es étaient suffisantes pour le séchage de plusieurs produits (fruits et légumes). Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend 4 jours, alors que le séchage traditionnel nécessite de 7 à 15 jours.

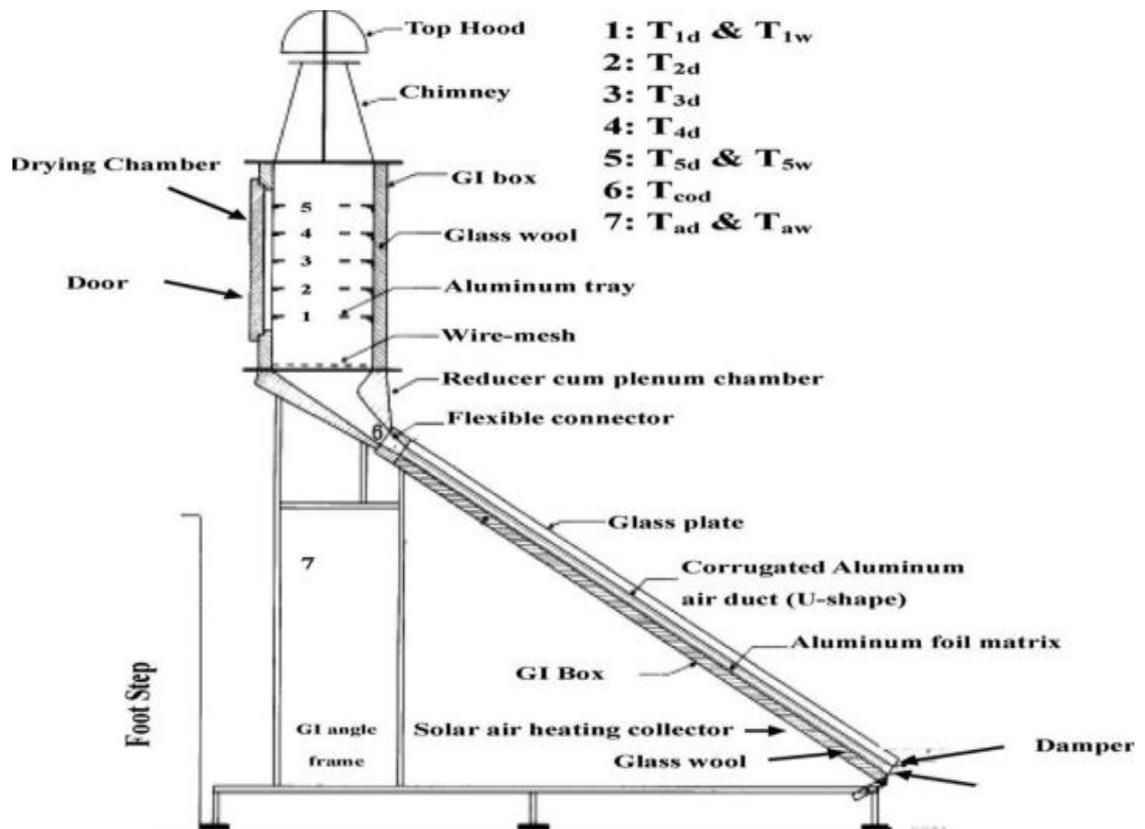
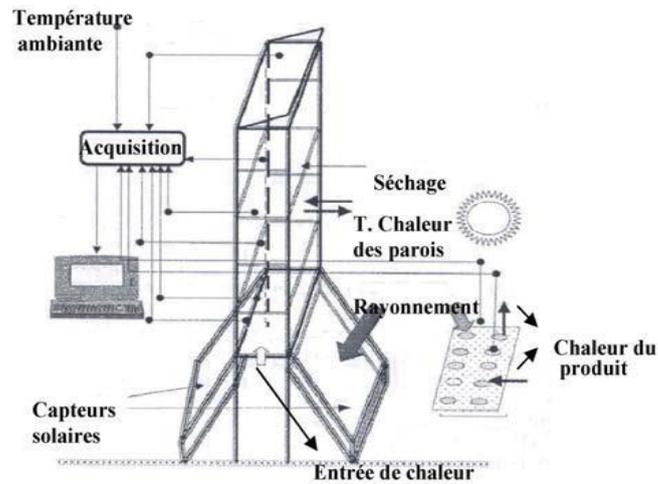


Fig. II.12 Schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle [Dilip et al, 2002]

[Bahnasawy, et al. ,2004] L'intérêt du préchauffage de l'air a été mis en évidence par une étude comparative menée pour montrer l'intérêt du mode indirect par rapport à un séchage direct : les deux dispositifs sont placés dans des conditions climatiques identiques, l'un fonctionnant en mode direct, l'autre en mode indirect. (Fig. II.13).



**Fig. II.13.** Séchoir solaire de mode indirect (gauche) ; et au soleil libre (droite). [Bahnasawy et al, 2004].

[Mohamed et al., 2008]. Mohamed et al. (2008) ont étudié l'effet de la température et du débit d'air sur la cinétique de séchage de *Gelidium Ses* qui pédale en séchage solaire convectif. Le processus de séchage a été effectué en utilisant un séchoir solaire à convection forcée indirecte (Fig. I.14). Il contenait un capteur solaire d'air, un chauffage d'appoint, un ventilateur de circulation et une armoire de séchage.



**Fig. II.14.** Séchoir solaire à convection forcée indirect [Mohamed et al. 2008].

[Prasad et al,2006] ont développé un séchoir solaire à convection naturelle de type direct intégré à un simple brûleur à biomasse (Fig. II.15). Le système est prédestiné pour être appliqué sur les petites exploitations des agricultures dans les pays en développement en raison de son faible investissement.

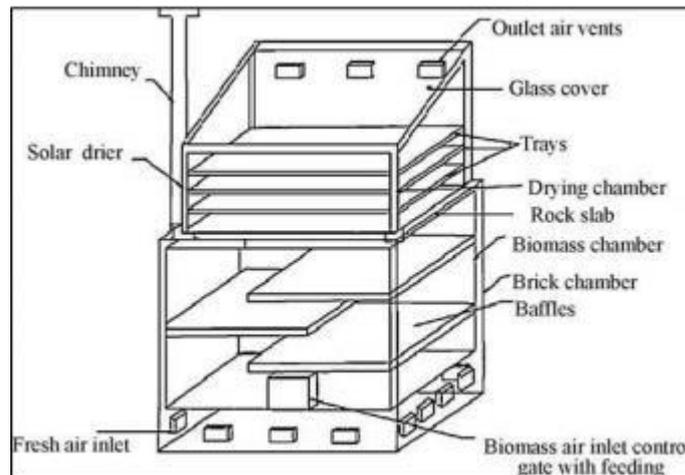


Fig. II.15. Diagramme d'un séchoir hybride à biomasse [Prasad et al, 2006]

[Mohanraj & Chandrasekar, 2008] ont conçu, fabriqué et testé un séchoir forcé à mode indirect (Fig. II.16) pour le séchage du copra. Il se compose d'un collecteur solaire, d'un ventilateur et d'une armoire de séchage solaire.

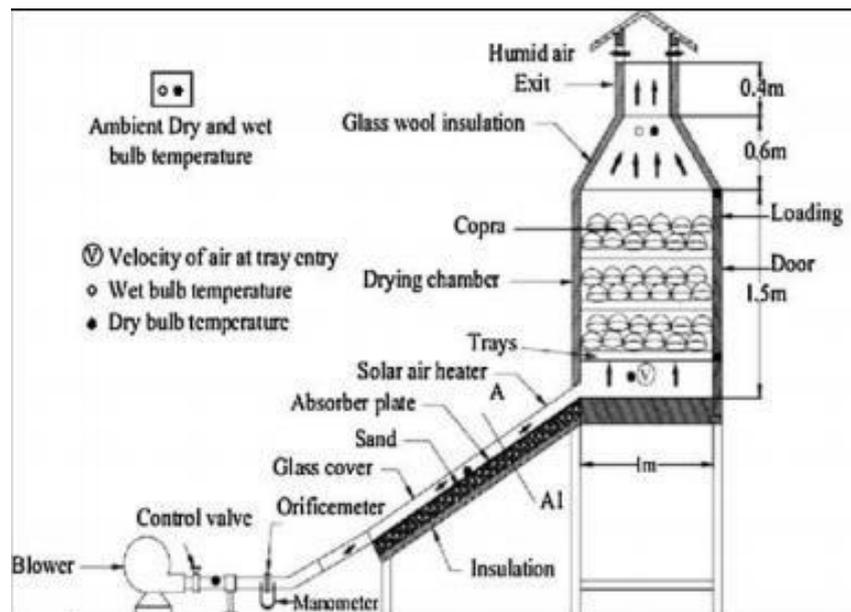
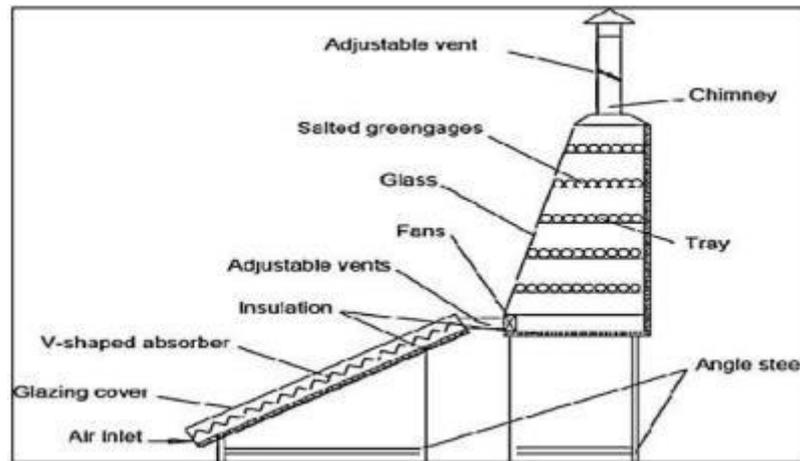


Fig. II.16 .Séchoir solaire indirect actif. [Mohanraj & Chandrasekar, 2008]

[Li et al,2006] ont développé et examiné un séchoir mixte à convection forcée pour sécher les greniers salés (Fig. II.17). Le séchoir constitué d'un capteur solaire à air, une chambre de séchage à effet de serre équipée par trois ventilateurs.



**Fig. II.17.**Séchoir solaire mixte à convection forcée. [Li et al,2006].

En conclusion de ce chapitre nous pouvons confirmer, à travers de l'exposé ci-dessus, que le séchage solaire sous serre est bien adapté à plusieurs produits agroalimentaires et que cette technique a connu plusieurs améliorations répondant aux exigences de consommation énergétique et de la qualité du produit final.

# **CHAPITRE III**

## **MATÉRIELS ET MÉTHODES**

## CHAPITRE III

### Matériels Et Méthodes

#### III -1 Description du prototype Expérimental

Dans cette partie, nous fournirons une description générale des prototypes de séchoir solaire examinés dans le cadre du mémoire de master. Nous envisageons une comparaison entre le prototype de séchoir solaire direct en polycarbonate et le prototype de séchoir solaire indirect avec chicane, réalisés dans l'atelier de l'Unité de recherche appliquée pour les énergies renouvelables (URAER, Ghardaïa); Le séchoir direct en polycarbonate mesure 1 mètre de large, 2 mètres de long et 0,7 mètre de haut. La serre est recouverte d'une couche de polycarbonate. Le fond est constitué d'une feuille d'aluminium de 0,8 mm d'épaisseur revêtue de noir et isolée au sol avec du polystyrène de 3 cm d'épaisseur plus une feuille de contreplaqué de 0,5 mm d'épaisseur. L'air est transporté à travers la serre par un cheminé. La figure 1 montre une image d'un séchoir solaire en polycarbonate. Quant au séchoir solaire indirect avec chicane, ce système contient un collecteur d'air plat avec chicanes, ce qui crée un écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et augmente la surface de contact avec elle, afin d'améliorer l'efficacité thermique. Il se compose de verre d'une épaisseur de 5 mm d'épaisseur, de surface inclinée, L'absorbeur en tôle d'aluminium d'épaisseur 0.5mm peinte en noire mate de dimension 2m×1m. L'isolation thermique est en polystyrène, pour notre cas on a utilisé du polystyrène au-dessus du contreplaqué et sur les parties latérales d'épaisseur 3 cm. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 2.5 cm. Une chambre de séchage : Elle est de hauteur 1.17 m, de longueur 0.55 m, et de largeur 0.55 m, Cette chambre comporte 4 claies (étagères) sur lesquelles est posé le produit à sécher. L'air chauffé pénètre à travers les claies dans un écoulement par convection forcée. et des ventilateurs qui permet de créer un écoulement forcé.



**Fig. III.1.** Prototypes de séchoir solaire de type indirect avec chicane

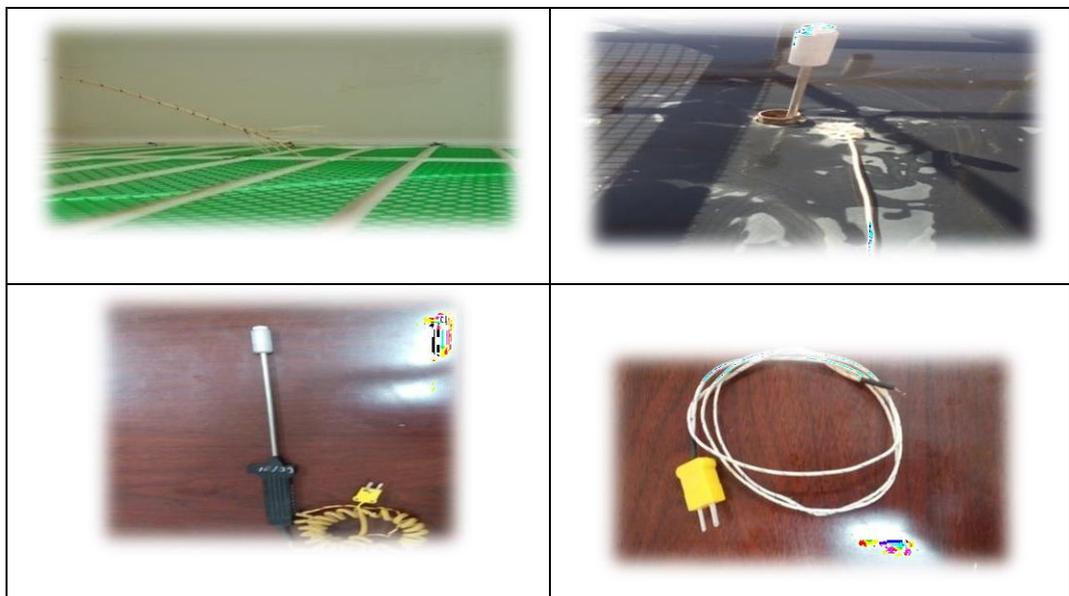


**Fig. III.2.** Prototypes de séchoir solaire de type direct en polycarbonate

### III. 2 Instrumentation des capteurs

#### III. 2.1 Mesure des températures

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium, de type K. Ces thermocouples, de diamètre 0,05 mm, peuvent aller jusqu'à des températures de 1370 K et permettent une précision de 0,1°C.



**Fig. III.3.** Montre des photographies du capteur lors de la phase l'instrumentation

### III. 2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à l'entrée de la chambre de séchage. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre Testo modèle 440. L'humidité relative est également être mesurée grâce à la sonde du thermo-hygromètre Testo 610.



Fig. III 4. Anemometer Testo 440 + thermo-hygromètre testo 610

### III. 2.3 Acquisition et traitement des données

Le système d'acquisition et de traitement des données est constitué d'une centrale d'Acquisitions de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22-bit) un système de commutation 40 voies Pilotée par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données (voir Figure III.5).

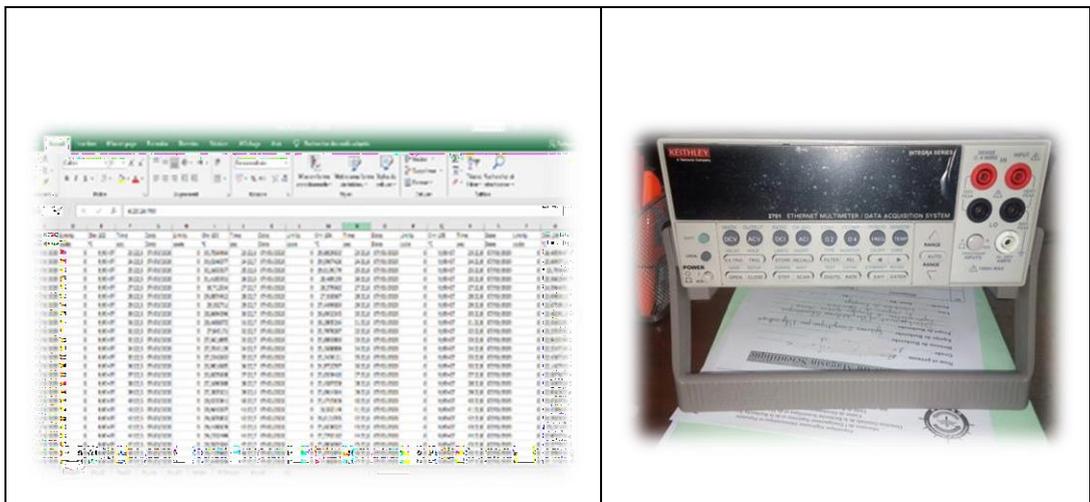


Fig. III. 5. Acquisition et traitement des données

### III. 2.4 Mesure de poids

Le suivi de la masse au cours de séchage est effectué par pesée sur une balance de précision 0.001 (Type KERN PCB 3500-2 Balance de 3500 g).



Fig. III.6. Balance analytique

### III. 2.5 Mesure du rayonnement solaire, de la vitesse de l'air et d'humidité relative

Une station radiométrique comporte deux parties : une partie fixe qui est constituée d'un pyromètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global sur un plan horizontal et d'un pyromètre différentiel type EPPLEY pour mesurer l'irradiance sur un plan incliné de 32° et orienté vers le sud. Une partie mobile (système de poursuite solaire) qui est pourvue d'un pyréliomètre pointé vers le disque solaire, afin de mesurer le rayonnement direct, et d'un pyromètre type EKO, muni d'une boule pare-soleil pour la mesure de l'éclairement diffus sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo-hygrométrique «Techoel sonde thermo-hygrométrique » avec un étalonnage de précision égale  $\pm 1.5\%$ , sensibilité à la température ambiante égale 0.1 (°C/mV) et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à +60°C. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x. celle-ci est reliée par interface RS232, à un

ordinateur. Ces données sont ainsi collectées quotidiennement 24/24h et avec un pas de cinq minutes.

La vitesse de l'air est mesurée. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre (Testo modèle 445 : incertitude  $\pm 0,03\text{ms}^{-1}$ ) L'appareil Testo 445 à affichage numérique est aussi muni d'une sonde pour la mesure de l'humidité relative de l'air.



**Fig. III. 7.** Station de météo

### **III. 2.6 Mesure de la teneur en eau**

La détermination de la teneur en eau a été effectuée de la façon suivante : dans un bécher préalablement séchée à l'étuve et tarée, 2-4 grammes d'échantillons sont introduits pendant 24 heures à 105 °C, ensuite, l'ensemble est mis à refroidir dans un dessiccateur pendant 20 minutes, puis pesée sur une Balance KERN ABT 220-4M: 220g/0,1mg.



**Fig. III.8.** Matériels utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale

### III. 3 Matières premières

Dans cette partie, nous allons présenter les produits que nous avons séchés dans ce travail. Il agit principalement de la carotte et la menthe.

#### III .3.1 Carotte (*Daucus carotta*)

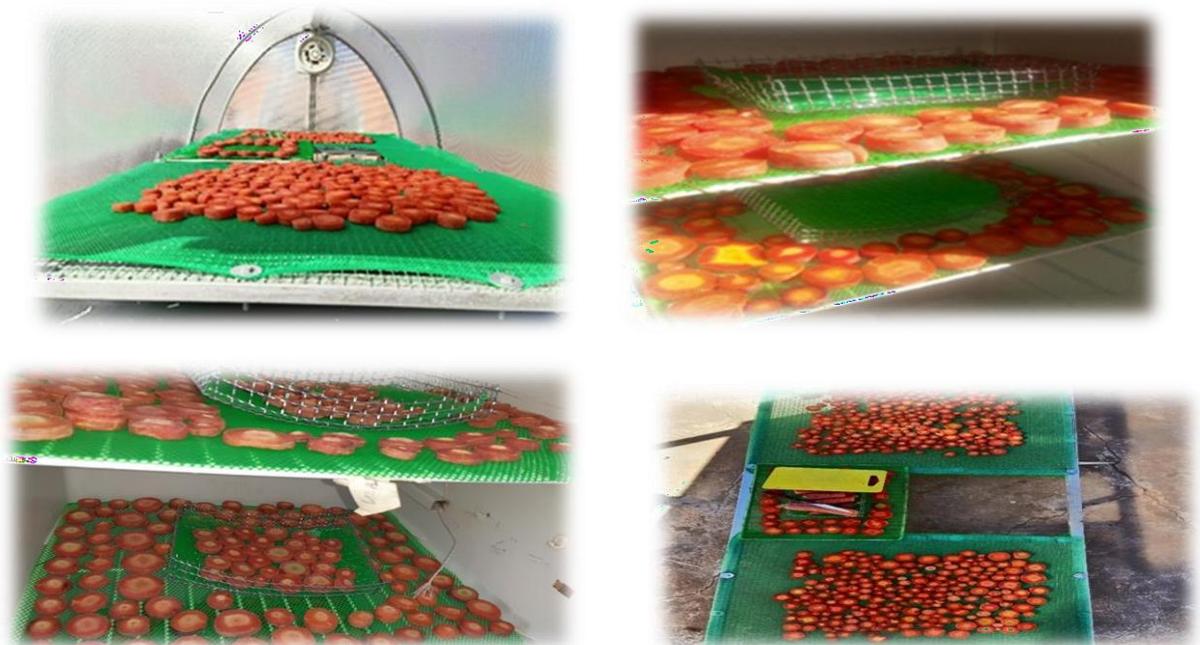
La carotte (*Daucus carotta*) est une plante bisannuelle de la famille des apiacées (aussi appelée ombellifère), largement cultivée pour sa racine pivotante charnue, comestible de couleur généralement orangée. C'est une racine riche en carotène, son apport énergétique est de 31 kilocalories par 100g. Elle contient environ 92% d'eau, 1% de protéine, 0.20% de lipides et 4.50% de sucre.



**Fig. III 09.** Carotte préparé pour la découpe

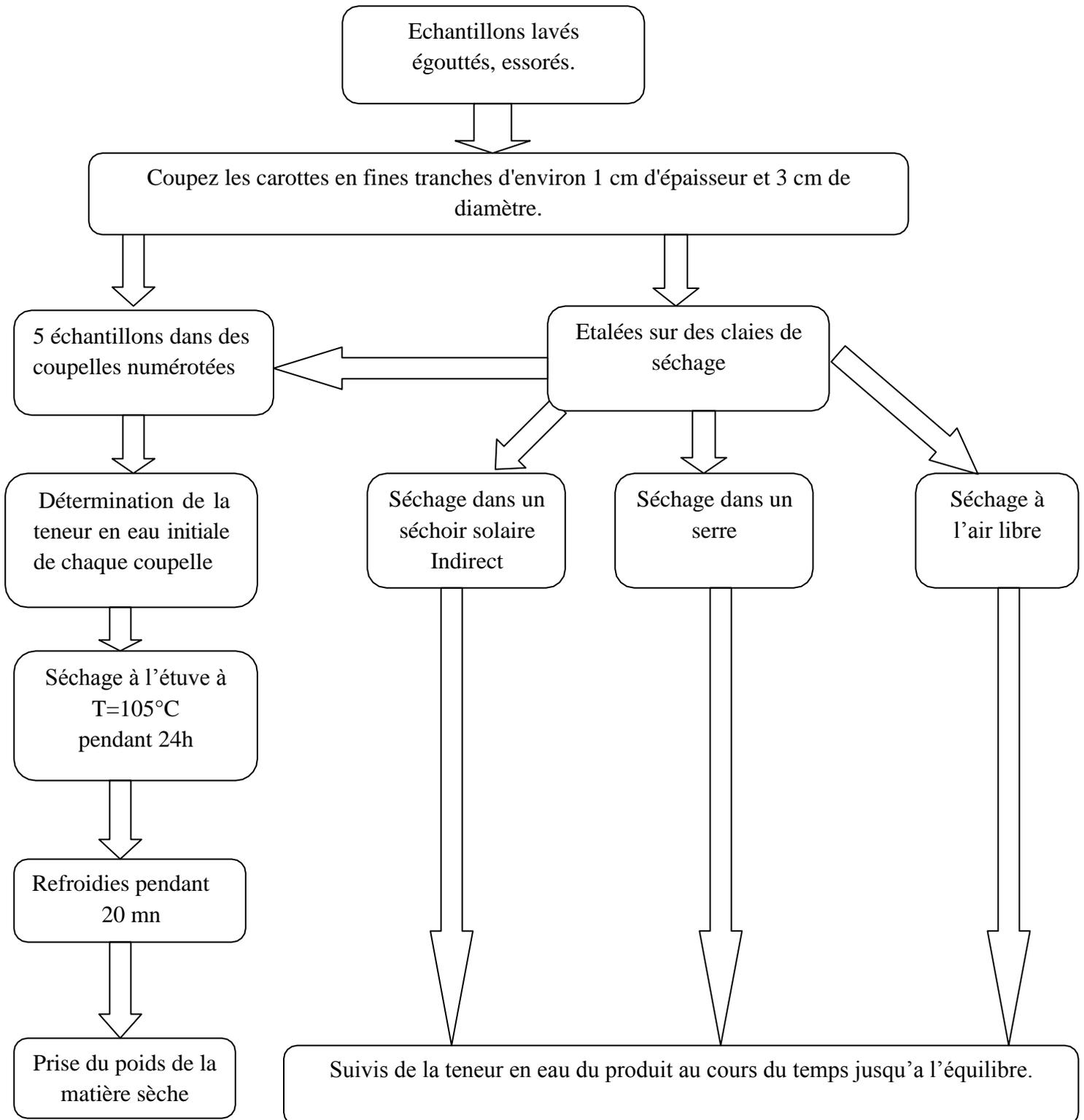
### III.3.2 Protocole de séchage de La carotte (*Daucus carotta*)

Nous disposons de deux séchoirs solaires du premier type direct en polycarbonate fonctionnant en convection naturelle et le second indirect avec chicane fonctionnant en convection forcée, le système sans stockage d'air ni recyclage. La quantité de produit à sécher est de 7 kg. Le produit, pelé et découpé en tranche d'une épaisseur d'environ 1 cm et d'un diamètre moyen de 3 cm (la taille du produit utilisé), est réparti uniformément sur deux lits (panier), le tout connecté à un ordinateur pour acquisitions des données (Fig.III 10). L'air de séchoir solaire direct en polycarbonate est naturellement transporté par effet de cheminée, comme pour le séchoir solaire indirect avec chicane, l'air asséchant est aspiré par un ventilateur installé à la sortie du l'isolateur pour bien faire circuler l'air. Afin d'obtenir des courbes de cinétique séchage, les échantillons sont pesés toutes les heures jusqu'à ce qu'ils atteignent l'équilibre. En même temps, nous enregistrons les températures à l'aide d'un thermocouple de type K placé dans chaque sécheur (moyen). Nous avons pesé les des thermocouples, puis calculé la teneur en eau sur une base sèche et humide, et enfin tracé la courbe de teneur en eau en fonction du temps. Afin de déterminer la teneur initiale en eau, nous introduisons 2 à 4 grammes d'échantillons (5 tasses) placés dans une étuve à 105 ° C pendant 24 heures jusqu'à ce qu'ils atteignent une déshydratation maximale.



**Fig. III 10.**Préparation de l'échantillon de Carotte

Pour déterminer la vitesse ou la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole suivant (Figure III 11):



**Fig. III 11.** Diagramme schématisé du processus de séchage de la carotte

### III .3.3 Menthe

La menthe a été fournie par une agriculture de Daya Ben Dahoua (10 km au nord de Ghardaïa). La teneur en eau initiale de la menthe a été de 4.543 Kg H<sub>2</sub>O/ Kg d.b (77.99 % base humide).



**Fig. III 12 :** La menthe

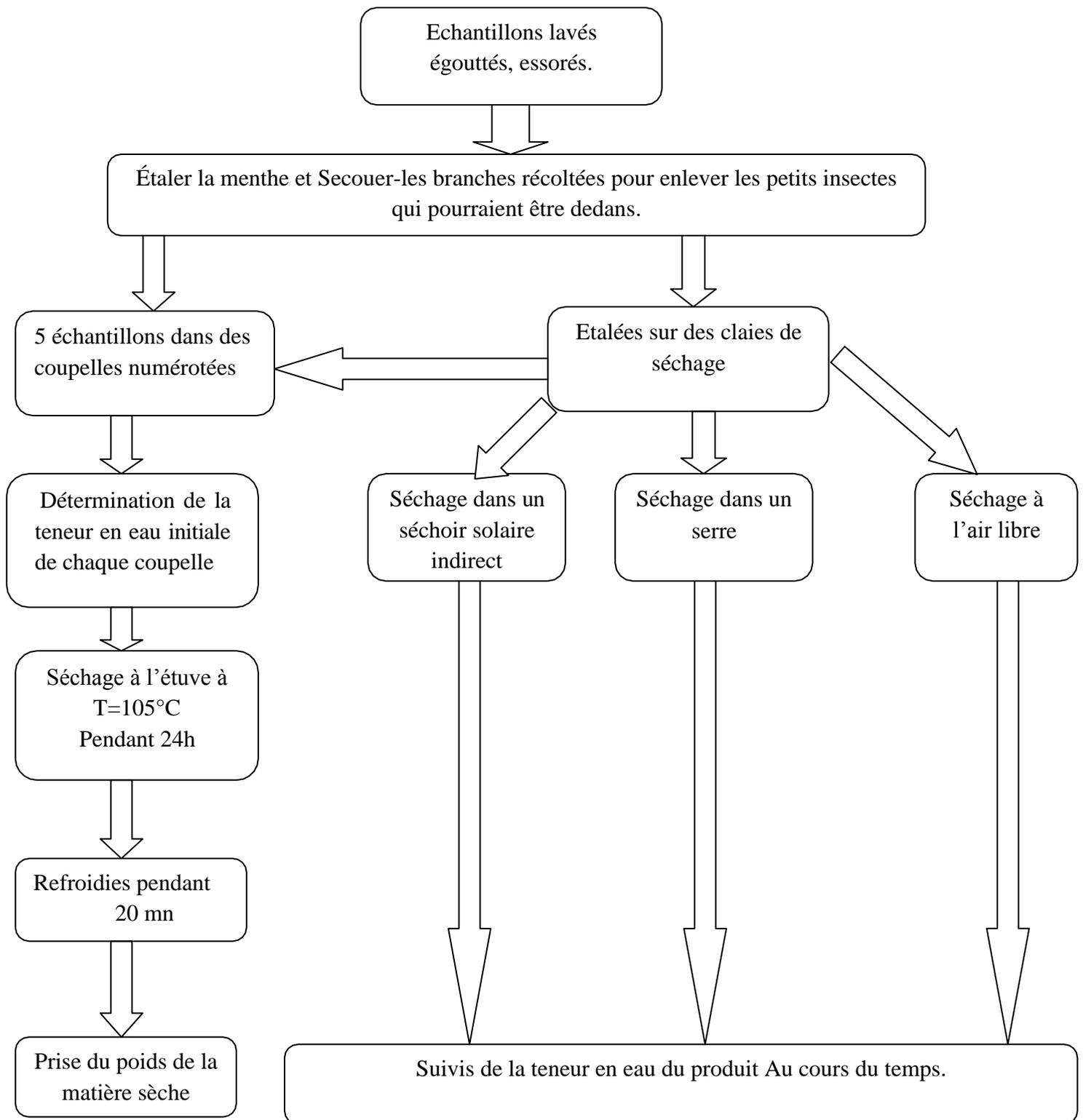
### III.3.4 Protocole de séchage de la menthe

Trier et laver la menthe (4 kg) à l'eau froide du robinet, puis secouer les branches coupées pour éliminer les petits insectes qui peuvent s'y trouver. Répartir uniformément sur les paniers dans les deux séchoirs. La quantité de produit à sécher est de 4 kg.

Nous prélevons un petit échantillon de la menthe préparée, puis coupons ces racines en fines tranches de 1 à 2 mm d'épaisseur, et plaçons ces dernières dans un four pour déterminer la teneur initiale en eau. Pour déterminer la vitesse et la valeur de la cinétique de séchage, nous procédons au protocole suivant (fig. III 13):



**Fig. III 13.**Préparation de l'échantillon de la

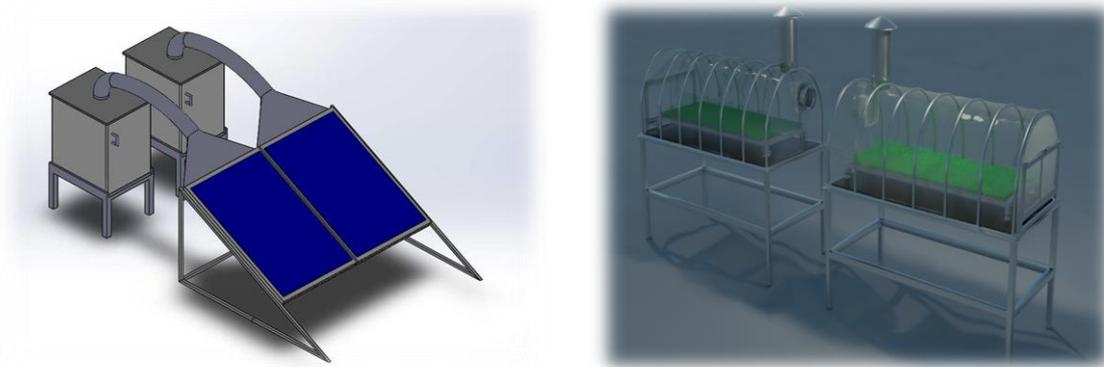


**Fig. III 14** .Diagramme schématisé du processus de séchage de la menthe

### III-4 Séchage de la menthe, la carotte

#### III-4.1 Conditions de séchage

Dans cette partie, nous intéressons à la cinétique des feuilles de la menthe, des tranches de la carotte et la menthe au cours de leur séchage dans des conditions météorologiques variables. Les séries de campagnes expérimentales de séchage dans un climat semi-aride ont été effectuée sen utilisant deux séchoirs solaires de type direct et indirect présentée dans La figure III-15.



**Fig. III.15.**Prototype réalisé pour le séchage de la carotte et la menthe.

#### III. 4.2 Modélisation des cinétiques de séchage

Le problème de la modélisation des courbes de séchage solaire consiste en général à élaborer une fonction vérifiant l'équation suivante :  $MR = f(t)$

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (0)$$

Avec  $M_t$  et  $M_0$  les valeurs de la teneur en eau (base sèche) respectivement à l'instant  $t$ , à l'infini (équilibre) et à  $t=0$ . Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage. Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite  $MR$  en fonction du temps. Ces formules contiennent des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats théoriques avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'investigation expérimental pour lequel elles ont été établies.

**Tableau III.1:** Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces

<i>N°</i>	<i>Modèles</i>	<i>Equations</i>	<i>Références</i>
01	<i>Newton (Lewis, Exponential, single exponential) model</i>	$MR = \exp(-kt)$	[Lewis, 1921]
02	<i>Page Model</i>	$MR = \exp(-kt^n)$	[xanthopoulos et al., 2002]
03	<i>Modified page model</i>	$MR = \exp(-kt^n)$	[midilli et al., 2002]
04	<i>Henderson and pabis(single term, generalized exponential)Model</i>	$MR = a \exp(-kt)$	[zhang et al., 2002]
05	<i>Logarithmic (Asymptotic, yagcioglu et al.)Model</i>	$MR = a \exp(-kt) + b$	[yaldiz et al., 2002]
06	<i>Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[midilli et al., 2002]
07	<i>Approximation of Diffusion (Diffusion Approach) Model</i>	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(kbt)$	[yaldiz et al., 2001]

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi ces sept différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.1-1. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant le logiciel «Origine Pro 8.0». Le coefficient (R2) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage.

[Balbay et al., 2012]. En plus de(R2), les différents paramètres statistiques tels que le khi carré réduit ( $\chi^2$ ) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisés pour déterminer la qualité de l'ajustement. Ces coefficients peuvent être calculés comme suit [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pr,i})^2} \quad (01)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (02)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (03)$$

Avec:

$$\overline{MR}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N}$$

Où  $MR_{exp}$  et  $MR_{pr}$  é sont, respectivement, la teneur en eau issue de l'expérience et prédite par le modèle,  $N$  est le nombre d'observations,  $n$  est le nombre de constantes du modèle.

L'analyse statistique et de corrélations et les méthodes de régression sont largement utilisées dans la modélisation du comportement au cours du séchage de divers produits agricoles. Les modèles de régression linéaire et non linéaire sont essentiels pour établir une relation entre les variables et sont d'une importance primordiale dans le cas où les auteurs n'ont pas établi de relations empiriques.

### III. 4.3 Détermination de la diffusivité effective de l'eau

Le taux de transfert de masse par diffusion pure est proportionnel au gradient de concentration de la teneur en eau, avec le coefficient de diffusion effective. Ainsi, la détermination de ce dernier coefficient est essentielle pour mieux décrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire,

dont l'équation est exprimée par [Vasić et al., 2016]:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad (04)$$

En supposant que la valeur de  $D_{eff}$  est constante, il est possible d'obtenir :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (05)$$

La tranche de produit séché peut être considérée comme une plaque uniforme soumise à un régime graduel non stationnaire avec une distribution initiale uniforme et des concentrations égales à la surface. En supposant que la matrice est une plaque infinie indéformable

(rétractable négligeable ou étendue) avec une répartition uniforme de l'humidité initiale, une résistance externe négligeable et une diffusivité constante, la solution analytique de la deuxième loi de Fick a été développée par Crank [Crank, 1975] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (06)$$

Où :  $D_{eff}$  est la diffusivité effective (en  $m^2/s$ ),  $t$  est le temps (en s),  $L$  est la demi d'épaisseur de la tranche (en m) et  $n$  est un entier positif.

Pour un temps de traitement suffisamment long, tous les termes de la séquence suivante ( $n \geq 1$ ) ont été considérés comme négligeables par rapport au premier terme. Donc l'équation peut être supposée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (07)$$

L'équation peut être réarrangée et exprimée comme suit :

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (08)$$

Les valeurs de données expérimentales de séchage sont représentées en termes de  $\ln(MR)$  en fonction du temps de réhydratation pour différentes températures. La diffusivité effective est calculée comme suit :

$$\text{Slope}(K) = -\pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (09)$$

# **CHAPITRE IV**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

## CHAPITRE IV

### RESULTATS ET DISCUSSION

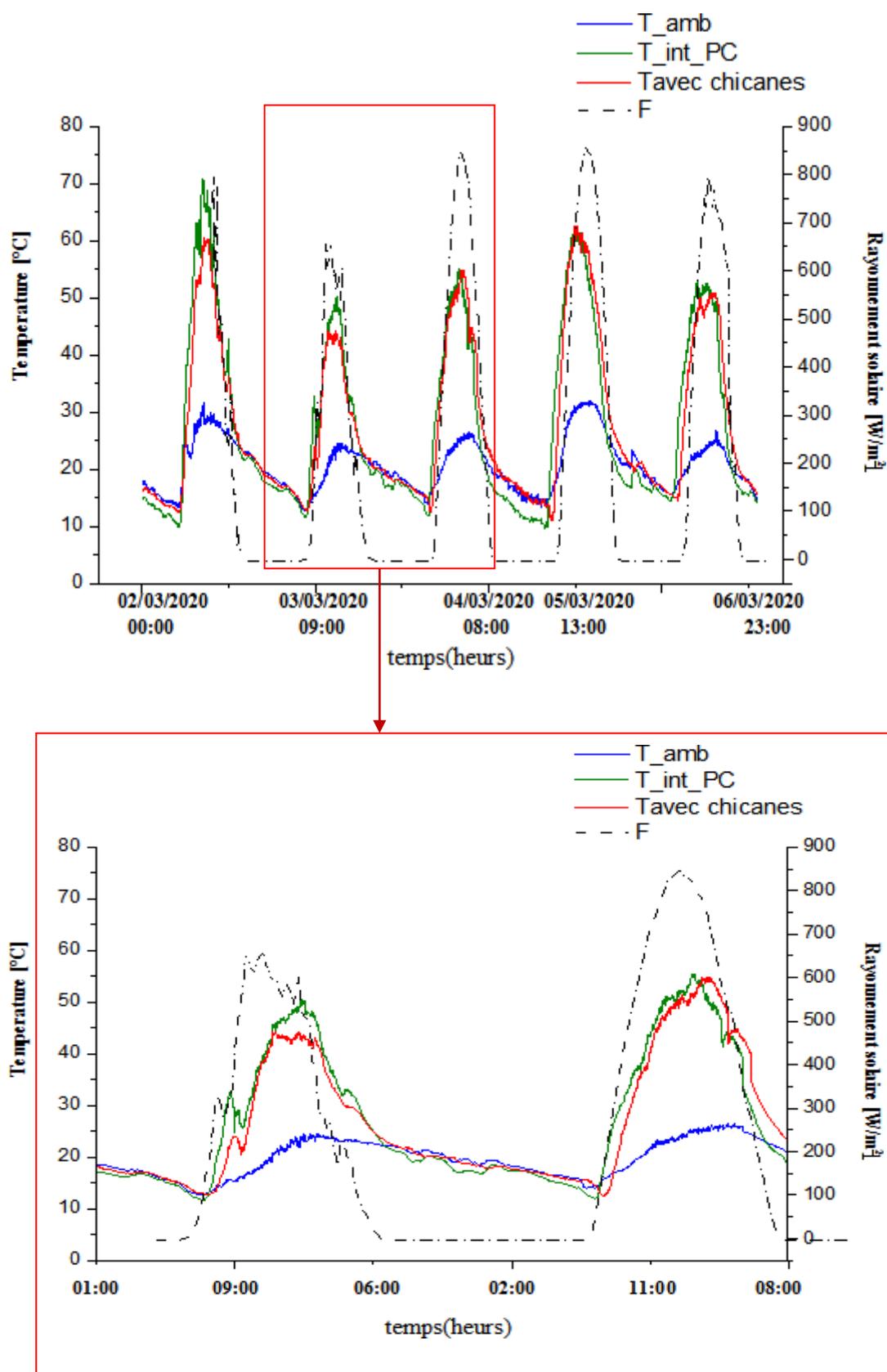
Les expériences ont été menées à la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa, situé à une latitude de 32,37° Nord et une longitude de 3,77 Ouest en suivant le comportement thermique du capteur sur une journée dans des conditions de fonctionnement réelles. Les caractéristiques de séchage de la carotte et de la menthe sont étudiées pendant trois jours consécutifs. La performance thermique des séchoirs solaire est mesurée en termes de température et d'humidité d'air à l'intérieur des chambres de séchage des séchoirs solaire direct et indirect. Le débit massique d'air est fixé à 30 kg /h pour le séchoir solaire direct et à 80 kg /h pour le séchoir solaire indirect. La figures 04 présente une vue photographique des dispositions des échantillons aux séchoirs solaires direct et indirect.

#### **IV.1.Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes**

Dans un premier temps, nous avons testé les deux prototypes de séchoirs solaires construis à l'atelier de (URAER) sans introduit le produit à séché (séchoirs vide) pour montrer le comportement thermique des deux prototypes de séchoir solaire direct et indirect.

La figure IV.1 montre la variation de la température de l'air interne de séchoir solaire direct et indirect, de l'intensité de rayonnement solaire et de l'air ambiant durant pendant cinq jours successifs du 02/03/2020 au 07/03/2020. Au début de la journée, il a été observé que la température de l'air interne de séchoir solaire direct était toujours supérieure à celle de l'air interne de séchoir solaire indirect jusqu'à le pic du midi. Cependant, la température de l'air interne de séchoir solaire direct était toujours inferieur à celle de l'air interne de séchoir solaire indirect au cours de l'après midi. Cela est dû à la bonne isolation de l'armoire de séchage de prototype de séchoir solaire indirect.

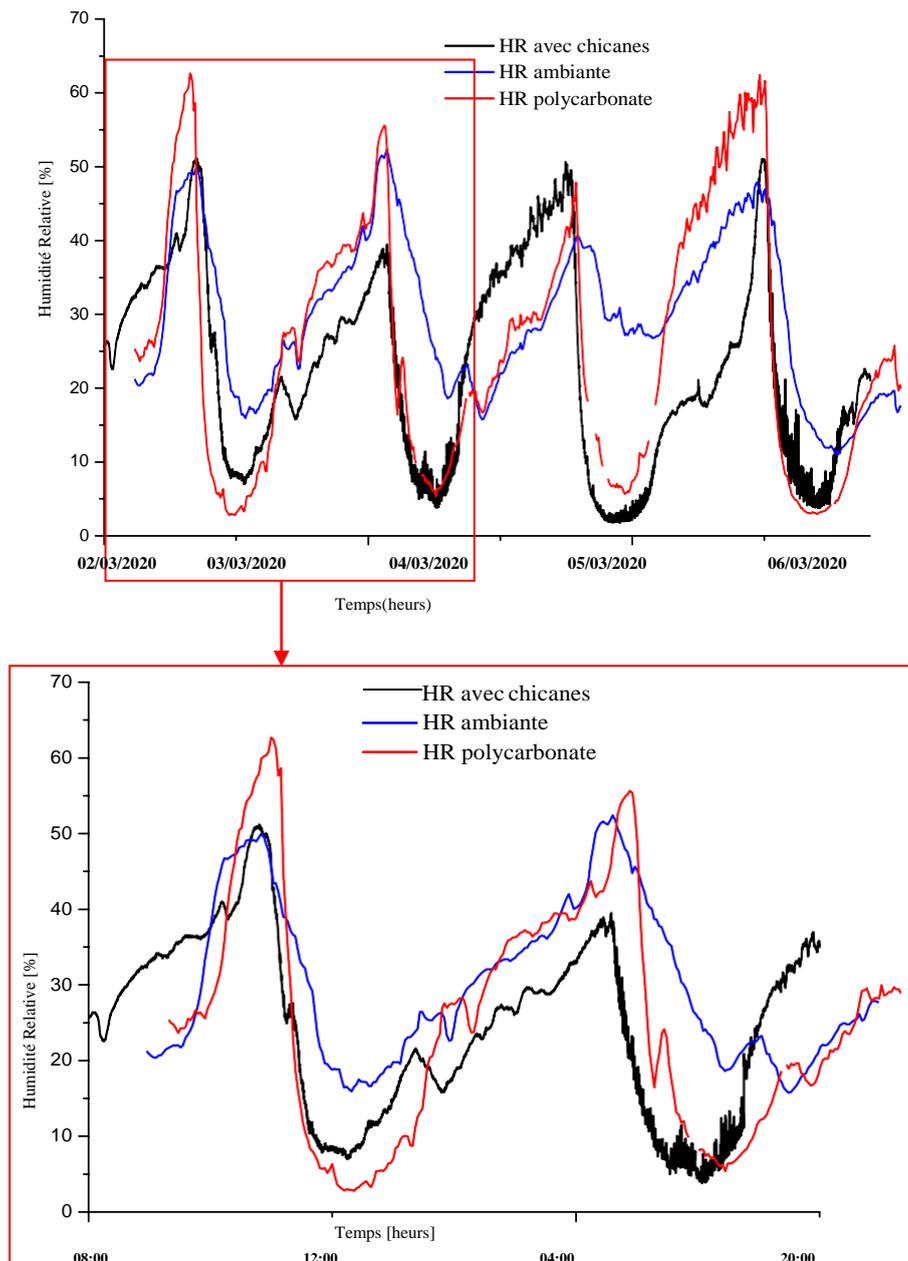
On peut voir sur la figure IV.1 que la température de l'air interne des séchoirs solaire direct et indirect augmente à mesure que l'intensité solaire augmente au cours de la matinée. La température de l'air augmente légèrement puis commence à diminuer à mesure que l'intensité du rayonnement solaire commence à diminuer dans la prochaine moitié de la journée.



**Fig. IV. 1** – Evolution de rayonnement solaire, de la température de l'air ambiant, interne des séchoirs solaires direct et indirect pendant cinq jours successifs du 02/03/2020 au 07/03/2020

L'évolution de l'humidité relative des milieux de séchage en fonction du temps sont présentées dans la figure IV. 2 pour les séchoirs solaires direct, indirect et l'ambient (l'air libre) pendant cinq jours du 02/03/2020 au 06/03/2020.

Il a été observé que l'humidité relative de l'air des milieux de séchage varie avec la température de façon inversement proportionnelle. Lorsque la température augmente vers le pic du midi, l'humidité relative diminue proportionnellement vers sa valeur minimale.



**Fig. IV.2** – Evolution de l'humidité relative de l'air ambiant, interne des séchoirs solaires direct et indirect pendant cinq jours successifs du 02/03/2020 au 07/03/2020

## IV .2 Séchage solaire dans les prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes

### Cas 1: Séchage solaire de la carotte

#### Caractéristiques de séchage de la carotte

La carotte est coupée en tranches avant d'être placée dans les séchoirs solaires et à l'air libre. Des échantillons de 300 g chacun a été prélevé pour le séchage sous le soleil et dans les séchoirs solaires direct et indirect. La figure IV. 03 montre les caractéristiques de séchage de la carotte en termes de la teneur en eau en fonction du temps. En observant la courbe de séchage conventionnel, on distingue deux périodes de séchage. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et la deuxième ou cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage. La teneur en eau a été déterminée dans un intervalle régulier durant les jours de séchage. La teneur en eau de la carotte est réduite à 3.5 kg.H<sub>2</sub>O/kg.d.b en 8,33 h dans le séchoir solaire indirect avec chicanes alors qu'il n'atteignait en même temps que 6.2 kg.H<sub>2</sub>O/kg.d.b et 7 kg.H<sub>2</sub>O/kg.d.b dans le séchoir solaire direct en polycarbonate et à l'air libre respectivement. Cependant, une diminution continue de la teneur en eau dans le séchage à l'air libre par rapport aux séchoirs solaires direct et indirect pour la première nuit. Cela est dû à l'effet important de la vitesse de l'air dans la première période à teneur en eau élevée.

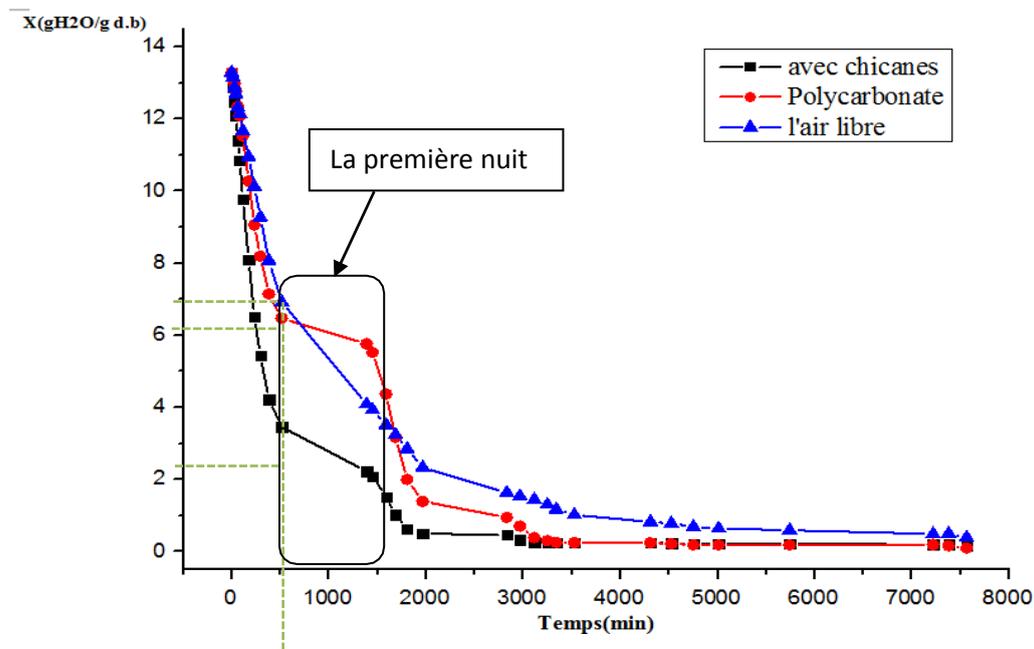


Fig. IV.3 – Variation de la teneur en eau en fonction du temps dans l'air libre, les séchoirs solaires direct et indirect au cours de séchage des échantillons de la carotte.



**Fig. IV.4.** Dispositions des échantillons de la carotte dans la chambre de séchage pour les séchoirs direct et indirect.

#### **IV .2.2 Modélisation empirique du processus de séchage en couche mince de la carotte**

Afin de déterminer le rapport de teneur en eau en fonction du temps de séchage, dix modèles de séchage de couche mince différents ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans le Tableau III.1, on suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination le plus élevé  $R^2$ , le plus bas réduit le quadrant  $\chi^2$  et l'erreur carrée moyenne RMSE. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux montrent les valeurs des modèles les mieux adaptés. Comme on peut voir dans le Tableau IV.1, par rapport aux modèles testés, le modèle de *Two Terms* a donné le meilleur accord avec les données expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction de temps pour le séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes. Cependant, dans le séchoir solaire indirect avec chicanes le modèle *Modified TwoTem Exponential* est le meilleur model adapté aux données expérimentales.

**Tableau IV.1** Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la carotte.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles				R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	
			k		n	a				b
			k1	k2						
Séchoir solaire direct en polycarbonate	01	Newton(Lewis, Exponential, Single exponential) Model	0,001				0,968	0,069	0,005	
	02	Page Model	0,004	0,814			0,977	0,059	0,003	
	03	Modified Page	1E-3	1			0,968	0,069	0,004	
	04	Herder sonand Pabis(Singleterm, Generalized exponential) Model	9,611E-4			0,953	0,972	0,065	0,004	
	05	Logarithmic Model	9,544E-4			0,954	-0,002	0,970	0,066	0,004
	06	Midilli Kucuk (Midilli, Midilli et al) Model	0,007	0,733	1,036	-6,858E-6	0,977	0,058	0,003	
	07	Diffusion Approximation (Diffusion Approach) Model	9,627E-4		1	1,001	0,966	0,071	0,005	
	08	Verma et al (Modified Two Tem Exponential) Model	9,497E-4	4,631		0,945	0,971	0,065	0,004	
	<b>09</b>	<b>Two Terms Model</b>	<b>0,007</b>	<b>7,801E-4</b>		<b>0,262</b>	<b>0,772</b>	<b>0,980</b>	<b>0,055</b>	<b>0,003</b>
	10	Tow trms Exponential Model	0,005			0,164	0,979	0,056	0,003	
Séchoir solaire indirect avec chicanes	01	Newton(Lewis, Exponential, Single exponential) Model	0,013				0,994	0,026	6,95E-4	
	02	Page Model	0,019	0,92			0,995	0,024	5,81E-4	
	03	Modified Page	0,0016	0,95	0,97	-2,7E-5	0,995	0,023	5,51E-4	
	04	Herderson and Pabis (Singleterm, Generalized exponential) Model	0,013			0,96	0,995	0,024	5,17E-4	
	05	Logarithmic Model	0,012			0,96	0,995	0,023	5,23E-4	
	06	Midilli Kucuk (Midilli, Midilli et al) Model	0,011	0,75		0	0,990	0,037	0,001	

A l'air libre	07	DiffusionApproximation(DiffusionApproach)Model	0.013		1	1	0,993	0,028	7,95E-4
	<b>08</b>	<b>Vermaetal (Modified TwoTem Exponential)Model</b>	<b>0.012</b>	<b>6.03</b>	<b>0.92</b>		<b>0,997</b>	<b>0.019</b>	<b>3,48E-4</b>
	09	Two Terms Model	0,012	8	0.92	0.072	0,997	0,019	3,75E-4
	10	Tow trms Exponential Model	0.013		0.99		0,991	0,031	9,53E-4
	01	Newton(Lewis,Exponential,Single exponential)Model	0,001				0,993	0,031	9,915E-4
	02	Page Model	0,003	0,856			0,998	0,017	2,952E-4
	03	Modified Page	1E-3	1			0,993	0,032	0,001
	04	HerdersonandPabis (Singleterm,Generalizedexponential) Model	9,736E-4		0,971		0,994	0,028	8,021E-4
	05	Logarithmic Model	0,001		0,954	0,025	0,996	0,025	6,466E-4
	06	MidilliKucuk (Midilli,Midillietal) Model	0,004	0,816	1,024	-3,778E-7	0,999	0,016	2,551E-4
07	DiffusionApproximation(DiffusionApproach)Model	0,003		0,341	0,262	0,999	0,013	1,807E-4	
08	Vermaetal (Modified TwoTem Exponential)Model	9,661E-4	4,629	0,967		0,995	0,028	7,966E-4	
<b>09</b>	<b>Two Terms Model</b>	<b>7,186E-4</b>	<b>0,003</b>	<b>0,675</b>	<b>0,338</b>	<b>0,999</b>	<b>0,013</b>	<b>1,639E-4</b>	
10	Tow trms Exponential Model	0,003		0,248		0,999	0,014	2,004E-4	

#### IV .2.3 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la carotte

Pour analyser quantitativement la cinétique de séchage, nous avons ensuite la diffusivité effective selon la deuxième loi de Fick. la diffusivité effective de l'eau est calculé en considérant que l'eau initiale est uniformément distribuée dans toute la masse de l'échantillon, la teneur en eau à la surface atteint instantanément l'équilibre avec les conditions de l'air environnant, le transfert de matière est purement diffusif et se fait d'une manière symétrique par rapport à l'axe de la couche mince des échantillons assimilée à une plaque infinie, la résistance au transfert de masse à la surface est négligeable par rapport à celle à l'intérieur de l'échantillon et que le coefficient de diffusion est constant et le retrait volumique de l'échantillon est négligeable. La diffusivité effective de l'eau est déterminée au moyen de la solution analytique de la deuxième loi de Fick développée par Crank (1975) dans le cas d'une plaque infinie.

La linéarisation du premier terme de l'équation (Eq. 0-1) permet la détermination de la diffusivité effective au moyen des droites qui représentent  $\ln(MR)$  en fonction du temps de séchage (t).

Généralement, une diffusivité effective est utilisée en raison d'informations limitées sur le mécanisme du mouvement de l'humidité pendant le séchage vu la complexité du processus. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV.2 Pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives ( $D_{eff}$ ) lors du séchage des échantillons de la carotte varient de  $7,8935E-09$  à  $10,7E-09$   $m^2/s$  à l'air libre et dans les deux prototypes de séchoir solaire direct et indirect. C'est principalement parce que la température de l'air interne de séchoir solaire indirect avec chicanes était supérieure à celle de séchoir solaire direct en polycarbonate et à l'air ambiant.

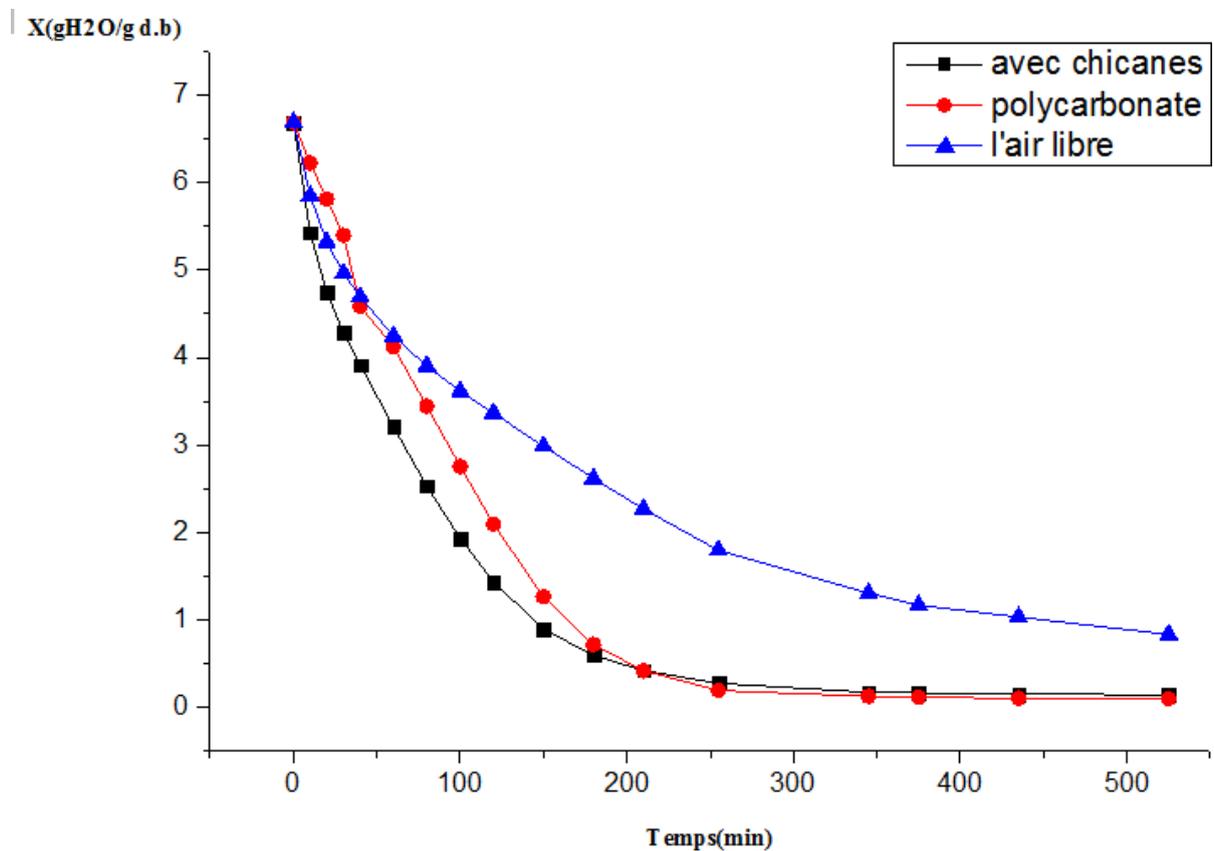
*Tableau IV.2. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la carotte en couche mince*

Systèmes	Diffusivité $D_{eff} [m^2s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
Séchoir solaire direct en polycarbonate	9,799E-09	0,977	0,449	0,202
Séchoir solaire indirect avec chicanes	10,7E-09	0,935	0,212	0,879
A l'air libre	7,893E-09	0,996	0,152	0,023

## Cas 2: Séchage solaire de la menthe

### IV.4.1. Caractéristiques de séchage de la menthe

Des échantillons de 300 g chacun a été prélevé pour le séchage sous le soleil et dans les séchoirs solaires direct en polycarbonate et indirect avec chicanes. La figure IV.05 montre les caractéristiques de séchage de la menthe en termes de la teneur en eau en fonction du temps. En observant la courbe de séchage conventionnel, on distingue deux périodes de séchage. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et la deuxième ou cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage. La teneur en eau a été déterminée dans un intervalle régulier durant les jours de séchage.



**Fig. IV.5.** Variation de la teneur en eau en fonction du temps dans l'air libre, les séchoirs solaires direct et indirect au cours de séchage des échantillons de la menthe.



**Fig. IV.6.** Dispositions des échantillons de la menthe dans la chambre de séchage pour les séchoirs direct et indirect.

#### **IV.4.2 Modélisation empirique du processus de séchage en couche mince de la menthe**

Afin de déterminer le rapport de teneur en eau en fonction du temps de séchage, dix modèles de séchage de couche mince différents ont été ajustés aux données expérimentales. Comme on peut voir dans le Tableau IV.3, par rapport aux modèles testés, le modèle de *Midilli-Kucuk* a donné le meilleur accord avec les données expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction de temps pour le séchoir solaire direct en polycarbonate et à l'air libre. Cependant, dans le séchoir solaire indirect avec chicanes le modèle *Logarithmic* est le meilleur modèle adapté aux données expérimentales.

**Tableau IV. 3** Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la menthe.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles				R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	
			k		n	a				b
			k1	k2						
Séchoir solaire direct en polycarbonate	01	Newton(Lewis,Exponential,Singleexponential)Model	0,009				0,975	0,059	0,004	
	02	Page Model	0,001		1,400		0,996	0,025	6,143E-4	
	03	Modified Page	0,009		1		0,975	0,059	0,004	
	04	HerdersonandPabis (Singleterm,Generalizedexponential) Model	0,010			1,064	0,979	0,053	0,003	
	05	Logarithmic Model	0,008			1,110	-0,061	0,984	0,047	0,002
	<b>06</b>	<b>MidilliKucuk (Midilli,Midillietal) Model</b>	<b>8,160E-4</b>		<b>1,497</b>	<b>0,047</b>	<b>-1,436E-5</b>	<b>0,997</b>	<b>0,022</b>	<b>5,011E-4</b>
	07	DiffusionApproximation(DiffusionApproach)Model	0,010			1,105	2500	0,981	0,051	0,003
	08	Vermaetal (Modified TwoTem Exponential)Model	0,010	8,005		1,105		0,981	0,051	0,003
	09	Two Terms Model	0,010	0,010		0,532	0,532	0,977	0,056	0,003
	10	Tow trms Exponential Model	0,014			1,899		0,994	0,029	8,674E-4
Séchoir solaire indirect avec chicanes	01	Newton(Lewis ,Exponential,Single exponential)Model	0,02				0,999	0,013	1.6E-4	
	02	Page Model	0,002		1,02		0,999	0,013	1.6E-4	
	03	Modified Page	0,002		1,02	0,97	0,995	0,013	1.6E-4	
	04	Herder sonand Pabis(Single term,Generalizedexponential) Model	0,002			1,012		0,999	0,012	1.4E-4
	<b>05</b>	<b>Logarithmic Model</b>	<b>0,002</b>			<b>1,010</b>		<b>0,999</b>	<b>0,012</b>	<b>1.4E-4</b>
	06	MidilliKucuk (Midilli,Midillietal) Model	0,002		1,001	1,013	2 E-6	0,999	0,037	1.5E-4
	07	DiffusionApproximation(DiffusionApproach)Model	0,002			1,016	6000	0,999	0,012	1.4E-4
	08	Vermaetal (Modified TwoTem Exponential)Model	0,002	4,472		1,016		0,999	0,012	1.4E-4
	09	Two Terms Model	0,003	3,6E-4		1,005	0,01	0,999	0,012	1.4E-4
	10	Tow trms Exponential Model	0,002			1,001		0,999	0,013	1.4E-4

01	Newton(Lewis, Exponential,Single exponential)Model	0,007				0,980	0,043	0,002
02	Page Model	0,012	0,876			0,986	0,0360	0,001
03	Modified Page	0,007	1			0,978	0,045	0,002
04	Herder sonand Pabis(Single term,Generalized exponential) Model	0,006		0,934		0,989	0,031	9,993E-4
05	Logarithmic Model	0,005		0,979	-0,058	0,991	0,029	8,330E-4
06	<b>MidilliKucuk (Midilli, Midillietal) Model</b>	<b>0,021</b>	<b>0,734</b>	<b>0,982</b>	<b>-2,931E-4</b>	<b>0,996</b>	<b>0,020</b>	<b>3,941E-4</b>
07	DiffusionApproximation(DiffusionApproach)Model	0,005		-	1	0,978	0,046	0,002
08	Vermaetal (Modified TwoTem Exponential)Model	0,010	6,837	0,905		0,993	0,025	6,452E-4
09	Two Terms Model	0,006	0,006	0,467	0,467	0,988	0,034	0,001
10	Tow trms Exponential Model	0,071		0,084		0,991	0,030	8,727E-4

### Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la menthe

Les résultats de la détermination de la diffusivité effective de l'eau de la menthe sont présentés dans le Tableau IV.4. Pour les différents cas examinés (Séchoir solaire direct en polycarbonate, Séchoir solaire indirect avec chicane et à l'air libre). Les diffusivités effectives ( $D_{eff}$ ) lors du séchage des échantillons de la menthe varient de  $0,631231E-09$  à  $4,82876E-09$   $m^2/s$  à l'air libre et dans les deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicane. C'est principalement parce que la température de l'air interne de séchoir solaire indirect avec chicane était supérieure à celle de séchoir solaire direct en polycarbonate et à l'air ambiant (même constat que la carotte).

**Tableau IV.4.** Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la menthe en couche mince

Systèmes	Diffusivité $D_{eff} [m^2 s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R2	RMSE	X2
Séchoir solaire direct en polycarbonate	4,829E-09	0,94648	0,735	0,540
Séchoir solaire indirect avec chicanes	1,470E-09	0,994	0,244	0,060
A l'air libre	0,631E-09	0,980	0,218	0,047

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes ont été expérimentés dans des conditions météorologiques réelles de la région de Ghardaïa afin de comparer leurs performances thermique. Dans les mêmes conditions météorologiques, la température moyenne de l'air à l'intérieur de séchoir solaire direct en polycarbonate a atteint 72 °C et celle du séchoir solaire indirect avec chicanes a atteint 63°C malgré que la température de l'air ambiant atteint 32°C.

Les performances de séchage à l'air libre et dans les deux prototypes de séchoirs solaires direct en polycarbonate et indirect avec chicanes ont été évaluées en utilisant de la menthe et de la carotte, dans lesquels les teneurs en eau initiales ont été réduites de 13.28 kg H<sub>2</sub>O/kg d.b (93%) et 6.69 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (87%) à 0.14 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (12.6%) et 0.14 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (12%), respectivement dans le prototype de séchoir solaire indirect avec chicanes et a été réduite à 0.09 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (9%) et 0.10 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (9%), respectivement dans le prototype de séchoir solaire direct en polycarbonate. Néanmoins, la teneur en eau de la carotte et de la menthe a été réduite à 0.39 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (28%) et 0.64 kg H<sub>2</sub>O /kg d.b (39%), respectivement au séchage à l'air libre.

Les résultats ont montré que les modèles de Midilli-Kucuk et Two-Terms était les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire de la carotte dans les deux prototypes de séchoir solaire direct en polycarbonate et indirect avec chicanes et à l'air libre. Cependant, les modèles de Midilli-Kucuk et Logarithmic était les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire de la menthe.

La diffusivité effective de la menthe était de  $1.470 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s alors que pour la carotte, il était de  $10.74 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, lorsque le séchage a été effectué avec le séchoir solaire indirect avec chicanes. Ces valeurs se sont avérées être de  $4,829 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s et  $9,799 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, respectivement pour la menthe et la carotte, lorsque le séchage solaire a été effectué avec le séchoir solaire direct en polycarbonate. Cependant, la diffusivité effective de la menthe était de  $0,631 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s alors que pour la carotte, il était de  $7,893 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, lorsque le séchage a été effectué à l'air libre.

En fin, le développement des techniques de séchage sont bien plus importants que la simple considération de la conception type ou de la modélisation. Autrement dit, cette étude mérite d'être poursuivi avec d'autre perspectives (paramétrés, produits végétales, désignes... etc.).

# Reference

## Reference

Almuhanna, E.A. 2012. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying date sunder the climatic conditions of the Eastern Province of Saudi Arabia Part I: Thermal Performance Analysis of a solar dryer. *Journal of Agricultural Science*, 4(3): 237-246.

Angélique, L. 2002. Le Séchage. Faculté des Sciences Appliquées, Département de Chimie Appliquée, Laboratoire de Génie Chimique dans le cadre du Printemps des Sciences. <http://www.ulg.ac.be/sciences> Université de Liège – Haute Ecole Charlemagne – Hemes Les métiers de l'énergie – Ingénieurs de l'énergie.

Aghbashlo, M., Muller, J., Mobli, H., Madadlou, A., Rafiee S. 2015. Modeling and simulation of deep bed solar greenhouse drying of Chamomile flower. *Drying Technology*, 33(6): 684-695

Aritesty, E., Wulandani, D. 2014. Performance of the rack type-Greenhouse effect solar dryer for wild ginger (*Curcuma Xanthorrhiza* Roxb.) drying. *Energy Procedia*, 47: 94-100.

Bossart L. 2006 Contribution à l'optimisation du séchage en lit fluidisé. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles (ULB).

Boussalia, A. 2010. Contribution a l'étude de séchage solaire des produits agricoles locaux. Mémoire de magister. Faculté des sciences de la technologie / Département de génie climatique.

Boulemtafes, A., Semmar, D. 1999. Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect. *Revue des Energies Renouvelables*. 4, 97-100.

Bahnasawy A.H., Shenana, M.E. 2004. A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kishk). *Journal of Food Engineering* 61: 309-319.

Benkhelfellah, R., El mokretar, S., Miri, R., Belhamel, M. 2002. Séchoirs solaires. Étude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect, 12 mes. *Journées Internationales de Thermique*. 259-262.

Dilip, R., Pangavhane, R.I., Sawhney, P.N. Sarsavadia. 2002 Design, development and performance testing of new natural convection solar dryer. *Enrgy* 27, 579-590

Dadda, B., Kherrou S., Serir, L. 2008. Réalisation d'un séchoir solaire indirect. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger* 127 – 134

Dudez, 1996. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et. Procédés, édition du gret, france,

Ekechukwu, O.V., Norton, B. 1999 Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energ Convers Manage* 40:615–655

Elkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdiand, I., Farhat, A. 2015. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*, 77: 1-8.

Fabien, Roget. Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. Autre [cond-mat.other]. Université de Toulon, 2012. Français. (NNT : 2012TOUL0004). (tel-01165053)

Kumar, A., Tiwari, G. N. 2006. Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 73(2): 121-134.

Khalil, E.J. Al-Juamily, Abdul Jabbar N. Khalifa, Tadahmun A. Yassen, 2007. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq, *Desalination*, 209, 163-170.

Kumar, A., Tiwari, G. N. 2007. Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1337-1350.

Li, Z., Zhong, H., Tang, R., Liu, T., Goo, W., Zhang, Y. 2006. Experimental investigation on solar drying of salted greengages. *Renewable Energy* 2006; 31:837–47.

Mohanraj, M., Chandrasekar, P. (2008). Drying of copra in forced convection solar drier. *Biosystems Engineering* 2008; 99:604–7.

Manohar, K. R., Chandra, P. 2000. Drying of agricultural produce in a greenhouse type solar dryer. *International Agricultural Engineering Journal*, 9(3/4): 139-150

Madjoudj, N., Imessad, K. (2016). Matériau à Changement De Phase Au Service De La Bioclimatique. *Revue des Energies Renouvelables*. 19 (4), Pages 647-662.

Prasad, J., Vijay, V.K., Tiwari, G.N., Sorayan, V.P.S 2006. Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale. *Journal of Food Engineering* 2006 ;75 :497–502.

Roland, C., André, J. 2000. Technique de l'ingénieur-génie des procédés séchage. 2 ; 2480-22 .

Rathore, N. S., Jhala, A. S., Mathur, G. K., Vijayavargiya, J. 2006. Solar drying of Amla: a case study. *Journal Food Science Technology*, 43(6):

639-642

Sacilik, K., Keskin, R., Elicin, A. K. 2006. Mathematical model of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73(3): 231-238

SECAAR, Les sechoirs: une tres grande diversite 06 BP 2037 – Abidjan 06 – Côte d’Ivoire. (A1)

Sethi, V. P., Arora, S. 2009. Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy*, 83(9): 1472-1484.

Souheyla Khaldi. 2018 Etude numérique du comportement thermique d’un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d’énergie. Autre. Université Bourgogne Franche- Comté, . (H1)

Singh, p. 2004 "multi-shelf portable solar dryer." *renewable energy* 29: 753-765.

Tiwari, G. N., Kumar, S., Prakash, O. 2004. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63(2): 219-227

Touati, 2017 Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues" Mémoire de fin d’étude Présenté pour l’obtention du diplôme de Master Academique. université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued.

Türk Togrul et Dursun Phelivan, 2002 Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 55 (2002) 209-216

Janjai, S., Intawee ,P., Kaewkiew J., Sritus ,C., Khamvongsa, V. 2011. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3): 1053-1062.

