

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Energétique

**Par** :

- BOUCHAALA Abdallah
- MEZIANI Anas Mohammed Ikbel

**Sujet**

**CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES THERMIQUES  
DE SÉCHOIR SOLAIRE INDIRECT À CONVECTION FORCÉE PAR  
L'INTÉGRATION DES MATÉRIAUX DE STOCKAGE THERMIQUE**

Soutenu publiquement, le **23 /09/2020**, devant le jury composé de :

<b>Rachid SAIM</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
<b>Khaled ALIANE</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
<b>Ahmed AZZI</b>	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
<b>Abdelouahab BENSEDDIK</b>	Maître de recherches B	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Co-Encadreur

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 :*

*À 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.*

➤ *À mes très chers frères, mes sœurs.*

➤ *À toute ma famille.*

➤ *À tout mes enseignants.*

➤ *À tout mes amis.*

*À tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à ma formation.*

*M. BOUGHALÀ Abdellah*



## *Dédicace*

### *À mon cher papa*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consenti à faire pour mon éducation et ma formation toutes ces années. C'est aussi grâce à toi que j'en suis là aujourd'hui. . .*

### *À ma chère maman*

*Merci pour sa motivation, sa patience, sa contribution et sa présence quotidienne, ses conseils, merci d'avoir toujours respecté mes choix, d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir toujours soutenu et aidé durant ces longues années d'études. C'est aussi grâce à elle que j'en suis là aujourd'hui. . .*

### *À ma famille*

*Mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements constants et leur soutien moral. Que dieu les protèges et leurs offre la chance et le bonheur. À tous les membres de ma promotion.*

*M. M. L. J. A. N. J. Anas Mohammed Akbel*



# Remerciements

*Nos vifs remerciements vont tout particulièrement à dieu le tout puissant pour la Volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années D'études pour atteindre ce succès.*

*Ce travail a été possible grâce à plusieurs personnes qui se sont toutes investies Soit par leurs apports scientifiques soit par leurs encouragements et qu'il nous est agréable de leur exprimer en quelques lignes toutes nos reconnaissances.*

*Nos chaleureux remerciements s'adressent au directeur de mémoire Monsieur **A. AZZI** pour avoir accepté l'encadrement de ce travail et apporter ses Éclairages judicieux, son énorme aide, ses conseils, ses suggestions, ses Encouragements incessants et le temps qu'il nous a accordé.*

*Nous tenons à remercier notre professeur Monsieur **A. BENSEDIK** pour la qualité de sujet qu'il nous a proposé, pour nous avoir fait bénéficier de ses Connaissances scientifiques, ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter Nos réflexions*  
*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 **Mr. SAIM**,  
**Mr. ALIANE** qui ont accepté de juger ce modeste travail,  
D'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.*

*Un remerciement particulier pour tous les enseignants de département de Génie Mécanique pour leurs encouragements, l'aide, l'orientation et leurs critiques Constructifs qui ont permis l'accomplissement de ces années d'études dans les Meilleures conditions.*

*Nos chers : membres de famille, proches et amis merci à vous tous pour vos Implications, soutiens constants et vos encouragements durant toutes les années D'études.*

*M. BOUCHAALA Abdellah  
M. MEZIANI Anas Mohammed Ikbel*

## المخلص :

الهدف من هذا العمل هو تجربة نموذجين أوليين لمجففات شمسية غير مباشرة مع الحمل القسري. الأول عبارة عن مجفف شمسي غير مباشر بدون حواجز والثاني به حواجز (OSF (Offset Strip Fins). يتم اختبار النموذجين الأوليين للمجفف الشمسي وتحليلهما تجريبياً في وحدة أبحاث الطاقات المتجددة التطبيقية (URAER) غرداية، الجزائر في ظل ظروف مناخية في المنطقة. حولت الدراسة بشكل أساسي في حل مشكلة أن مجففات الطاقة الشمسية تعمل بكفاءة فقط عندما يكون هناك طاقة شمسية كافية. لذلك، تم تضمين وسيلة إضافية لزيادة نقل الحرارة (حواجز OSF) بحيث يمكن للتجفيف أن يعمل بشكل جيد خلال فترات الطاقة الشمسية المنخفضة. تم إجراء اختبارات مختلفة من أجل تقييم أداء النموذج الأولي لمجفف شمسي غير مباشر بالحمل القسري. لم يتم إجراء أي اختبار حمل، أي بدون الاحتفاظ بأي مادة حتى تجف، وأشار إلى أن درجة الحرارة يمكن أن ترتفع إلى 87 درجة مئوية في المجفف الشمسي غير المباشر مع حواجز و80 درجة مئوية في المجفف الشمسي غير المباشر بدون حواجز. كان متوسط درجة الحرارة المسجلة للعوازل مع وبدون حواجز 80 درجة مئوية و75 درجة مئوية على التوالي. كما تم تقييم أداء المجففات الشمسية غير المباشرة بالحمل القسري باستخدام النعناع والجزر. بالنسبة للاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها، تضمنت معايير الأداء المستخدمة في التقييم درجات حرارة الهواء في مواقع مختلفة من المجفف الشمسي النموذجي، وحركية التجفيف، والانتشار الفعال والكفاءة الحرارية. تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف الطبقة الرقيقة للنعناع والجزر. أظهرت النتائج أن نماذج (Two-Terms, Midilli-Kucuk) (Diffusion Approximation, Verma et al, Page) هي الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي للمنتجين اللذين تم تجفيفهما في عمليات تجفيف شمسي مختلفة. انخفض محتوى الماء في النعناع والجزر من 87% إلى 93% إلى 11% و12% على التوالي في يومين إلى ثلاثة أيام. باستخدام المجفف الشمسي غير المباشر بدون حواجز، كان انتشار النعناع الفعال  $10 \times 1.47017$  (9-) متر مربع / ثانية بينما كان للجزر  $10 \times 10.74$  (-09) متر مربع / ثانية. تم العثور على هذه القيم لتكون  $10 \times 1.45$  (-9) متر مربع / ثانية و  $10 \times 10.74$  (-09) متر مربع / ثانية، على التوالي للنعناع والجزر، عندما تم إجراء التجفيف الشمسي باستخدام المجفف الشمسي غير المباشر مع حواجز.. كانت كفاءة العازل 70% و60% للعازل مع وبدون حواجز على التوالي.

**الكلمات الدالة :** تجفيف الفاكهة والخضروات، عمليات التجفيف الشمسي، حركيات التجفيف، السلوك الحراري، مواد التخزين المختلفة.

## Résumé :

L'objectif de ce travail est l'expérimentation des deux prototypes de séchoirs solaires indirects à convection forcé. Le premier c'est un séchoir solaire indirect sans chicanes et le deuxième avec chicanes OSF (Offset Strip Fins). 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.

L'étude a principalement tenté de résoudre le problème lié au fait que les séchoirs solaires ne fonctionnent efficacement que lorsqu'il y a suffisamment d'énergie solaire. Par conséquent, un moyen supplémentaire d'augmenter le transfert de la chaleur (chicanes OSF) a été inclus afin que le séchage puisse être performant pendant les périodes à faible énergie solaire. Différents tests ont été réalisés afin d'évaluer les performances du prototype de séchoir solaire indirect à convection forcé. Aucun test de charge, c'est-à-dire sans garder aucun matériau à sécher, n'a été effectué et il a indiqué que la température pouvait monter jusqu'à 87 °C dans le séchoir solaire indirect avec chicanes et 80 °C dans le séchoir solaire indirect sans chicanes. La température moyenne enregistrée des isolateurs avec et sans chicanes était de 80°C et 75 °C respectivement. Les performances des séchoirs solaires indirects à convection forcé ont également été évaluées en utilisant de la menthe et de la carotte. Pour les différents tests effectués, les paramètres de performance utilisés pour l'évaluation comprenaient les températures de l'air à différents endroits de prototype de séchoir solaire, la cinétique de séchage, la diffusivité effective et le rendement thermique. Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la menthe et la carotte. Les résultats ont montré que les modèles de (Diffusion Approximation, Verma et al, Page, Two-Terms, Midilli-Kucuk) était les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire des deux produits dans différentes procédures de séchage solaire.

La teneur en eau de la menthe et de la carotte a été réduite de 87% et 93% à 11% et 12%, respectivement, en deux à trois jours. En utilisant le séchoir solaire indirect sans chicanes, la diffusivité effective de la menthe était de  $1.47 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s alors que pour la carotte, il était de de

$10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ces valeurs se sont avérées être de  $1.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivement pour la menthe et la carotte, lorsque le séchage solaire était effectué avec le séchoir solaire indirect avec chicanes. L'efficacité des insolateurs était de 70% et 60% pour l'insolateur avec et sans chicanes, respectivement.

**Mots clefs :** séchage des fruits et légumes, procédés de séchage solaire, cinétique de séchage, comportement thermique, différents matériaux de stockage.

**Abstract:**

The aim of this work is primarily testing the two indirect prototypes of solar drying at forced convection, the first is an indirect solar dryer with OSF (Offset Strip Fins) and the second without OSF. Both of solar drying systems are experimentally tested and analyzed at the Applied Energies Research Unit of (URAER) Ghardaia, under real meteorological conditions region. The study mainly tries to address the problem of the fact that solar dryers efficiently function when there is enough solar energy. Consequently, to increase heat transfer (OSF baffles) has been included so that the drying process is able to be performed during periods of fable solar energy. In order to study the indirect solar dryer performance at forced convection, different tests were realized. Without any charge testing, i.e. without keeping any material out of the drying process, it wasn't accomplished and it indicated that the temperature can rise up to  $87^\circ \text{C}$  in indirect solar drying using OSF and  $80^\circ \text{C}$  in the indirect solar drying without OSF. The recorded temperature of the insulators with and without baffles was respectively between  $80^\circ \text{C}$  and  $75^\circ \text{C}$ . The performance of indirect solar dryers at forced convection was also evaluated through the use of mint and carrots. For the different accomplished tests, the parameters of performance used are the air temperature at several points of the solar drying prototype, the drying kinetic, the effective diffusion and the thermal efficiency. Ten mathematical models were used to describe the drying kinetic into a thin layer of mint and carrots. The results indicated that (diffusion approximation, verma et al, page, twoterm, midilli – kucuk) Was the most suitable and appropriate to describe the solar drying process of two different dried products in different solar drying operations. The moisture content of mint and carrot was respectively reduced from 87% and 93% to 11% and 12%, in two to three days. Using the solar dryer without OSF, the diffusion effectiveness of mint was  $1.47 \times 10^{-9}$  while for carrot it was from  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . These values were confirmed as  $1.45 \times 10^{-9}$  and  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , for the indirect solar dryer with OSF. The efficiency of the insulators was respectively of 70% and 60% for insulator with and without OSF.

**Key words:** fruits and vegetables drying, the processes of drying, drying kinetic, Thermal behavior, different storage materials.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
--------------------------	----------

## **I.chapitre1**

<b>I.1 Le Séchage.....</b>	<b>3</b>
I.1.1 Définition : .....	3
I.1.2 Importance et intérêt de séchage .....	3
I.1.3 Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire.....	4
I.1.4 Séchage et énergie .....	4
I.1.5 Histoire du séchage solaire .....	5
<b>I.2 Les différents types des séchoirs solaires .....</b>	<b>5</b>
I.2.1 Les séchoirs naturels .....	5
I.2.2 Les séchoirs solaires directs .....	6
I.2.3 Les séchoirs solaires indirects .....	8
I.2.4 Les séchoirs solaires tunnels .....	9
I.2.5 Les Séchoirs solaire mixte .....	10
I.2.6 les Séchoirs solaires hybride .....	10
<b>I.3 Caractérisation des solides humides .....</b>	<b>11</b>
I.3.1 Teneur en eau :.....	12
I.3.2 Activité de l'eau dans un produit .....	12
<b>I.4 Revue bibliographique .....</b>	<b>14</b>

## **II.chapitre2**

<b>II.1 STOCKAGE THERMIQUE.....</b>	<b>24</b>
II.1.1 Aperçu sur le stockage thermique.....	24
II.1.2 Aperçu sur le stockage thermique.....	25
II.1.3 Utilité du stockage thermique .....	26

II.1.4 Différents type de stockage thermique .....	26
A. Stockage sensible .....	26
B. Stockage par chaleur latente.....	28
C. Stockage thermochimique .....	29
<b>II.2 MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE .....</b>	<b>30</b>
II.2.1 Définition .....	30
II.2.2 Principe de fonctionnement du PCM.....	31
II.2.3 Critère de sélection d'un bon MCP.....	32
II.2.4 Propriétés d'un MCP : .....	32
II.2.5 Classifications des MCP .....	32
□ Les composés organiques : .....	33
A. Paraffines.....	34
B. Acides gras .....	34
C. Alcools de sucre .....	35
□ Les composés inorganiques.....	36
A. Hydrates de sels.....	36
B. Métaux.....	37
C. Les eutectiques .....	37
D. PCM commerciaux.....	37
II.2.6 Applications des MCP .....	39
A / Le transport de produits alimentaires : .....	39
B / Le stockage de l'énergie thermique : .....	39

### **III.chapitre3**

<b>III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER .....</b>	<b>40</b>
□ Capteur solaire à air sans chicanes .....	40
□ Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins) .....	41
□ L'armoire de séchage .....	42
III. 1.2.1 Mesure des températures .....	43
III.1.2.2 Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de air ambiant .....	44
III.1.2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage.....	45



III.1.2.3 Acquisition et traitement des données .....	45
<b>III.2 MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER .....</b>	<b>46</b>
<b>III.3 MATERIEL VEGETAL.....</b>	<b>48</b>
<b>III.4 Détermination de la teneur en eau initiale .....</b>	<b>52</b>
<b>III.5 Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel (<math>\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math> et <math>\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}</math>) à bas de (<math>\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math>) .....</b>	<b>52</b>
<b>III.6 Modélisation des cinétiques de séchage .....</b>	<b>54</b>
<b>III.7 Détermination de la diffusivité effective de l'eau .....</b>	<b>56</b>
<b>III.8 Efficacité thermique du l'insolateur plan à air.....</b>	<b>60</b>

## **VI.chapitre4**

<b>RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.1 Performances thermiques du prototype de séchoir solaire indirect sans produits .....</b>	<b>61</b>
□ Pour l'unité de chauffage du prototype (insolateur plan à air) .....	61
□ Pour les deux armoires de séchage (Frigos) de prototype .....	68
<b>IV.2. Séchage du carotte et du menthe dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect .....</b>	<b>71</b>
Cas 1 : cinétique de séchage de la carotte le 19 Février 2020 .....	71
Cas 2 : cinétique de séchage de la menthe le 03 Mars 2020.....	74
<b>IV.3 la Vitesse de séchage .....</b>	<b>76</b>
<b>IV.4 Performance thermique des deux prototypes de séchoir solaire indirect .....</b>	<b>78</b>
<b>IV.5. Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince .....</b>	<b>80</b>
<b>IV.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la carotte et la menthe ..</b>	<b>84</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>88</b>

*Liste des Figures :*

FigI.1 séchoir naturel.....	6
FigI.2 schémas d'un séchoir solaire direct à convection naturelle.....	7
FigI.3 schémas d'un séchoir solaire direct à convection forcée.....	8
FigI.4 Schéma d'un séchoir solaire indirect.....	9
FigI.5 Schéma d'un séchoir solaire tunnel.....	9
FigI.6 Séchoir solaire mixte.....	10
FigI.7 Séchoir solaire hybride.....	11
FigI.8 Caractérisation d'un solide humide.....	11
FigI.9 Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Labuza, 1968) .....	13
FigI.10 séchoir solaire à convection naturelle Pangavhane, Sawhney et Sarsavadia (2002).....	14
FigI.11 séchoir solaire à convection naturel de type indirect. El-Sebaii et al. (2002).....	14
FigI.12 systèmes de chauffage de l'air passif à énergie solaire pour le séchage. Enibe (2002).....	15
FigI.13 séchoir cylindrique à colonne rotative nouvellement développé. Sarsilmaz, Yildiz et Pehlivi (2000).....	15
FigI.14 séchoirs à convection avec recirculation d'air pour étudier l'effet du débit d'air. Sarsavadia (2007).....	16
FigI.15 incorporer un CaCl <sub>2</sub> à base de lit déshydratant solide régénératif dans le séchoir pour séchage des pois verts. V. Shanmugam et al. 2006.....	17
FigI.16 miroir réfléchissant pour améliorer la régénération du dessiccant et testée pour sécher le petit pois et ananas.....	17
FigI.17 séchoir solaire à convection forcée indirecte. Mohamed et al. (2008).....	18
FigI.18 un système de stockage thermique à base de matériaux de changement de phase, pour chauffer l'air utilisé dans un séchoir R. Velraj et al. 2013.....	19
FigI.19 séchoir solaire à convection forcée indirecte à la menthe sèche et au thymus S.M. Shalaby et al.2013.....	19
FigI.20 un type de séchoir solaire, utilisant PCM comme matériau de stockage de chaleur S.M. Shalaby et al. 2014.....	20
Fig.I21 PCM packed bed solar dryer. Dilip Jain et al. 2015.....	21
FigI.22 Location of various sensors inside Solar Dryer. Sari Farah Dina et al. 2015.....	22
FigI.23 séchage solaire intégrale avec PCM. Vikasshringi et al. 2014 .....	23
FigI.24 capteur solaire avec deux lits d'encapsulé capsules sphériques de PCM.Salwa Bouadila, Amenallah, Guizani2017.....	23
FigI.25 séchage solaire intégrale avec PCM. Vikas shringi et al. 2014.....	23

FigII.1 Différents modes de stockage thermique en fonction de leurs températures'applications et de la quantité d'énergie stockée.....	25
FigII.2 Différents types de stockage de chaleur [Bal et al., 2010].....	26
FigII.3 Diagramme de changement d'état d'un matériau .....	28
FigII.4 Liquéfaction et solidification du MCP.....	31
FigII.5 principes de fonctionnement de PCM.....	32
FigII.6 classification détaillée sur les substances utilisées .....	34
FigII.7 Enthalpie de fusion en fonction de la température de fusion pour divers MCP.....	34
FigIII.1 Dessine Technique des composants du prototype *S*.....	40
FigIII.2 capteur solaire sans chicanes .....	41
FigIII.3 capteur solaire avec chicanes.....	41
Figure III.4 le prototype utilise pour le séchage de la carotte et la menthe.....	042
FigIII.5 Photographie d'une armoire (frigo) de séchage avec 3 calais (panier) .....	42
FigIII.6 Dessine Technique de prototype *S*.....	43
FigIII.7 Dessine Technique de prototype avec d'acquisition des données.....	43
FigIII.8 la position des thermocouples dans l'armoire (Frigo) (avec et sans chicanes).....	44
FigIII.9 la position des thermocouples dans capteur solaire (avec et sans chicanes).....	44
FigIII.10 Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, vitesse et d'humidité relative .....	45
FigIII.11 Photographie du séchoir solaire équipé avec la centrale de mesure .....	46
FigIII.12 Photographies de la Dessiccateur utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale .....	46
FigIII.13 Photographies du l'Etuve utiliser pour chauffer .....	47
FigIII.14 Balance analytique.....	47
FigIII.15 Agitateur Magnétique Chauffant .....	48
FigIII.16 Becher est utilisé en laboratoire.....	48
FigIII.17 la carotte (Daucus carotta) .....	49
FigIII.18 la menthe.....	49
FigIII.19 quantités de carotte produit à séchée dans l'armoire .....	50
FigIII.20 Schéma représentant le protocole de séchage de la carotte .....	51
FigIII.21 Schéma représentant le protocole de séchage de la Menthe .....	52
FigIII.22 pesé de chlorure de Calcium d'hydrate 300g.....	54
FigIII.23 pesé de l'eau 72g .....	54
FigIII.24 mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau et évaluation de dégagement de chaleur.....	54
FigIII.25 le produit prépare Cacl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O contenue dans les cannettes.....	55

FigVI.1 évolutions de température sortie du capteur et clairement solaire global 17-18/02/2020 en fonction du temps.....	63
FigVI.2 évolutions de température sortie du capteur et clairement solaire global 01-06/03/2020 en fonction du temps.....	63
FigVI.3 évolutions de température sortie du capteur et clairement solaire global 10-15/03/2020 en fonction du temps.....	65
FigVI.4 évolutions de température sortie du capteur et clairement solaire global 03-05/05/2020 en fonction du temps.....	66
FigVI.5 évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire 17-18/02/2020 en fonction du temps.....	67
FigVI.6 évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire ..... 0 -06/03/2020 en fonction du temps .....	68
FigVI.7 évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire 10-15/03/2020 en fonction du temps.....	69
FigIV.8 évolutions de la teneur en eau base sèche de la carotte en fonction du temps pour Panier1 .....	70
FigIII.9 Photographies d'échantillons de la carotte après le séchage (B) séchoir indirect avec chicanes et (A) sans chicanes.....	71
FigIV.10 évolutions de la teneur en eau base sèche de la carotte en fonction du temps pour les trois Panier .....	72
FigIV.11 évolutions de la teneur en eau base sèche de la Menthe en fonction du temps .....	73
FigIII.12 Photographies d'échantillons de la menthe après le séchage (A) séchoir indirect avec chicanes et (B) L'air libre .....	74
FigIV.13 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la carotte pour les deux séchoirs .....	75
FigIV.14 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la carotte a différent Panier (clais).....	76
FigIV.15 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la Menthe.....	77
FigIV.16 Variation du rendement thermique de séchoir avec et sans chicanes avec l'intensité solaire et Température Ambiante en fonction du temps 17/02/2020.....	78
FigIV.17 Variation du rendement thermique de séchoir avec et sans chicanes avec l'intensité solaire et Température Ambiante en fonction du temps 18/02/2020.....	79
FigVI.18 Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de la carotte et la menthe.....	85

**Liste des tableaux :**

Chapitre I .....	13
Chapitre II .....	24
TableauII.1 Matériaux utilisés dans le stockage sensible (Khadiran, Hussein et al. 2016).....	27
TableauII.2 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil 2010).....	29
TableauII.3 les avantages et les inconvénients des types de changement de phase. ....	31
TableauII.4 .....	33
TableauII.5 Melting Point and Latent Heat of Fusion of Paraffins.....	34
TableauII.6 Melting Point and Latent Heat of Fusion of Acides gras. ....	35
TableauII.7 Melting Point and Latent Heat of Fusion of Alcools de sucre.....	36
TableauII.8 différent PCM pour Métaux .....	37
TableauII.9 différent PCM pour Les eutectiques .....	38
TableauII.10 différent PCM commerciaux .....	38
chapitreIII:.....	40
TableauIII.1 Températures des fusions des Matériaux obtenus $\text{CaCl}_2$ , 4 $\text{H}_2\text{O}$ et $\text{CaCl}_2$ ,6 $\text{H}_2\text{O}$ .....	53
TableauIII.2 Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces .....	55
Chapitre VI .....	61
Tableau IV.1 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la carotte.....	81
Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la Menthe.....	82
Tableau VI.3. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la carotte en couche mince.....	86
Tableau VI.4. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la menthe en couche mince.....	87

## NOMENCLATURE

<b><math>A_c</math></b>	<b>: surface de captation de l'insolateur plan à air</b>	<b><math>m^2</math></b>
<b><math>A_w</math></b>	<b>: activité en eau</b>	<b>-</b>
<b><math>Cp_b</math></b>	<b>: Chaleur massique du bois, <math>Cp_b = 2300</math></b>	<b><math>J/kg.K</math></b>
<b><math>Cp</math></b>	<b>: Chaleur massique de l'air libre, <math>Cp = 1005</math></b>	<b><math>J/kg.K</math></b>
<b><math>M</math></b>	<b>: Teneur en eau (base sèche)</b>	<b>kg eau/kg MS</b>
<b><math>Mh</math></b>	<b>: Teneur en eau (base humide)</b>	<b>kg eau/kg Mh</b>
<b><math>Pvp</math></b>	<b>: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air</b>	<b>(Pa)</b>
<b><math>Pvs</math></b>	<b>: pression partielle de vapeur saturante</b>	<b>(Pa)</b>
<b><math>H</math></b>	<b>: enthalpies du matériau</b>	<b>J</b>
<b><math>D_{eff}</math></b>	<b>: la diffusivité effective</b>	<b><math>m^2/s</math></b>
<b>HR =MR</b>	<b>: humidité relative de l'air</b>	<b>(%)</b>
<b>m(itaile)</b>	<b>: masse de l'échantillon avant mise à l'étuve</b>	<b>g</b>
<b>m(finale)</b>	<b>: masse de l'échantillon après mise à l'étuve</b>	<b>g</b>
<b><math>Q_u</math></b>	<b>: l'énergie utile emportée par le fluide caloporteur</b>	<b>W</b>
<b><math>\eta</math></b>	<b>: rendement thermique de l'insolateur</b>	<b>%</b>
<b><math>W</math></b>	<b>: tenure en humidité absolue de l'air</b>	<b>kg vap a/kg as</b>
<b><math>W</math></b>	<b>: humidité absolue du produit à l'instant t à base humide</b>	<b>kg eau/kg Mh</b>
<b><math>Mt</math></b>	<b>: humidité absolue du produit à l'instant t à base sèche</b>	<b>kg eau/kg MS</b>
<b><math>Me</math></b>	<b>: humidité absolue du produit initiale à base sèche</b>	<b>kg eau/kg MS</b>
<b><math>MR_{eq}</math></b>	<b>: humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche</b>	<b>kg eau/kg MS</b>
<b><math>TE</math></b>	<b>: Température d'entrée au capteur</b>	<b>(K)</b>
<b><math>TS</math></b>	<b>: Température de sortie du capteur</b>	<b>(K)</b>
<b><math>I</math></b>	<b>: Puissance solaire incidente</b>	<b>(W/m<sup>2</sup>)</b>
<b><math>E</math></b>	<b>: coefficient de transmissivité pour le vitrage.</b>	<b>(E = 87%)</b>
<b><math>\Delta T</math></b>	<b>: la variation de température</b>	<b>K</b>
<b><math>X</math></b>	<b>: Humidité Absolue de L'air</b>	<b>kg eau /kg air sec</b>
<b><math>pv</math></b>	<b>: Pression partielle de vapeur d'eau</b>	<b>[Pa]</b>
<b><math>P</math></b>	<b>: Pression totale de l'air humide, <math>P_{atm}=10130</math></b>	<b>[Pa]</b>

### Lettre grecques

$MR_{pré}$  : la teneur en eau issue de prédite

$MR_{exp}$  : la teneur en eau issue de l'expérience

$RMSE$  : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

$\chi^2$  : khicarré réduit

$R^2$  : coefficient de corrélation

$N$  : nombre d'observations

$n$  : nombre de constantes du modèle

$t$  : le temps s

$L$  : la demi d'épaisseur de la tranche

# Introduction générale

### **Introduction générale**

L'agriculture en Algérie est principalement réalisée sur une base de petits exploitants et il s'agit principalement du système traditionnel d'agriculture. Les principaux produits agricoles de la catégorie des fruits et légumes sont les raisins, les prunes, l'abricot, la tomate, l'aubergine, le poivron, la carotte, l'oignon etc. Le problème de la conservation des denrées agricoles se pose très souvent dans le secteur de l'agroalimentaire où les pertes peuvent parfois dépasser 50% de la production [Touati (2001)]. La principale raison des pertes a été attribuée à la présence de mouches des fruits et à une multitude de maladies, ainsi qu'au manque d'installations de chaîne du froid et au long temps de transit. Antwi (2007) a également suggéré qu'il y aurait une perte de produits frais pendant la période de récolte en raison d'une production excessive qui pourrait conduire à des produits invendus. Ce produit excédentaire doit être stocké pour pouvoir être utilisé plus tard. Mais il peut être dangereux de conserver ces produits pendant une longue période en raison de la forte teneur en humidité, des dommages physiques, des agents pathogènes, etc. Afin de réduire ces pertes post-récolte pour permettre aux agriculteurs d'améliorer la qualité de leurs produits, des méthodes de séchage efficaces et abordables sont nécessaires. Les séchoirs solaires fabriqués localement offrent un bon marché, c'est un moyen de réduire les pertes après récolte (Weiss et Buchinger, 2002).

Plus de 80% de la plupart des fruits c'est de l'eau. Les micro-organismes peuvent obtenir des nutriments et de l'eau pour leur croissance à partir des fruits et légumes dans lequel ils poussent. Par conséquent, les fruits et légumes doivent être séchés afin d'arrêter la multiplication des micro-organismes et de les conserver plus longtemps. Le séchage traditionnel au soleil à ciel ouvert est une méthode courante et largement utilisée pour sécher les produits agricoles, y compris les fruits, les légumes et les cultures commerciales. C'est le moyen le plus simple de sécher les aliments par exposition directe du produit au soleil. Même si le séchage au soleil est la méthode la moins chère, la qualité du produit séché est bien inférieure aux normes. Cette méthode présente certains inconvénients, notamment la contamination, les dommages causés par les oiseaux ou les insectes et un séchage lent ou intermittent. L'amélioration de la qualité des produits séchés et la réduction des pertes peuvent être obtenues par l'introduction des technologies de séchage appropriées telles que les séchoirs solaires. Cependant, la plupart des séchoirs solaires construits n'utilisent que des principes de base simples de la thermique pour le séchage. Cela rend le



## **Introduction générale**

séchoir solaire dépendant des conditions climatiques limitant son utilisation par temps nuageux et faible rayonnement solaire. En conséquence, les produits agricoles qui sont récoltés pendant la saison à faible rayonnement solaire sont toujours sujets à la détérioration.

Ces dernières années, l'utilisation de l'énergie solaire est devenue plus populaire. Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie pour le séchage solaire. L'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur agricole pour conserver les céréales, les fruits et les légumes est faisable, économique et idéale pour les agriculteurs de nombreux pays en développement (Mustayen et al., 2014). Mais pour la plupart des cultures récoltées pendant la saison à faible rayonnement solaire, la préservation en utilisant que des séchoirs solaires simple s'avère difficile. Par conséquent, un moyen supplémentaire d'amélioration des transferts thermique doit être intégré au séchoir solaire.

Le principal objectif de la recherche était d'évaluer les performances thermiques d'un prototype de séchoir solaire muni des chicanes qui peut être utilisé comme créateur de turbulence et améliorent donc le coefficient de transfert thermique.

Les objectifs spécifiques de la recherche étaient :

1. Évaluer les performances des deux prototypes de séchoir solaire en utilisant différents paramètres tels que la température, la teneur en eau du produit, le taux de séchage, la diffusivité effective et le rendement.
2. Ajuster les courbes de séchage à dix modèles mathématiques
3. Comparer les performances des deux prototypes de séchoir solaire avec et sans chicanes.

Chapitre I :  
Généralités et  
Revue  
Bibliographique

**SOMMAIRE**

<b>I.1 Le Séchage.....</b>	<b>3</b>
I.1.1 Définition : .....	3
I.1.2 Importance et intérêt de séchage.....	3
I.1.3 Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire .....	4
I.1.4 Séchage et énergie .....	4
I.1.5 Histoire du séchage solaire .....	5
<b>I.2 Les différents types des séchoirs solaires .....</b>	<b>5</b>
I.2.1 Les séchoirs naturels .....	5
I.2.2 Les séchoirs solaires directs .....	6
I.2.3 Les séchoirs solaires indirects .....	8
I.2.4 Les séchoirs solaires tunnels .....	9
I.2.5 Les Séchoirs solaire mixte .....	10
I.2.6 les Séchoirs solaires hybride .....	10
<b>I.3 Caractérisation des solides humides .....</b>	<b>11</b>
I.3.1 Teneur en eau : .....	12
I.3.2 Activité de l'eau dans un produit .....	12
<b>I.4 Revue bibliographique .....</b>	<b>14</b>

## **I.1 Le Séchage**

### **I.1.1 Définition :**

Le séchage est une technique de préservation des produits alimentaires, qui intervient dans un grand nombre de procédés de fabrication. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (Chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation. Il existe plusieurs procédés de séchage : les procédés mécaniques (presse, décantation ou centrifugation), les procédés physico-chimiques (adsorption, absorption, réfrigération et séchage par évaporation). Ce dernier consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse qui le baigne. Le changement de phase exige un apport de chaleur assez considérable. Il peut être direct (chauffage par échangeur, par effet joule, par radiations infrarouges ou par courants de haute fréquence) ou bien c'est la phase gazeuse elle-même qui assure l'apport de chaleur nécessaire (air chaud). Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert ; dont le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second s'agit d'un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires [1].

### **I.1.2 Importance et intérêt de séchage**

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau, on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures et bactéries) responsables du pourrissement. C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet [1]:

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

**I.1.3 Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire**

Une étude du climat Algérien a été effectuée par H. Rebour et A. Hauville (1954), permet de visualiser les vocations climatiques et les zones les plus favorables au séchage solaire naturelles des principaux fruits. Selon cette étude, la variabilité des conditions climatiques permet de limiter les différentes zones et leurs aptitudes au séchage de raisin [2] :

**a. Zone du littorale :**

C'est pratiquement impropre au séchage solaire du raisin en raison des faibles contrariants hybrides.

**b. Zone du tell :**

Le séchage solaire du raisin devient possible, l'humidité nocturnes et matinale est très gênante et nécessite des précautions spéciales pour soustraire les fruits à la réhydratation.

**c. Zone des steppes :**

Une région qui est propice au séchage solaire du raisin en raison des contraintes hybrides élevées.

**d. Zone saharienne :**

Le séchage solaire du raisin peut s'effectuer dans les meilleures conditions en raison des contraintes hybrides enlevées. Le séchage se poursuit même la nuit. H. Rebour et A. Hauville, (1954), ont conclu que la région de Laghouat, situé entre le Sahara et les steppes, présente les mêmes conditions que celles de Fresno (en Californie) ou se situe le plus grand centre mondial de séchage solaire des fruits.

**I.1.4 Séchage et énergie :**

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, alors lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre". Lors du séchage, l'eau libre se

comporte comme de l'eau pure et lui suffit d'environ 2250 kJ/kg pour la vaporiser. Par contre lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée" et l'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie [3].

### **I.1.5 Histoire du séchage solaire :**

Le séchage par l'exposition au soleil est l'une des plus anciennes méthodes utilisant l'énergie solaire, pour la conservation des aliments, comme les légumes, les fruits, le poisson, la viande, etc. Depuis les temps préhistoriques, l'humanité a utilisé le rayonnement solaire comme la seule source d'énergie thermique disponible pour sécher et conserver toutes les denrées alimentaires nécessaires pour l'hiver, pour sécher les briques du sol pour leurs maisons et peaux d'animaux pour le dressage.

## **I.2 Les différents types des séchoirs solaires :**

Il ya plusieurs types de séchoirs solaires développés pour servir aux divers buts de séchage des produits agro-alimentaires. On peut les classes selon la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

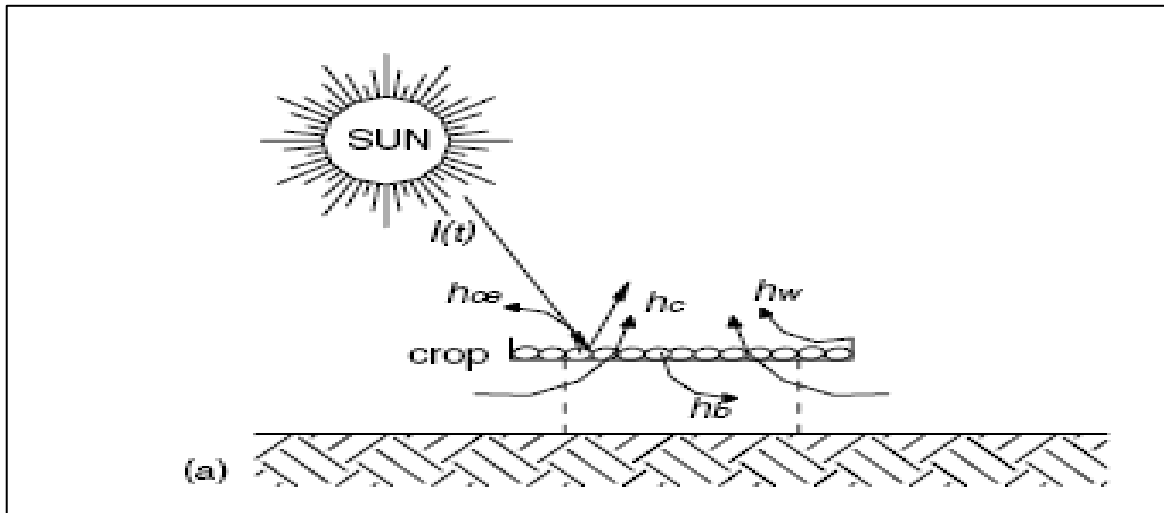
- Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produit, le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.
- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurée par une action mécanique [5].

### **I.2.1 Les séchoirs naturels :**

Les séchoirs naturels utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou même disposé directement au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (**FigI.1**).

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent 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. Ils présentent 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 (insectes, rats et poussières) [5].



**FigI.1** séchoir naturel [B. Amar]

### I.2.2 Les séchoirs solaires directs :

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée) (**FigI.2**), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur (**FigI.3**), du fait de la rusticité des modèles. Ce type de séchage présente deux avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
- Ils sont soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels.

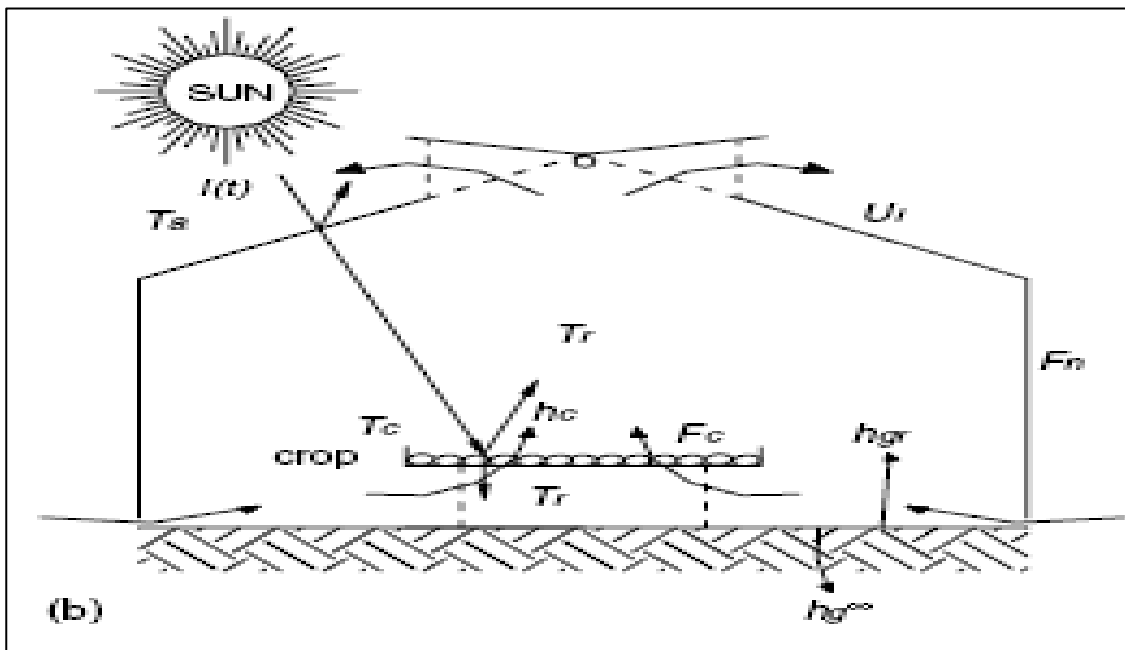
Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilité. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud humide et les Produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées.

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leur productivité est assez faible, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures, et trois à quatre jours.

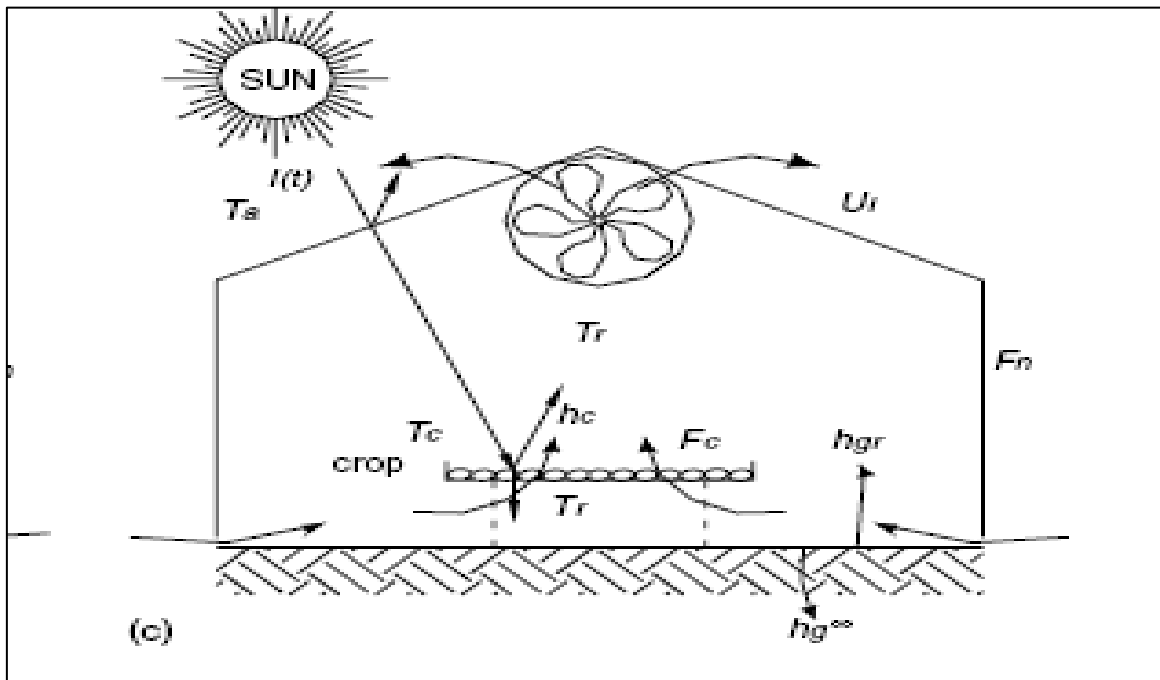
Les bottes de séchage sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale, pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leur faible volume et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle.

Les séchoirs "serres", sont une version à grande échelle des bottes de séchage ; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés [5].



**FigI.2** Schémas d'un séchoir solaire direct à convection naturelle [B. Amar]

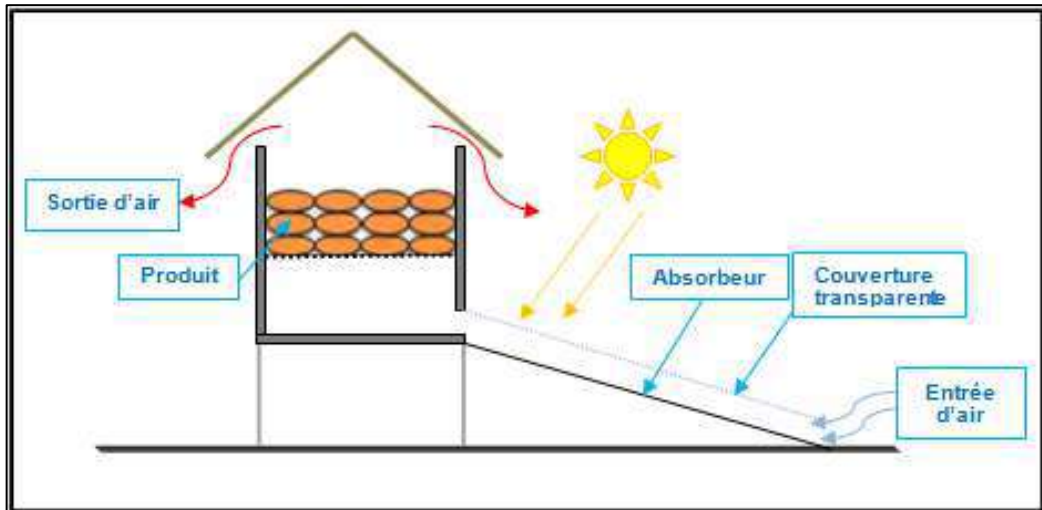




FigI.3 Schémas d'un séchoir solaire direct à convection forcée [B. Amar]

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.4). 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 [6].

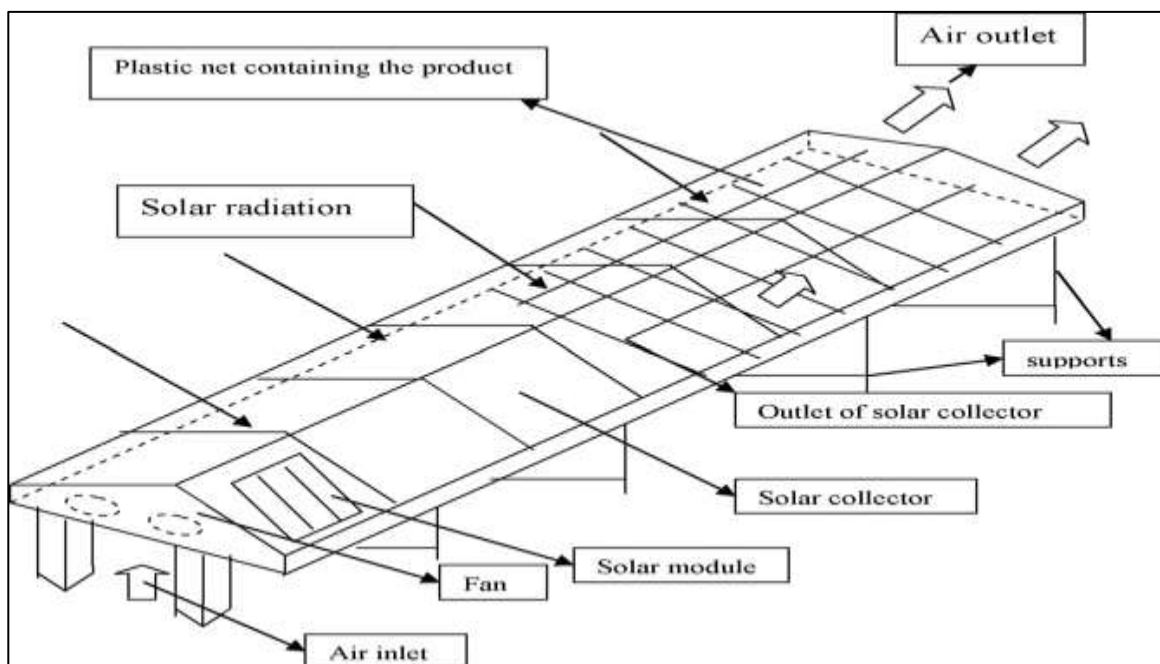
Les séchoirs solaires indirects présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive, etc.), Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.



FigI.4 Schéma d'un séchoir solaire indirect [K. Souheyla]

#### I.2.4 Les séchoirs solaires tunnels :

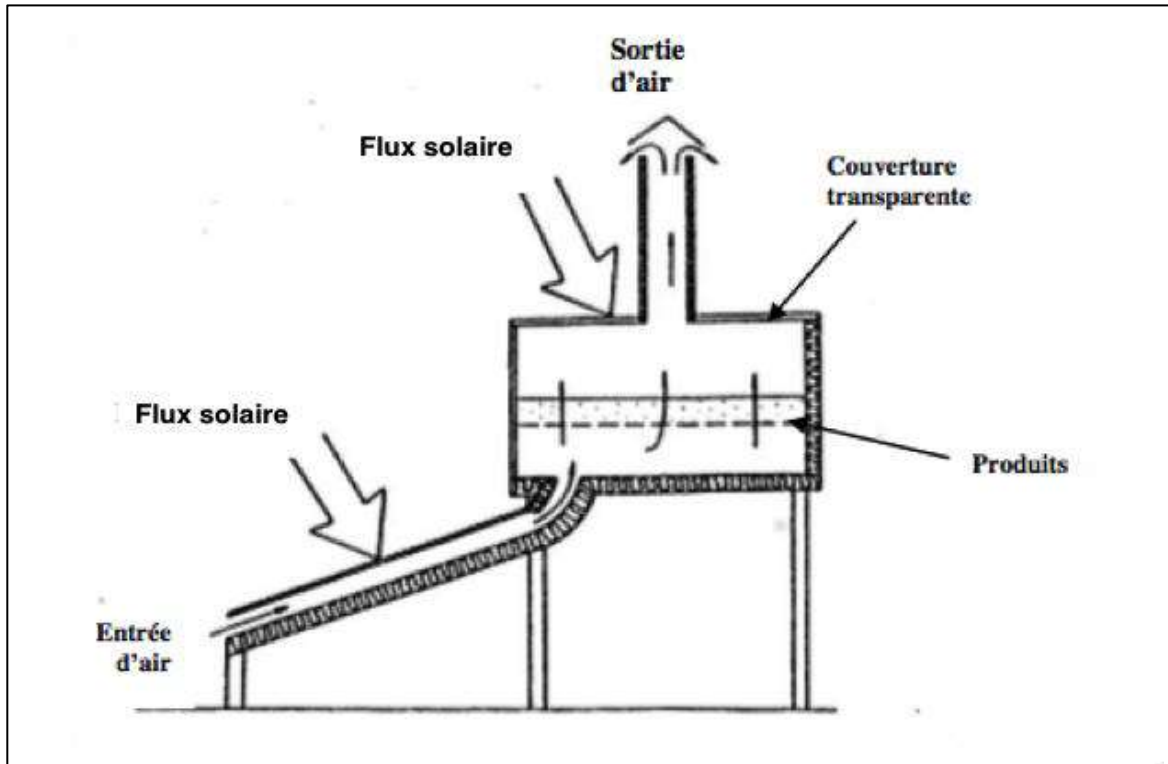
Dans un séchoir tunnel, il y a sur la longueur du séchoir, une succession d'états de température et d'humidité. Ils sont tous à ventilation mécanique, soit à l'aide d'un simple ventilateur, placé en dehors du séchoir, soit par des ventilateurs multiples placés à l'intérieur de celui-ci (FigI.5) Il existe des séchoirs tunnels, non seulement pour les industries du bois mais aussi pour le séchage de peinture, de vernis, et le séchage avant cuisson des produits céramiques (tuiles, briques, poteries culinaires, assiettes, etc..). [5]



FigI.5 Schéma d'un séchoir solaire tunnel [B. Amar]

### I.2.5 Les Séchoirs solaire mixte :

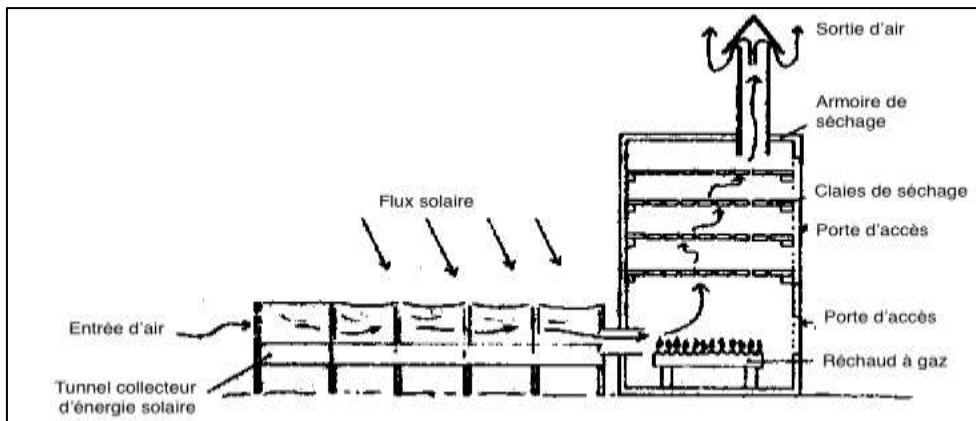
Les séchoirs solaires mixtes associent les principes des séchoirs directs et indirects. Les produits à sécher sont soumis au flux solaire et à l'air préchauffé dans un isolateur disposé au-dessous de l'armoire de séchage (**FigI.6**). Les parois supérieures de la chambre de séchage et de celle de l'isolateur sont recouvertes de vitres ou de films transparents [5].



**FigI.6** Séchoir solaire mixte [B. Amar]

### I.2.6 les Séchoirs solaires hybride :

La quantité de chaleur d'origine solaire est complétée par un apport de chaleur d'une source d'énergie d'appoint (résistance électrique, bois) pour maintenir la température de l'air asséchant à une valeur suffisante élevée pour le bon déroulement du processus de séchage. Ces séchoirs sont utilisés pour le séchage, quel que soit les conditions climatiques, d'importante quantité de produits et permettent l'obtention de produits séchés de bonne qualité (**FigI.7**) [5].



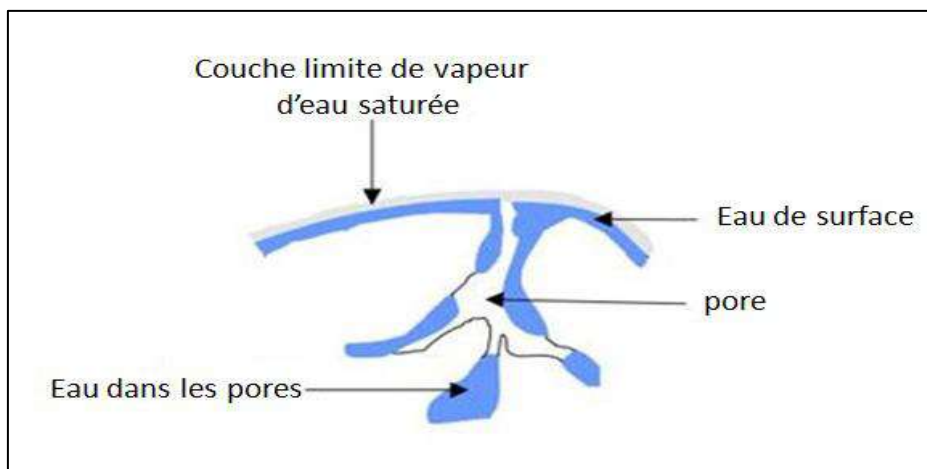
FigI.7 Séchoir solaire hybride [B. Amar]

**I.3 Caractérisation des solides humides :**

Dans les corps Capiello-poreux, l'eau se présente sous trois formes (FigI.8) :

- L'eau libre : elle est retenue à la structure du matériau par des liaisons de type Van Der Walls.
- L'eau liée : elle est adsorbée à la structure du matériau.

La vapeur d'eau : elle occupe les espaces non saturés d'eau liquide. La surface externe d'un solide humide est recouverte par un film d'eau libre qui adhère à cette surface par l'action de forces superficielles au voisinage de ce film d'eau. L'air en son Voisinage est saturé en vapeur d'eau. Cela signifie que la pression partielle de vapeur d'eau Est égale à la pression de vapeur saturante. Dans un solide humide, l'eau libre occupe les pores et les capillaires. Les forces d'adhésion de cette eau à la structure du produit et sont liées à des phénomènes complexes de capillarité dont l'intensité est d'autant plus grande que les dimensions des pores sont petites [7].



FigI.8 Caractérisation d'un solide humide [A. Orawan]

**I.3.1 Teneur en eau :**

L'évolution au cours du séchage de la teneur en eau d'un produit peut être caractérisée par sa teneur en eau exprimée en base sèche (X) ou en base humide (W).

- Teneur en eau (base sèche), elle est définie par :

$$X = \frac{me}{ms} \quad (\text{EqI. 01})$$

X est exprimée en kg d'eau/kg de matière sèche.

- Teneur en eau (base humide) :

$$W = \frac{me}{m} \quad (\text{EqI. 02})$$

Avec : W est exprimée en kg d'eau/kg de produit humide.

**I.3.2 Activité de l'eau dans un produit :**

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau  $A_w$  est identique à l'humidité relative d'équilibre ( $A_w = HRE$ ).

Elle est définie comme suit :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (\text{EqI. 03})$$

**Avec:**

- $P_{vp}$  : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
- $P_{vs}$  : pression partielle de vapeur saturante (Pa)
- HR : humidité relative de l'air (%).

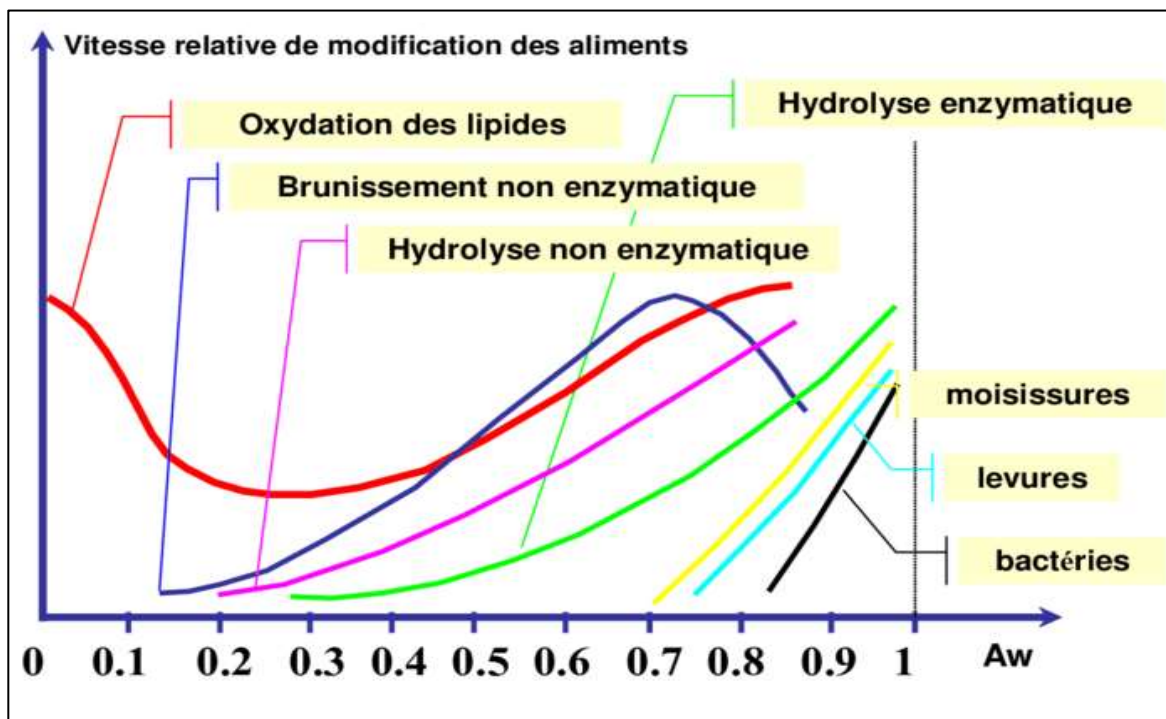
L'activité de l'eau ( $A_w$ ) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique.

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique, La **FigI.9** illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des

denrées alimentaires (M. Belahmidi, & al., 1993, J. J. Bimbenet, & al., 1984, T. P. Labuza, 1968), Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit :

- Pour  $A_w < 0,9$ , la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ;
- Pour  $A_w < 0,8$ , beaucoup d'enzymes sont inactives ;
- Pour  $A_w < 0,75$ , la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée ;
- Pour  $0,8 < A_w < 0,7$ , les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité  $A_w$  comprises entre 0,25 et 0,35 [8].

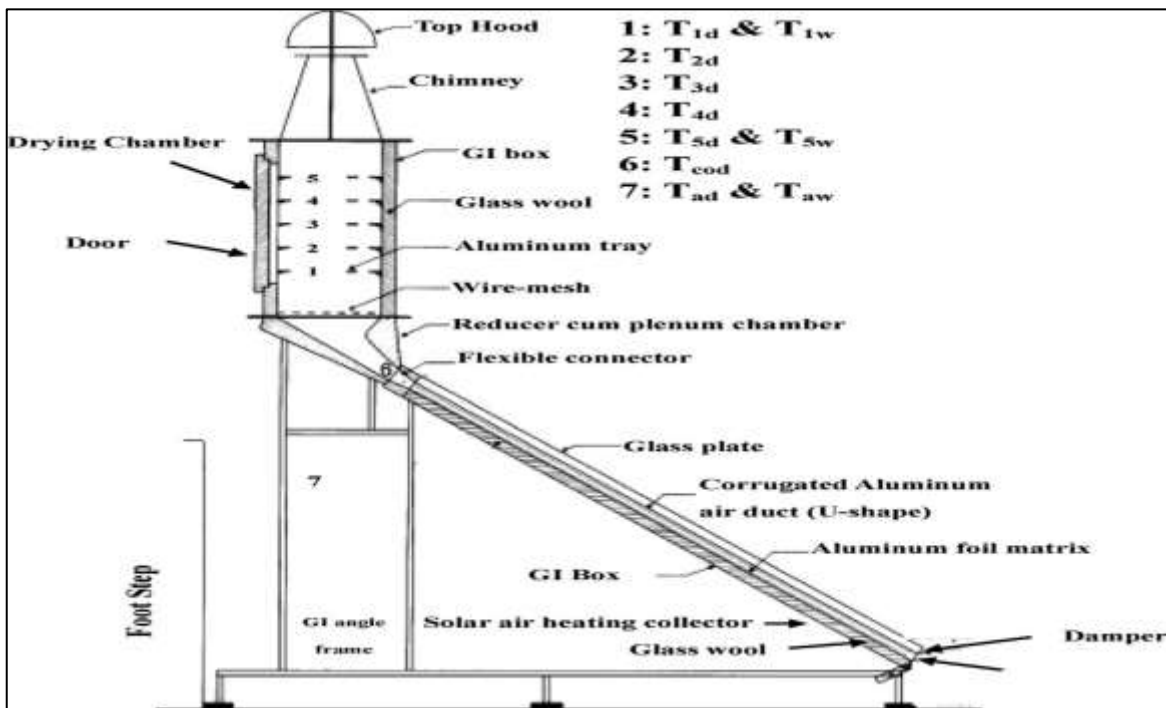


**FigI.9** Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Labuza, 1968).

**I.4 Revue bibliographique :**

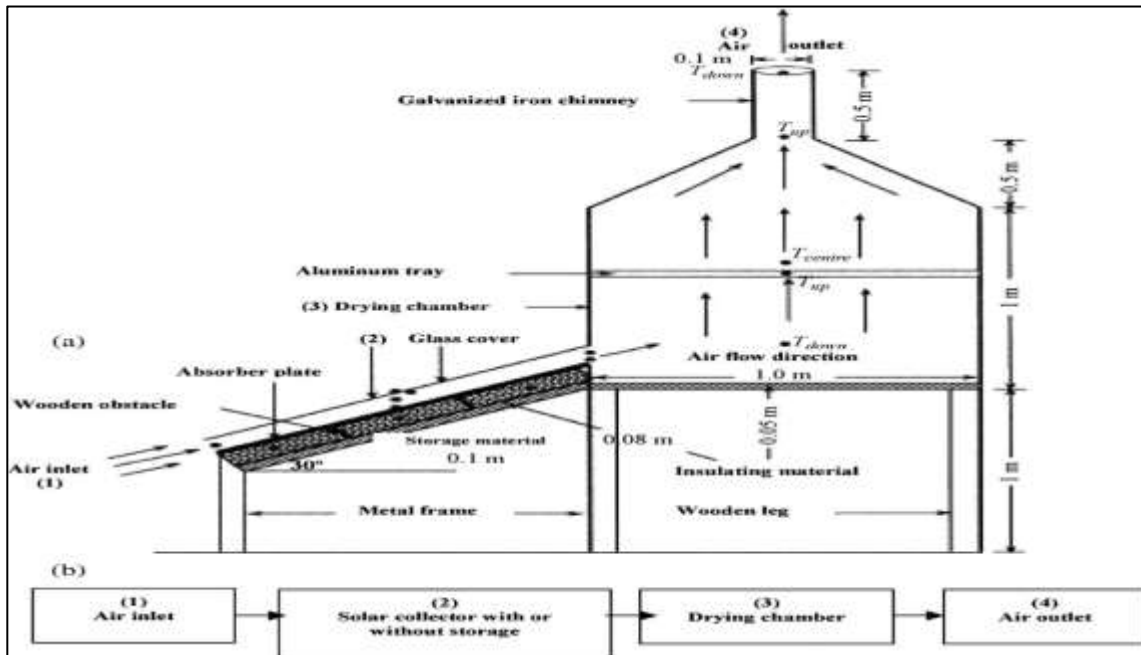
Dans cette section, nous présentons une recherche bibliographique sur les séchoirs solaires indirects avec un système de stockage thermique.

**Pangavhane, Sawhney et Sarsavadia (2002)**, ont développés un nouveau séchoir solaire à convection naturelle. Il se compose d'un aérotherme solaire et d'une chambre de séchage (**FigI.10**). Cette configuration peut être utilisé pour sécher divers produits agricoles dont les raisins étaient sélectionnés pour se sécher dans ce séchoir solaire. L'analyse a montré que le séchage traditionnel, c'est-à-dire le séchage à l'ombre et le séchage au soleil ouvert, sèche les raisins en 7 à 15 jours, tandis que ce mode de séchage ne prenait que 4 jours.



**FigI.10** Séchoir solaire à convection naturelle **Pangavhane, Sawhney et Sarsavadia (2002)**

El-Sebail et al. (2002) ont conçu, construit et étudié un séchoir solaire à convection naturel de type indirect, expérimental dans les conditions météorologiques dominantes de Tanta (FigI.11). Cette configuration consiste en un aérotherme solaire à plaque plate connecté à une armoire agissant comme une chambre de séchage. Le réchauffeur d'air est conçu pour pouvoir insérer divers matériaux de stockage sous la plaque absorbante afin d'améliorer le processus de séchage. Le sable est utilisé comme un Matériel de stockage.



FigI.11 Séchoir solaire à convection naturel de type indirect. El-Sebail et al. (2002)

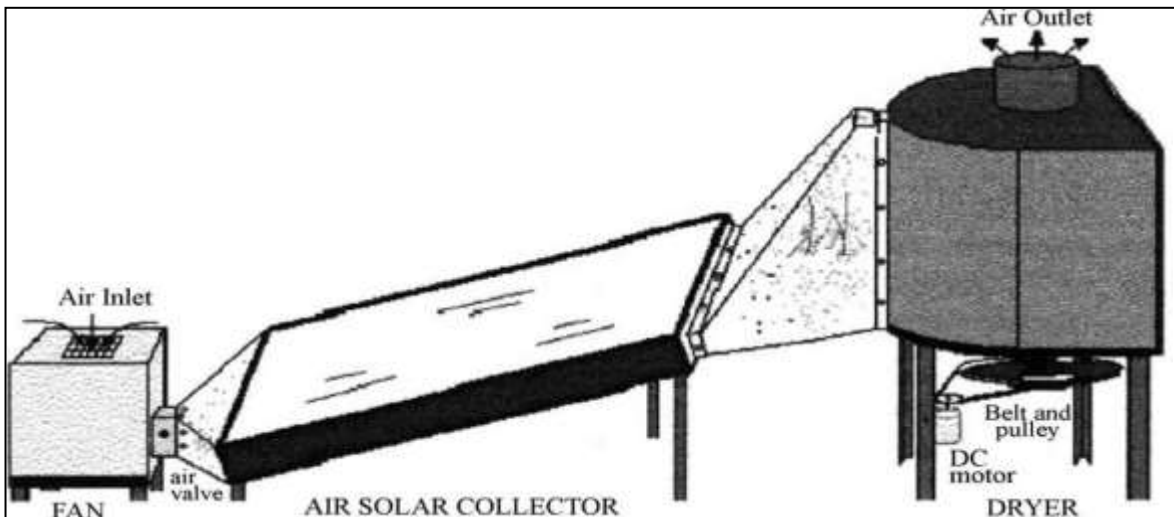
Enibe (2002) ont conçu un système de chauffage de l'air passif à énergie solaire pour le séchage des cultures et l'incubation des œufs de volaille. Il se compose d'une seule plaque solaire vitrée avec collecteur intégré à un système de stockage de chaleur à matériau de changement de phase (PCM) (FigI.12). Le PCM est construit en modules qui sont équidistants sur l'absorbeur assiette. Les espaces entre les paires de modules agissent comme des canaux de chauffage de l'air, et les chaînes sont connectées aux collecteurs communs d'entrée et de sortie d'air.





**FigI.12** Systèmes de chauffage de l'air passif à énergie solaire pour le séchage. **Enibe (2002)**

**Sarsilmaz, Yildiz et Pehliv (2000)** ont mené des expériences sur le séchage des abricots dans un séchoir cylindrique à colonne rotative nouvellement développé comme la montre (**FigI.13**). Il a été équipé d'un capteur solaire à air spécialement conçu pour réduire le temps de séchage.



**FigI.13** Séchoir cylindrique à colonne rotative nouvellement développé. **Sarsilmaz, Yildiz et Pehliv (2000)**

**Sarsavadia (2007)**, a développé un séchoir à convection avec recirculation d'air, afin d'étudier l'effet du débit d'air, de la température d'air et de la fraction d'air recyclé sur les besoins énergétiques total de séchage des tranches d'oignon (**FigI.14**). Ils ont conclu qu'en recyclant l'air évacuée, l'économie maximale d'énergie totale atteint les 70,7 %, et l'énergie requise par unité de masse de l'eau retirée a été trouvée entre 12.040 et 38.777 MJ /kg d'eau.

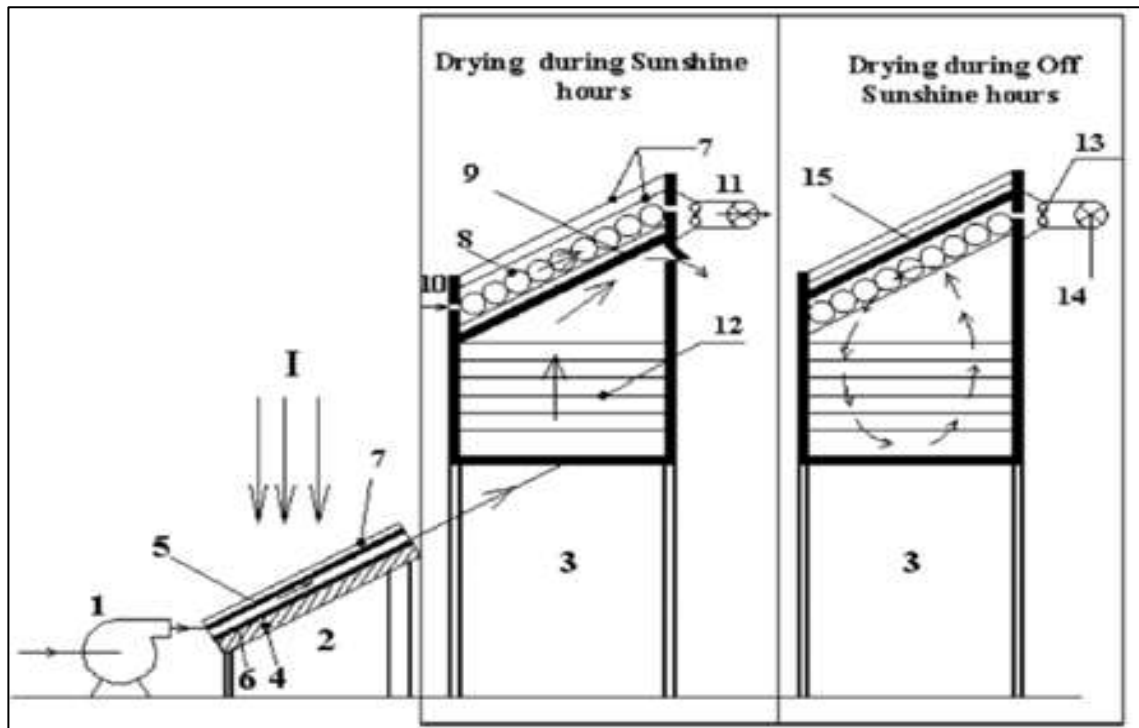


**FigI.14** Séchoirs à convection avec recirculation d'air pour étudier l'effet du débit d'air.  
**Sarsavadia (2007)**

**V. Shanmugam et al. 2006** ont incorporé  $\text{CaCl}_2$  à base de lit déshydratant solide régénératif dans le séchoir pour séchage des pois verts (**FigI.15**). Les résultats de leurs tests ont montré que l'intégration de l'unité de dessiccation avec le séchoir solaire, continue le séchage des produits en dehors d'ensoleillement et améliore la qualité du produit fini. En outre, le séchage des poids est plus uniforme dans tous les plateaux, et il permet de réaliser un séchage déshydratant.

Ils ont encore modifié la conception et incorporé un miroir réfléchissant pour améliorer la régénération du desséchant et testée pour sécher le petit pois et ananas (**FigI.16**).

Ils ont conclu qu'avec l'inclusion d'un miroir réfléchissant sur le lit déshydratant, le potentiel de séchage augmente considérablement. La température utilisée d'une élévation d'environ 10°C a été obtenue avec le miroir, qui réduit le temps de séchage de 2 heures pour les pois verts et 4 heures pour les tranches d'ananas.



**FigI.15** Incorporer un  $\text{CaCl}_2$  à base de lit déshydratant solide régénératif dans le séchoir pour séchage des pois verts (V. Shanmugam et al., 2006).



**FigI.16** Miroir réfléchissant pour améliorer la régénération du dessiccant et testée pour sécher le petit pois et ananas

**Mohamed et al. (2008)** ont étudié l'effet de la température et du débit d'air sur la cinétique de séchage de *Gelidium Sesquipedale* en séchage solaire convectif. Le processus de séchage a été effectué en utilisant un séchoir solaire à convection forcée indirecte (**FigI.17**).

Il contenait un capteur solaire d'air, un chauffage d'appoint, un ventilateur de circulation et une armoire de séchage.



**FigI.17** Séchoir solaire à convection forcée indirecte. **Mohamed et al. (2008)**

**R. Velraj et al. 2013** a développé un système de stockage thermique à base de matériaux de changement de phase, pour chauffer l'air utilisé dans un séchoir (**FigI.18**). Ils ont utilisé HS 58, un sel inorganique, et un matériau à changement de phase basé pour stocker l'excès de chaleur qui a ensuite été récupéré pendant les heures creuses. Il est observé qu'à des débits massiques élevés, l'efficacité de collecteur est également plus élevée en raison de la réduction des pertes de chaleur.

Ils ont conclu qu'en fournissant de l'air à débit massique pendant le processus de décharge la capacité maximum du système de stockage peut être utilisée et uniforme l'apport de chaleur pour une durée plus longue pendant l'arrêt les heures d'ensoleillement peuvent être atteintes.



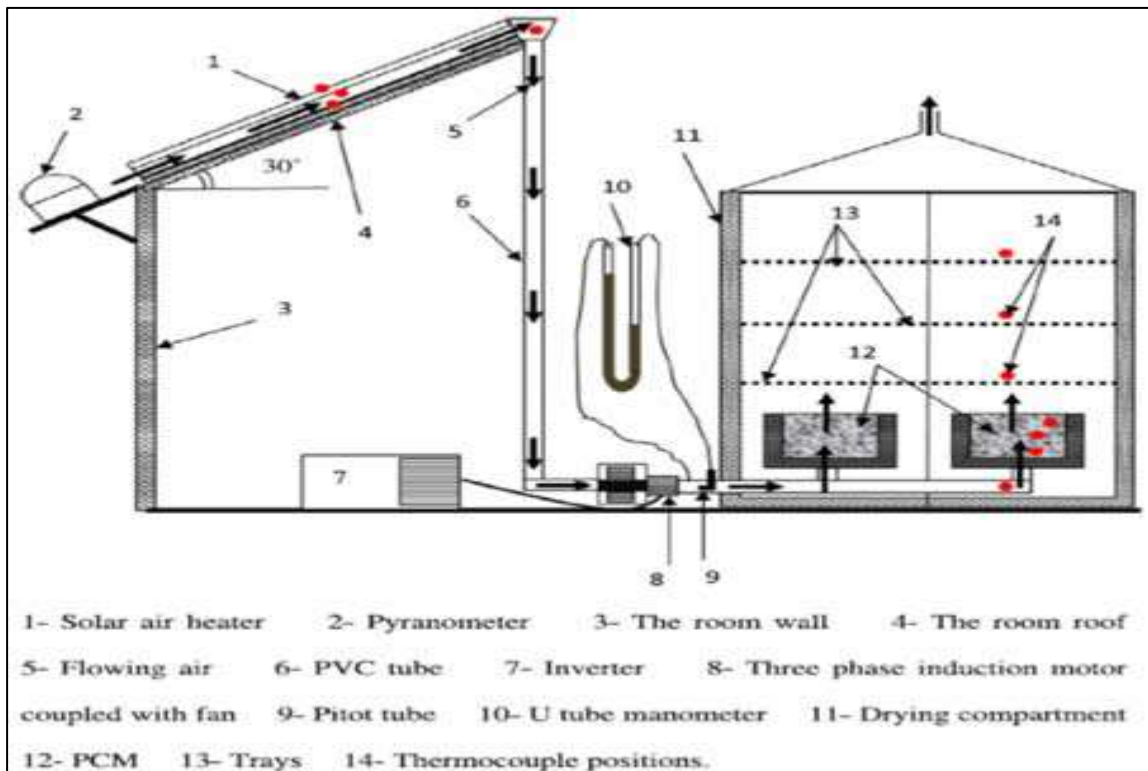
**FigI.18** Un système de stockage thermique à base de matériaux de changement de phase, pour chauffer l'air utilisé dans un séchoir (Velraj et al., 2013).

**S.M. Shalaby et al.2013** ont évalué la performance thermique d'un séchoir solaire à convection forcée indirecte à la menthe sèche et au thymus (**FigI.19**). Ils ont constaté que les temps de séchage du thymus et de la menthe dépendent de la masse du produit de séchage et de la température de l'air de séchage. Ils ont également déduit que le comportement de séchage du thymus doit être étudié plus en détail à différents débits massiques et diverses températures d'air de séchage. Enfin, ils ont observé le coût du séchage de la menthe et du thymus dans le séchoir solaire à convection forcée en mode indirect 0,025 € / kg et 0,087 € / kg, respectivement.



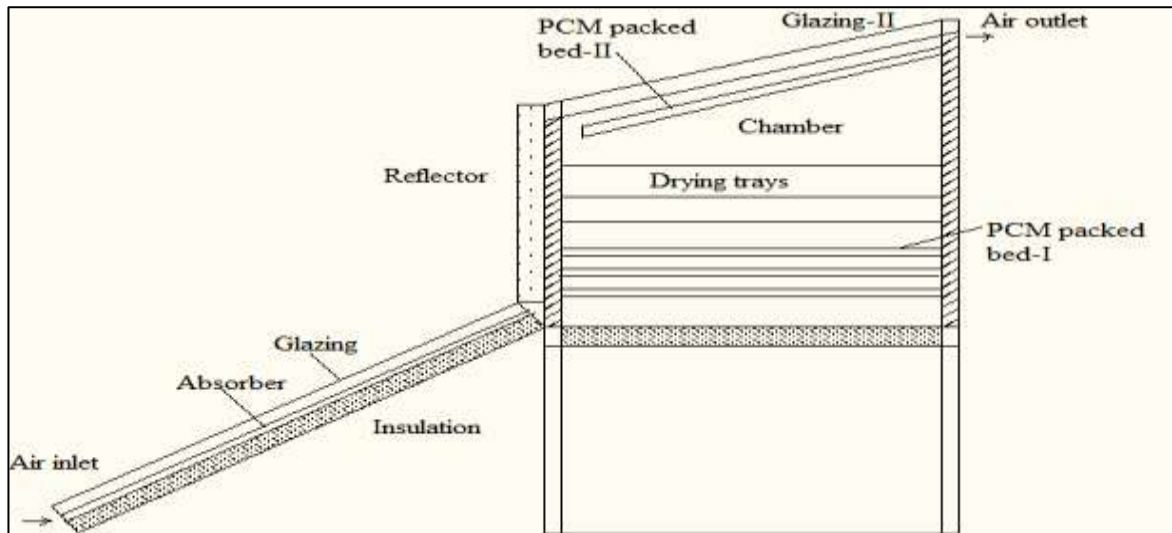
**FigI.19** Séchoir solaire à convection forcée indirecte à la menthe sèche et au thymus  
**S.M. Shalaby et al.2013**

S.M. Shalaby et al. 2014 ont développé un type de séchoir solaire, utilisant PCM comme matériau de stockage de chaleur pour séchage des plantes médicinales, *Ocimum Basilicum* et *Thevetia Neriifolia* (FigI.20). Ils ont constaté qu'après avoir utilisé le PCM, la température de l'air de séchage était supérieure à la température ambiante de 2,5 à 7,5 °C après le coucher du soleil pendant cinq heures au moins. On observe que cette nouvelle conception maintenue avec succès la température souhaitée pendant sept heures consécutives chaque jour.



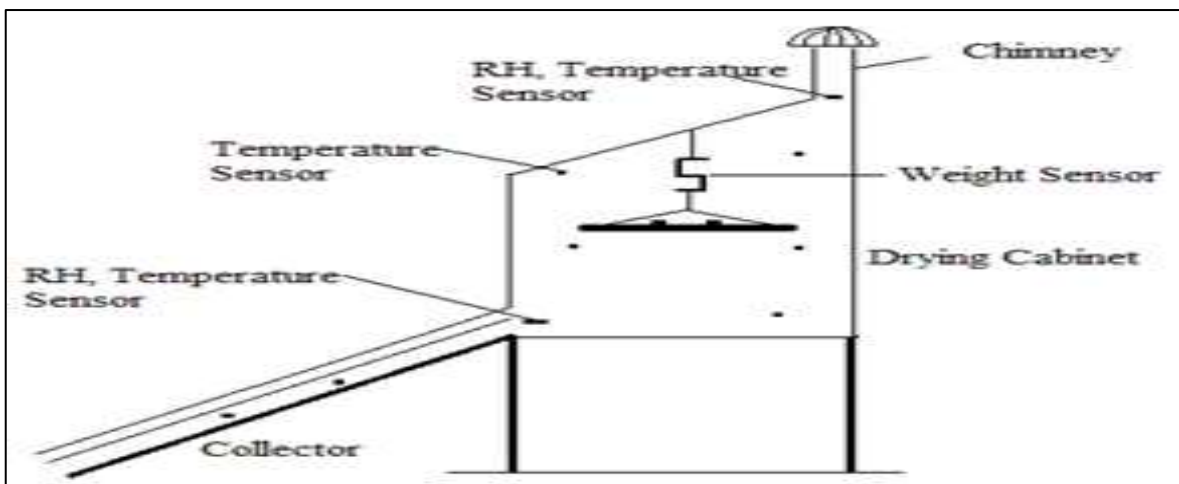
**FigI.20** Un type de séchoir solaire, utilisant PCM comme matériau de stockage de chaleur S.M. Shalaby et al. 2014

Dilip Jain et al. 2015 construit le séchage des cultures en utilisant un stockage thermique pour sécher en continu les herbes. Le PCM utilisé est sous forme de lit emballé dans le séchoir lui-même de 50 kg à l'intérieur des tubes. Celui-ci agit sur le stockage d'énergie pendant les heures d'ensoleillement et libère de l'énergie pendant les heures sombres. Puis ils ont constaté que la sécheuse fonctionnait pendant 5 à 6 heures après le coucher du soleil pour ce système particulier, avec une température de 6 °C plus élevée que la température de l'air ambiante, ainsi que l'efficacité thermique de ce système est d'environ 28,2%, et que le support de stockage d'énergie aide à maintenir 40-45 °C après le coucher du soleil.



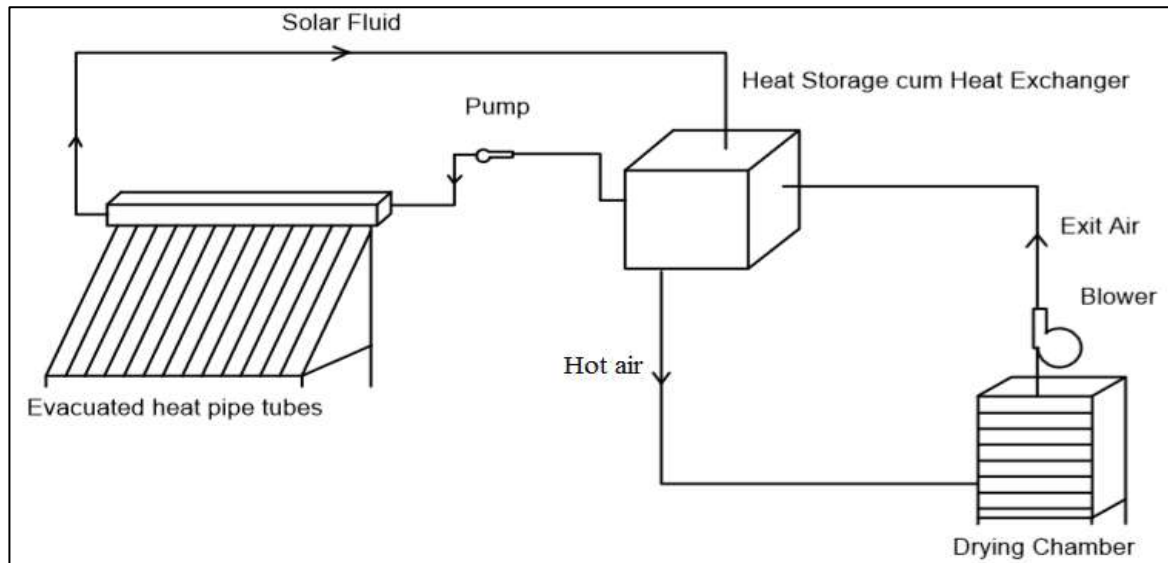
FigI.21 PCM packed bed solar dryer. Dilip Jain et al. 2015

Sari Farah, Dina et al., (2015) ont étudié les performances d'un sécheur de type continu avec dessiccant comme stockage thermique pour le séchage des fèves de cacao. Les chercheurs ont étudié deux déshydratants différents avec un tamis moléculaire Na-X Zeolith comme type adsorbant et  $\text{CaCl}_2$  comme type absorbant. Pendant les heures d'ensoleillement, ils ont obtenu une consommation d'énergie spécifique de 60,4 MJ / Kg de produit humide pour le séchage direct au soleil, 18,29 MJ / Kg pour le séchage solaire intégré au matériau adsorbant et 1,29 MJ / Kg pour l'absorbant sur la base du poids humide. À partir de cela, ils ont conclu que le séchage solaire à l'aide de dessiccant, comme stockage thermique, est efficace compte tenu du temps de séchage et de la consommation d'énergie spécifique.



FigI.22 Location of various sensors inside Solar Dryer (Sari Farah Dina et al., 2015).

**Vikas shringi et al., (2014)** ont fait l'analyse du séchage solaire avec PCM. Ils ont constaté que la température du fluide augmente avec le rayonnement solaire ont également déclaré que la variation d'humidité dans le produit dépend du temps. La réduction de l'humidité de 55,5% à 19,9% (wb) Dans les 3 première heures, et de 15,63 à 6,49% (wb) dans les 5 dernières heures. Ils ont conclu que la meilleure température pour sécher la gousse d'ail est d'environ 65 °C. Ils ont conclu que l'efficacité énergétique et exégétique pourrait s'améliorer grâce à la réduction des pertes de chaleur.



**FigI.23** Séchage solaire intégrale avec PCM (Vikas shringi et al., 2014)



CHAPITRE II : GENERALITE  
SUR  
LE STOCKAGE THERMIQUE  
ET  
LES MATERIAUX A  
CHANGEMENT DES PHASES

**SOMMAIRE**

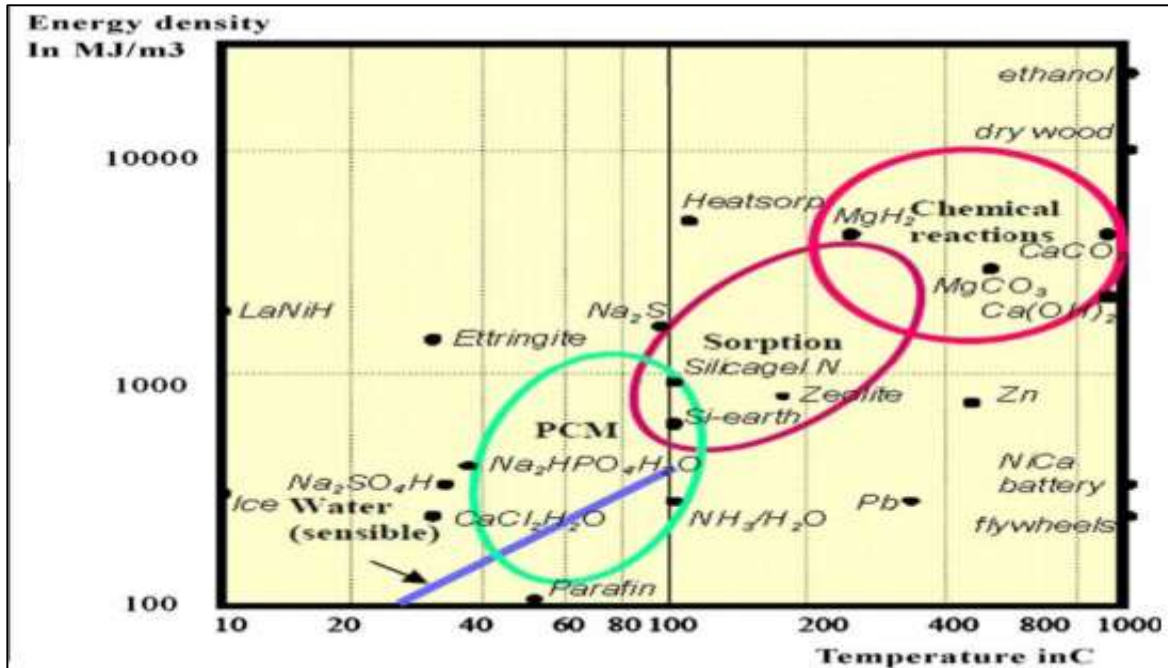
<b>II.1 STOCKAGE THERMIQUE .....</b>	<b>24</b>
II.1.1 Aperçu sur le stockage thermique .....	24
II.1.2 Aperçu sur le stockage thermique .....	25
II.1.3 Utilité du stockage thermique .....	26
II.1.4 Différents type de stockage thermique.....	26
A. Stockage sensible.....	26
B. Stockage par chaleur latente .....	28
C. Stockage thermochimique .....	30
<b>II.2 MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.....</b>	<b>30</b>
II.2.1 Définition .....	30
II.2.2 Principe de fonctionnement du PCM .....	31
II.2.3 Critère de sélection d'un bon MCP .....	32
II.2.4 Propriétés d'un MCP : .....	32
II.2.5 Classifications des MCP.....	33
□ Les composés organiques : .....	33
A. Paraffines .....	34
B. Acides gras .....	35
C. Alcools de sucre.....	35
□ Les composés inorganiques .....	36
A. Hydrates de sels .....	36
B. Métaux .....	37
C. Les eutectiques .....	37
D. PCM commerciaux .....	37
II.2.6 Applications des MCP.....	39
A / Le transport de produits alimentaires : .....	39
B / Le stockage de l'énergie thermique : .....	39
C/ Applications médicales : .....	39

## **II.1 STOCKAGE THERMIQUE**

### **II.1.1 Aperçu sur le stockage thermique**

Actuellement, le stockage thermique concerne différentes applications, comme les centrales solaires thermiques, les centrales solaires à concentration, ou encore les applications du solaire thermique basse température comme le séchage. Le stockage thermique est très présent dans les applications avec l'énergie solaire comme source de chaleur. Le stockage de la chaleur est ainsi utilisé pour palier au caractère intermittent de cette source afin de permettre une limitation des pics de consommation, mais également de tirer profit des phases de surproduction. Le monde de l'industrie est également un candidat important dans le domaine du stockage thermique, en particulier pour la valorisation d'énergie dite fatale (énergie issue de rejets industriels), pouvant être potentiellement réutilisée pour des procédés en batch ou délocalisée pour d'autres applications. En effet, il existe un gisement important de chaleur fatale dans le monde, malheureusement encore très sous-utilisé.

Il existe différentes méthodes pour le stockage de l'énergie sous forme de chaleur. On les classe généralement en différents groupes : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente, par sorption ou par réactions thermochimiques. Ces différents modes de stockage sont répertoriés en **Fig II.1** en fonction de leurs températures d'applications et de la quantité d'énergie stockée par unité de volume. On remarque que pour chaque méthode correspond une gamme de température d'application et que la densité énergétique de chaque solution est globalement linéairement liée à cette température [15].



**FigII .1** Différents modes de stockage thermique en fonction de leurs températures d’applications et de la quantité d’énergie stockée. [K. MERLIN]

**II.1.2 Aperçu sur le stockage thermique**

Le concept de stockage de chaleur est d’apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s’agit d’équilibrer la production d’énergie à la demande. Il existe de nombreuses technologies de stockage de chaleur sous diverses formes tels que l’énergie mécanique, l’énergie électrique et l’énergie thermique [Bal et al., 2010]. L’énergie thermique peut être stockée dans les liquides ou les solides [Bal et al., 2011].

Par trois modes :

- Latent.
- Sensible.
- Thermochimique.

Les systèmes de stockage de chaleur par les modes cités ci-dessus peuvent être classés en systèmes actifs ou passifs. Les systèmes actifs comportent des mécanismes de contrôle de la charge et de la décharge de chaleur. Les systèmes passifs fonctionnent sans composant mécanique. Les paramètres importants d’un système de stockage sont [Goswami et al., 1999] :

- La durée de stockage.
- La densité énergétique (ou l’énergie spécifique) .

- Les caractéristiques de charge et de décharge (stockage et récupération).

La densité énergétique conditionne la taille du système de stockage. Les différents types de stockage de chaleur sont représentés sur la figure II.2. Les types de stockage de chaleur existant se différencient selon l'application utilisée mais aussi par les réactions physico-chimiques et thermodynamiques dont ils sont le siège. [16]



**FigII.2** Différents types de stockage de chaleur [Bal et al., 2010]

### II.1.3 Utilité du stockage thermique

La nature intermittente de l'énergie solaire, qui est la principale source d'énergie dans le séchage solaire, est en effet l'un des problèmes principaux du système de séchage solaire. Le chauffage solaire fournit de l'air chaud uniquement pendant les heures d'ensoleillement. Cependant, le séchage de nombreux produits agricoles (par exemple les céréales, les légumes et les aliments) est effectué à une température modérée et continue pendant quelques jours. Il est donc indispensable d'apporter des solutions à ce problème. Ainsi, le stockage thermique devient nécessaire pour un séchage continu et fiable [17].

### II.1.4 Différents type de stockage thermique

#### A. Stockage sensible

Le stockage d'énergie peut se faire simplement en élevant ou baissant la température d'un matériau (solide, liquide, gaz), il est alors question de stockage sensible. La restitution

de l'énergie se fait lorsque le matériau est mis en contact avec un milieu de température inférieure ou supérieure. Les phases solides ou liquides sont préférées car elles possèdent une densité énergétique plus forte due à des capacités calorifiques ( $C_p$ ) et des masses volumiques ( $\rho$ ) plus élevées. Ainsi à pression constante, l'énergie accumulée par un matériau se calcule par sa variation d'enthalpie

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} mC_p(T)dT \tag{EqII.01}$$

Où  $H_2$  et  $H_1$  représentent les enthalpies du matériau aux températures  $T_2$  et  $T_1$ ,  $m$  est la masse du matériau considéré et  $C_p$  sa capacité calorifique. L'équation (1) dépend uniquement de la capacité calorifique et de la masse du matériau choisi, et donc du volume occupé par cette masse. Ainsi le choix entre différents matériaux se fait selon des critères liés à la densité et à la chaleur spécifique des matériaux dont le produit de ces deux termes donne ce qu'on appelle la densité énergétique par Kelvin. **Le Tableau II.1** représente les propriétés thermo physiques de différents matériaux utilisés dans le stockage sensible classés par densité énergétique croissante.

**TableauII.1** Matériaux utilisés dans le stockage sensible (Kehadiran, Hussein et al.2016)

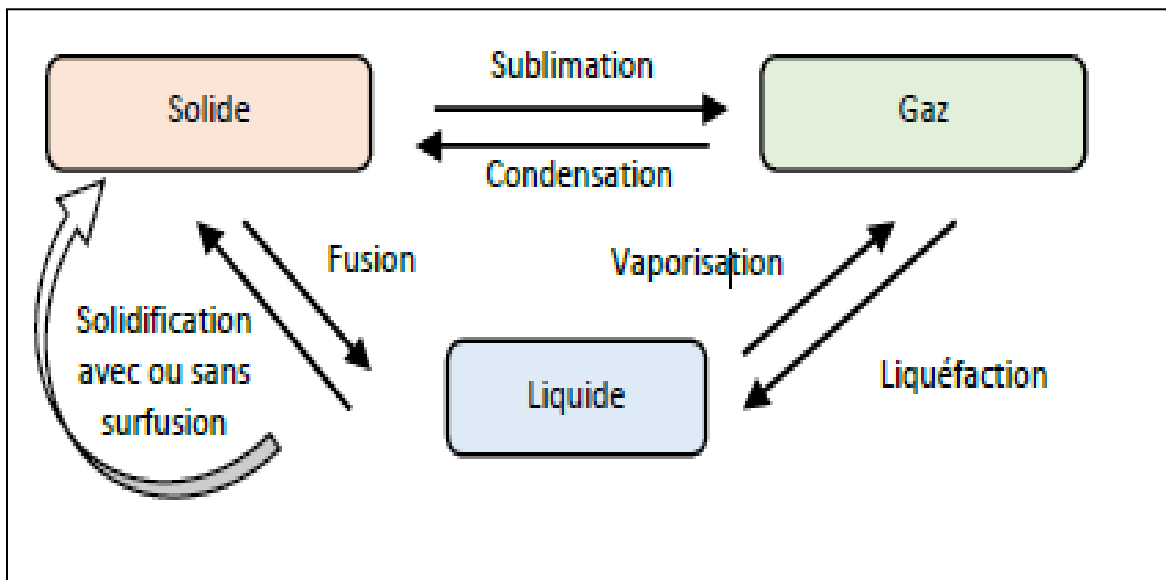
Thermal capacities of some common SES materials at 20 °C <sup>a</sup>			
Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg K)	Volumetric thermal capacity (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K)
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.51
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

Ainsi sur le **Tableau II.1** il apparaît que l'eau est un excellent candidat pour le stockage, de par sa densité et sa forte chaleur spécifique. Ce tableau montre également la nécessité pour stocker l'énergie d'un matériau qui possède à la fois une bonne densité et une bonne capacité calorifique. Par exemple le fer qui possède pourtant la densité la plus

élevée n'est qu'en 5<sup>ème</sup> position dans les choix de matériau de par sa faible capacité calorifique [18].

**B. Stockage par chaleur latente**

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. La chaleur est stockée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau appelé matériau à changement de phase (PCM). Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état. Dans la littérature, les systèmes de stockage à chaleur latente, de grande échelle et à haute température sont rares voire inexistantes. Les PCM's sont souvent des matériaux chers (**Tableau II.2**) et peu disponibles. Compte tenu de la faible quantité nécessaire pour parvenir à protéger le récepteur, le stockage latent est donc intéressant dans notre cas. Les diverses transformations existantes sont représentées sur la **FigII.3**. Chaque transformation se réalise à température constante.



**FigII.3** Diagramme de changement d'état d'un matériau

Il existe des matériaux à changement de phase de différents types et des températures de changement d'état pour toutes les applications. L'énergie mise en jeu lors d'une transformation d'état s'exprime de la façon suivante :

$$E_{\text{transformation}} (\text{à } T = T_{\text{transformation}}) = m \times \Delta h_{\text{transformation}} \quad (2)$$

Avec  $\Delta h$  l'enthalpie massique de changement d'état. La quantité d'énergie liée à la fusion/solidification d'un matériau est environ 100 fois plus importante que la capacité calorifique mise en jeu dans le stockage sensible. En d'autres termes, le changement d'état permet de s'affranchir d'une élévation de température de 100°C ou de bénéficier d'une masse 100 fois moins importante. On comprend donc tout l'intérêt des PCM's pour la protection thermique d'un récepteur solaire. **Gil et al. (Gil 2010)** dressent un tableau (**Tableau II.2**) regroupant les propriétés thermo physiques moyennes des grandes catégories de matériaux à changement de phase. Il est possible d'utiliser un métal, de la roche, de l'eau, des paraffines ou des matériaux qualifiés d'organiques (fabriqués par les êtres-vivants) ou de non organiques

**TableauII.2 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil 2010)**

Matériau	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité calorifique (J/(kg.K))	Chaleur latente (J/kg)	Masse pour stocker 1 GJ (tonnes)	Masse de stockage relative
Métal (cuivre)	8940	400	385	205 000	173 ( $\Delta T = 15K$ )	40
Roche	2240	1,5	1000	-	67 ( $\Delta T = 15K$ )	15
Eau	1000	0,6	4200	330 000	16 ( $\Delta T = 15K$ )	4
PCM organiques <sup>2</sup>	800	1	2000	190 000	5,3	1,25
Paraffine	900	0,2	2000	170 000	5	1,15
PCM inorganiques <sup>2</sup>	1600	2	2000	230 000	4,35	1

On retrouve régulièrement le facteur 100 entre le Cp et la chaleur latente (ici de fusion). En regardant la dernière colonne et sans parler de température de fusion, on remarque que les matériaux organiques, non organiques et les paraffines sont de bons candidats en termes de masse nécessaire pour stocker une même quantité d'énergie. Avant de rechercher plus précisément quel PCM nous allons utiliser pour protéger le récepteur, voyons quelle stratégie de développement aborder [19].



**C. Stockage thermochimique**

Le stockage par voie thermochimique est basé sur un phénomène physico-chimique réversible. Ce mode de stockage se base sur l'utilisation d'une chimie-sorption entre un gaz et un solide, d'une absorption ou une adsorption physique d'un gaz par un liquide ou un solide [54]. Le mécanisme du processus de stockage thermique par sorption ou par voie thermochimique peut être décrit par l'équation (2)

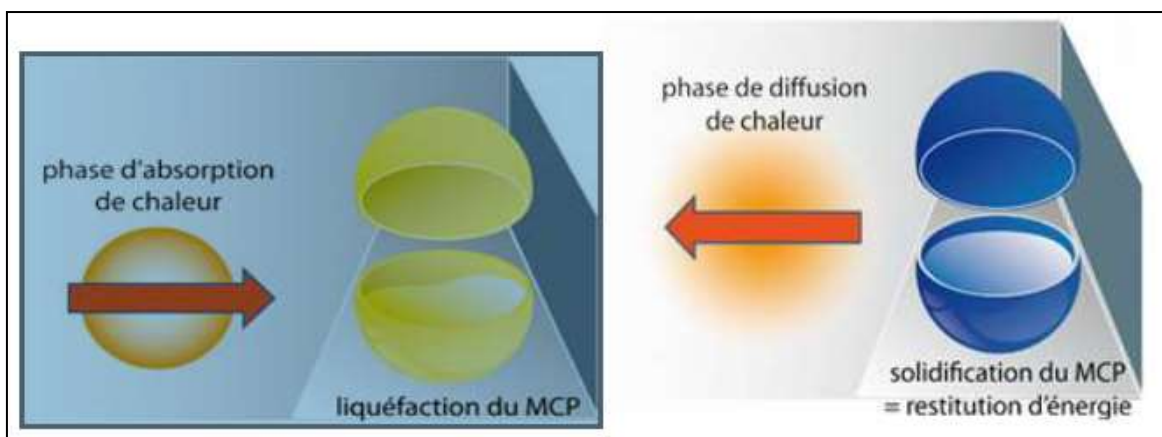


Pendant le processus, la chaleur fournie au couple de sorption AB le dissocie en absorbant la chaleur pour donner naissance à deux composés A et B qu'on peut stocker séparément : c'est le phénomène endothermique. Lorsque ces deux produits sont mis en contact, le phénomène exothermique se produit pour former à nouveau le composé AB en libérant de la chaleur [20].

**II.2 MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE**

**II.2.1 Définition**

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer l'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement située entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omni présentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...) [21].



**FigII.4** Liquéfaction et solidification du MCP [S. Blaise Ekomy, Ango]

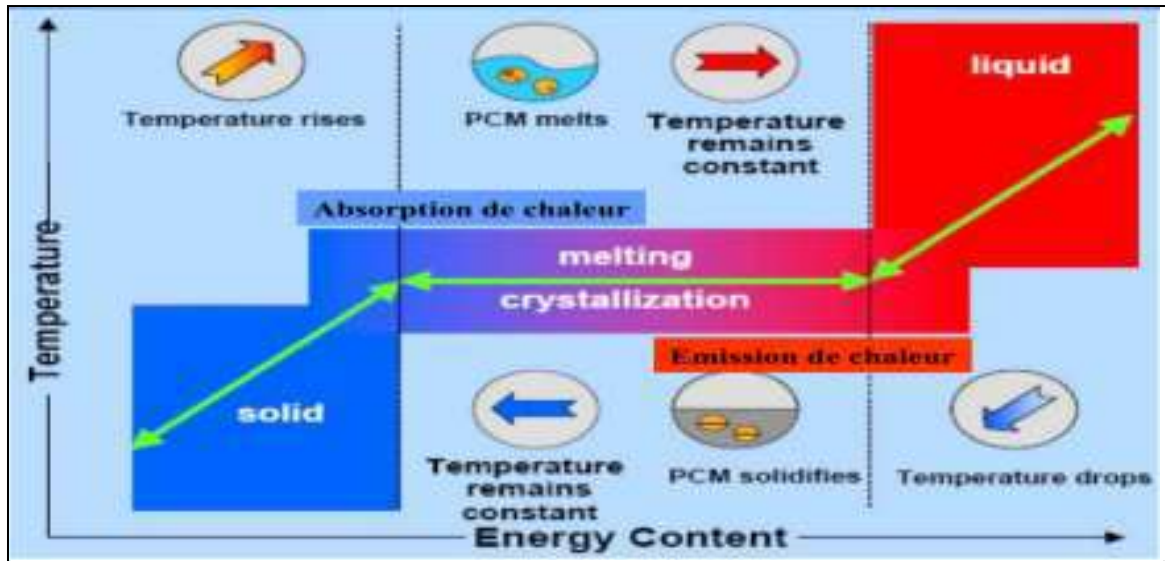
Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latent de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigées pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide liquide. Les changements solides-solides de phase sont en général très lents et ont plutôt une basse température de transformation. Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des types de changement de phase.

**Tableau II.3** Les avantages et les inconvénients des types de changement de phase. [S. Blaise Ekomy, Ango]

Changement de phase	Avantage	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume. Pas de formation de fluide.	Faible valeur de la chaleur Latente.
Solide/Liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente.
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume

**II.2.2 Principe de fonctionnement du PCM**

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, les liaisons chimiques dans le matériau va commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide a l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégager l'énergie et revenir à l'état solide [22].



FigII.5 principes de fonctionnement de PCM. [B. Meriem]

### II.2.3 Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique. Cependant, il n'existe aucune méthode privilégiée [23].

### II.2.4 Propriétés d'un MCP :

#### *Propriétés thermiques*

- ✚ Température de changement de phase appropriée
- ✚ Haute capacité thermique spécifique
- ✚ Haute chaleur latente pendant le changement de phase
- ✚ Conductivité thermique élevée en phase liquide et solide

#### *Propriétés physiques*

- ✚ Haute densité
- ✚ Effet de sous-refroidissement négligeable
- ✚ Faible pression de vapeur
- ✚ Petite variation de volume
- ✚ Taux de cristallisation suffisant

#### *Propriétés chimiques*

- ✚ Stabilité chimique prolongée
- ✚ Compatibilité avec les matériaux du conteneur

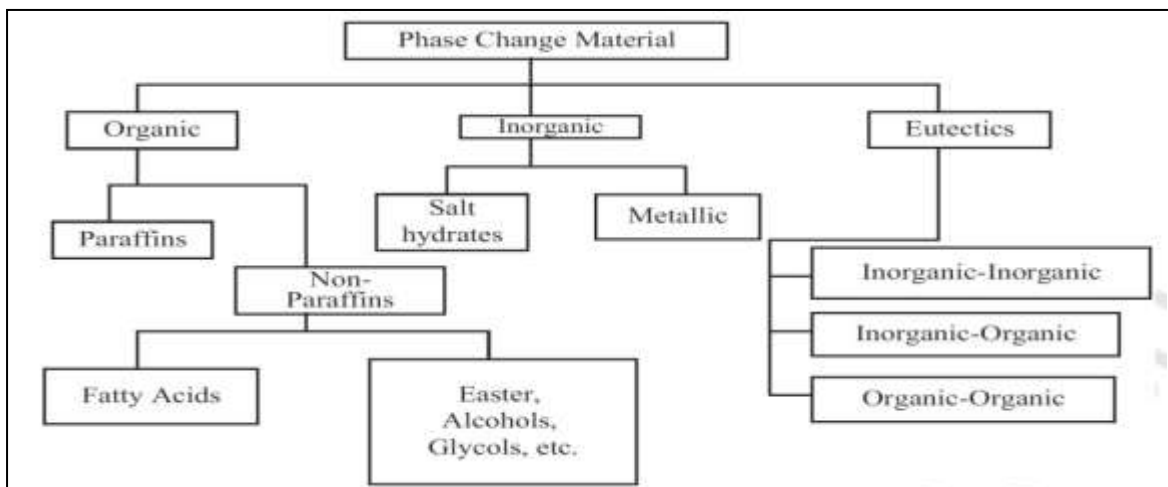
- ✚ Non toxique, non inflammable et non explosif
- ✚ Pas de séparation de phase

**Propriétés économiques**

- ✚ Abondant
- ✚ Peu coûteux

**II.2.5 Classifications des MCP**

Dans l'année 1983, Abhat a donné une classification détaillée sur les substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique. La Fig II.6 présente cette classification. Cette figure montre que les MCP solide-liquide sont principalement divisés en deux catégories : les matériaux organiques qui sont composés principalement d'acides gras et de paraffines ainsi que les matériaux inorganiques composés principalement d'hydrates de sel. Chaque groupe possède ses propres intervalles de température de fusion et de chaleur latente qui dépendent des effets moléculaires, en termes de liaison chimique. La Fig II.7 montre la gamme de l'enthalpie de fusion et la température de fusion des MCP communs [24].



**Fig.II.6** Classification détaillée sur les substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique [S. Youcef Oussama]

➤ **Les composés organiques :**

On trouve dans les composés organiques principalement les paraffines, les alcools de sucre, les acides gras et d'autres composés moins utilisés comme les cétones ou les esters [23].

TableauII.4 Point de fusion et chaleur latente de fusion les composés organiques.

[A. Soupart-Caron].

Material	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/ kg)	Material	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/ kg)
N-Tetradecane	5.5	226	N-Pentacosane	53.7	164
Formic acid	7.8	247	Myristic acid	54.0	199
N-Pentadecane	10.0	205	Oxolate	54.3	178
Acetic acid	16.7	273	Tristearin	54.5	191
N-Hexadecane	16.7	237	O-Xylene dichloride	55.0	121
Capriline	40.0	260	β Chloroacetic acid	56.0	147
Docasyle bromide	40.0	201	N-Hexacosane	56.3	255
N-Henicosane	40.5	161	Nitro naphthalene	56.7	103
Phenol	41.0	120	α Chloroacetic acid	61.2	130
N-Lauric acid	43.0	183	N-Octacosane	61.4	134
P-Joluidine	43.3	167	Palmitic acid	61.8	164
Cynamide	44.0	209	Bees wax	61.8	177
N-Docosane	44.5	157	Glyolic acid	63.0	109
N-Tricosane	47.6	130	P-Bromophenol	63.5	86
Hydrocinnamic acid	48.0	118	Azobenzene	67.1	121
Cetyl alcohol	49.3	141	Acrylic Acid	68.0	115
O-Nitroaniline	50.0	93	Dintro toluene (2,4)	70.0	111
Camphene	50.0	239	Phenylacetic acid	76.7	102
Diphenyl amine	52.9	107	Thiosinamine	77.0	140
P-Dichlorobenzene	53.1	121	Benzylamine	78.0	174

Les paraffines sont une famille d’hydrocarbures saturés de formule brute C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l’avantage d’avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variable, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application [23].

TableauII.5 Point de fusion et chaleur latente de fusion des paraffines. [A. Soupart-Caron]

Name	No. of "C" Atoms	Melting Point (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/mK)	Latent Heat (kJ/kg)
n - Dodecane	12	-12	750	0.21 <sup>S</sup>	n.a.
n - Tridecane	13	-6	756		n.a.
n - Tetradecane	14	4.5-5.6	771		231
n - Pentadecane	15	10	768	0.17	207
n - Hexadecane	16	18.2	774	0.21 <sup>S</sup>	238
n - Heptadecane	17	22	778		215
n - Octadecane	18	28.2	814 <sup>S</sup> [14], 775 <sup>L</sup> [14]	0.35 <sup>S</sup> [14], 0.149 <sup>L</sup> [14]	245
n - Nonadecane	19	31.9	912 <sup>S</sup> , 769 <sup>L</sup>	0.21 <sup>S</sup>	222
n - Eicosane	20	37			247
n - Heneicosane	21	41			215
n - Docosane	22	44			249
n - Tricosane	23	47			234
n - Tetracosane	24	51			255
n - Pentacosane	25	54			238
Paraffin wax	n.a.	32	785 <sup>S</sup> [15], 749 <sup>L</sup> [15]	0.514 <sup>S</sup> [15], 0.224 <sup>L</sup> [15]	251[15]
n - Hexacosane	26	56	770	0.21 <sup>S</sup>	257
n - Heptacosane	27	59	773		236
n - Octacosane	28	61	910 <sup>S</sup> , 765 <sup>L</sup>		255
n - Nonacosane	29	64			240
n - Triacontane	30	65			252
n - Hentriacontane	31	n.a.	930 <sup>S</sup> , 830 <sup>L</sup>		n.a.
n - Dotricontane	32	70			n.a.
n - Tritricontane	33	71			189

**B. Acides gras**

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique  $CH_3(CH_2)_nCOOH$  et ont à peu près les mêmes propriétés thermo-physiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ( $T_{fusion} = 57.5$  °C), l'acide sébacique ( $T_{fusion} = 132$  °C) [23].

**Tableau II.6** Point de fusion et chaleur latente de fusion des acides gras [A. Soupart-Caron].

Name	Melting Point (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/mK)	Latent Heat (kJ/kg)
Propyl palmitate	10	n.a.	n.a.	186
Isopropyl palmitate	11	n.a.	n.a.	100
Oleic acid	13.5–16.3	863 <sup>60C</sup>	n.a.	n.a.
Isopropyl stearate	14–19	n.a.	n.a.	140–142
Caprylic acid	16	901 <sup>30C</sup>	0.149 <sup>30C</sup>	148
	16.3	862 <sup>80C</sup> , 981 <sup>13C</sup> , 1033 <sup>10C</sup>	0.145 <sup>67.7C</sup> , 0.148 <sup>20C</sup>	149
Butyl stearate	19	n.a.	n.a.	140
				123–200
Dimethyl sabacate	21	n.a.	n.a.	120–135
Vinyl stearate	27–29	n.a.	n.a.	122
Methyl palmitate	29	n.a.	n.a.	205
Capric acid	32	878 <sup>45C</sup>	0.153 <sup>38.5C</sup>	152.7
	31.5	886 <sup>40C</sup> , 1004 <sup>24C</sup>	0.152 <sup>55.5C</sup> , 0.149 <sup>40C</sup>	153
Erucic acid	33	853 <sup>70C</sup>	n.a.	n.a.
Methyl-12-hydroxy-stearate	42–43	n.a.	n.a.	120–126
Lauric acid	42–44	862 <sup>60C</sup> , 1007 <sup>24C</sup>	n.a.	178
Elaidic acid	47	851 <sup>79C</sup>	n.a.	218
Pelargonic acid	48	n.a.	n.a.	n.a.
Myristic acid	49–51	861 <sup>55C</sup>	n.a.	205
	54	844 <sup>80C</sup>		187
Palmitic acid	64	850 <sup>65C</sup>	0.162 <sup>68.4C</sup>	185.4
	61	847 <sup>80C</sup>	0.159 <sup>80.1C</sup>	203.4
Stearic acid	69	848 <sup>70C</sup>	0.172 <sup>70C</sup>	202.5
	60–61	965 <sup>24C</sup>		186.5
Valporic acid	120	n.a.	n.a.	n.a.

**C. Alcools de sucre**

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le la citole, le maltitol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de biosourcés. Par exemple, le Mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs [23].

*TableauII.7 Point de fusion et chaleur latente de fusion des alcools de sucre. [A. Soupart-Caron].*

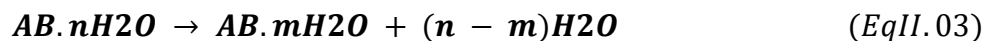
Material	Melting temperature (°C)	Melting enthalpy (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Xylitol	94	263	-	-
C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> (OH) <sub>5</sub>			-	1500 (solid, 20 °C)
D-Sorbitol	97	185	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>			-	1520 (solid, 20 °C)
Erythritol	120	340	0.326 (liquid, 140 °C), 0.733 (solid, 20 °C)	1300 (liquid, 140 °C), 1480 (solid, 20 °C)
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub>				
D-Mannitol	167	316	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>			-	1520 (solid, 20 °C)
Galactitol	188	351	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>			-	1520 (solid, 20 °C)

➤ **Les composés inorganiques**

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux.

**A. Hydrates de sels**

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est AB.nH<sub>2</sub>O. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O (T<sub>fusion</sub> = 28-30 °C). On peut citer aussi le Mn (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C [23].

**B. Métaux**

On peut citer notamment le Potassium ( $T_{\text{fusion}}= 63.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), le  $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$  ( $T_{\text{fusion}}= 138 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ou encore le Lithium ( $T_{\text{fusion}}= 186 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

*Tableau II.8 différent PCM pour Métaux. [A. Soupart-Caron]*

Name	Melting Point (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal Conductivity (W/m K)	Latent Heat (kJ/kg)	Melting Behavior <sup>a</sup> [13]
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	n.a.	n.a.	270–290	ic
$\text{LiC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	58	n.a.	n.a.	251–377	n.a.
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	58.0	n.a.	n.a.	178	n.a.
$\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$	58	n.a.	n.a.	272	n.a.
$\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	59	n.a.	n.a.	98	n.a.
$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$	59.5	n.a.	n.a.	107	n.a.
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	60	n.a.	n.a.	125	n.a.
$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	61	n.a.	n.a.	181	ic
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	64	n.a.	n.a.	200	n.a.
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	65	n.a.	n.a.	168	n.a.
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	68	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	69	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{LiCH}_2\text{COO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	70	n.a.	n.a.	150–251	c
$\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	70	n.a.	n.a.	186–230	ic
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	72	n.a.	n.a.	155–176	ic
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	1937 <sup>84C</sup> , 2070 <sup>24C</sup> , 2180	0.653 <sup>85.7C</sup> , 0.678 <sup>98.2C</sup> , 1.255 <sup>23C</sup>	265–280	c
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	88	n.a.	n.a.	218	ic
$\text{Sr}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	89	n.a.	n.a.	370	ic
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	89–90	1550 <sup>94C</sup> , 1636 <sup>25C</sup>	0.490 <sup>95C</sup> , 0.502 <sup>110C</sup> , 0.611 <sup>37C</sup> , 0.669 <sup>55.6C</sup>	162–167	c
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	91	n.a.	n.a.	184	n.a.
$(\text{NH}_4)_2\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	95	n.a.	n.a.	269	n.a.
$\text{Na}_2\text{S} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	97.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	99	n.a.	n.a.	212	ic
$\text{CaBr}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	110	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	112	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	115–117	1450 <sup>120C</sup>	0.570 <sup>120C</sup>	165–169	n.a.

**C. Les eutectiques**

Les MCPs eutectiques sont composés de plusieurs MCPs purs, en générale, de mélanges de MCPs organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, Inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages : leur point de fusion sont similaires à celui d’une substance pure et leurs chaleurs latentes de fusion sont supérieures à celle des composés organiques purs [16].

**D. PCM commerciaux**

De nombreuses entreprises’ (Climator, Cristopia, EPS Ltd., Mitsubishi Chemical Corporation, Rubitherm GmbH TEAP et Witco) sont engagés dans le développement de PCM pour plusieurs applications. Nous avons essayé de compiler les PCM disponibles dans le commerce pour la température entre 0 ° C et 118 ° C, et ceux-ci sont présentés dans le tableau 9 [29].



TableauII.9 diffèrent PCM pour Les eutectiques. [S.D. Sharma et K. Sagara]

Name	Composition (wt %)	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/ kg)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +NaCl+KCl+H <sub>2</sub> O	31+13+16+40	4	234
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +NaCl+NH <sub>4</sub> Cl+H <sub>2</sub> O	32+14+12+42	11	n.a.
C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> + (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	26.5+73.5	12	97.9
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +NaCl+H <sub>2</sub> O	37+17+46	18	n.a.
Na <sub>2</sub> S <sub>4</sub> +MgSO <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O	25+21+54	24	n.a.
C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub> +C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	34+66	24	147.7
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	47+53	30	136
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-	46	95
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	61.5+38.4	52	125.5
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	58.7+41.3	59	132.2
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .9H <sub>2</sub> O	53+47	61	148
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+MgBr <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	59+41	66	168
Napthalene + Benzoic Acid	67.1+32.9	67	123.4
AlCl <sub>3</sub> +NaCl+ZrCl <sub>2</sub>	79+17+4	68	234
AlCl <sub>3</sub> +NaCl+KCl	66+20+14	70	209
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> Br	66.6+33.4	76	151
LiNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> +NaNO <sub>3</sub>	25+65+10	80.5	113
AlCl <sub>3</sub> +NaCl+KCl	60+26+14	93	213
AlCl <sub>3</sub> +NaCl	66+34	93	201
NaNO <sub>2</sub> +NaNO <sub>3</sub> +KNO <sub>3</sub>	40+7+53	142	n.a.

n.a.: not available.  
Lane, 1983; Abhat, 1983; Garg et al., 1985; Buddhi, 1994; Hale et al., 1971; Sharma, 1999.

TableauII.10different PCM commerciaux. [A. Orawan]

Name	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Manufacturer
TH 0	0	334	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
A 4	4	227	766	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
Witco 85010-1	4	129.6	n.a.	Witco
RT 2	6	156	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
TH 7	7	189	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
RT 5	7	156	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 7	7	120	1540	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 7	7	162	1420	Climator (www.climator.com)
RT 6	8	174	860	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 8	8	140	1470	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
A 8	8	220	770	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
E 10	10	140	1520	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
E 13	13	140	1780	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 15	15	130	n.a.	Climator (www.climator.com)
E 21	21	150	1480	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
RT 20	22	172	870	Rubitherm (www.rubitherm.com)
A 22	22	220	770	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 24	24	216	1480	Climator (www.climator.com)
RT 26	25	131	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
TH 25	25	159	n.a.	TEAP (www.teappcm.com)
Witco 45 A	26.3	167.2	n.a.	Witco
S 27	27	207	1470	Cristopia (www.cristopia.com)
STL 27	27	213	1090	Mitsubishi Chemical
RT 27	28	179	870	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 27	28	72	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
PX 27	28	112	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
A 28	28	245	790	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
TH 29	29	188	1540	TEAP (www.teappcm.com)
E 30	30	201	1300	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 32	32	302	1450	Climator (www.climator.com)
E 32	32	186	1460	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
RT 35	35	157	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 42	43	174	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 41	43	63	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
FB 41	43	117	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 41	43	152	880	Rubitherm (www.rubitherm.com)
STL 47	47	221	1340	Mitsubishi Chemical
E 48	48	201	1670	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 48	48	324	1360	Climator (www.climator.com)
STL 52	52	201	1300	Mitsubishi Chemical
PX 52	53	103	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
STL 55	55	242	1290	Mitsubishi Chemical
FB 54	55	135	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 54	55	179	900	Rubitherm (www.rubitherm.com)
E 58	58	226	1280	EPS Ltd. (www.eps Ltd.co.uk)
C 58	58	364	1460	Climator (www.climator.com)
TH 58	58	226	1290	TEAP (www.teappcm.com)
RT 65	64	173	910	Rubitherm (www.rubitherm.com)
C 70	70	194	1700	Climator (www.climator.com)
PX 80	77	91	640	Rubitherm (www.rubitherm.com)
GR 80	79	71	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
FB 80	79	132	750	Rubitherm (www.rubitherm.com)
RT 80	79	175	920	Rubitherm (www.rubitherm.com)

### **II.2.6 Applications des MCP**

#### **A / Le transport de produits alimentaires :**

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [25].

#### **B / Le stockage de l'énergie thermique :**

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide), etc. Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C [25].

#### **C/ Applications médicales :**

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang la **FigII.8** et organes. Récipients usagés pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussins chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [26].



**FigII.8** Des coussins chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps

CHAPITRE III :  
MATERIELS  
ET  
METHODES

**SOMMAIRE**

<b>III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER.....</b>	<b>40</b>
□ Capteur solaire à air sans chicanes .....	40
□ Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins) .....	41
□ L'armoire de séchage.....	42
III. 1.2.1 Mesure des températures .....	43
III.1.2.2 Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant .....	44
III.1.2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage .....	45
III.1.2.3 Acquisition et traitement des données.....	45
<b>III.2 MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3 MATERIEL VEGETAL .....</b>	<b>48</b>
<b>III.4 Détermination de la teneur en eau initiale.....</b>	<b>52</b>
<b>III.5 Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel (<math>\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math> et <math>\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}</math>) à bas de (<math>\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math>) .....</b>	<b>52</b>
<b>III.6 Modélisation des cinétiques de séchage.....</b>	<b>54</b>
<b>III.7 Détermination de la diffusivité effective de l'eau .....</b>	<b>56</b>
<b>III.8 Efficacité thermique du l'insolateur plan à air .....</b>	<b>60</b>

### III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER

#### III.1.1 Description du prototype expérimental

Dans cette partie, nous allons faire une description générale du prototype expérimenté dans le cadre de ce mémoire de master (**FigIII.1**). Nous considérons deux séchoirs solaires de type indirect, ces deux séchoirs solaires ont été instrumentés de sorte à pouvoir étudier le comportement thermique et la cinétique de séchage. Le séchoir de type indirect à une unité de production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage de 5 mm d'épaisseur, de surface inclinée, l'absorbeur en tôle d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm peints en noire mate de dimension 2 m × 1 m. L'isolation thermique est en polystyrène. Pour notre cas, on a utilisé du polystyrène d'épaisseur 4 cm au-dessus du contreplaqué et sur les parties latérales. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 2.5 cm.

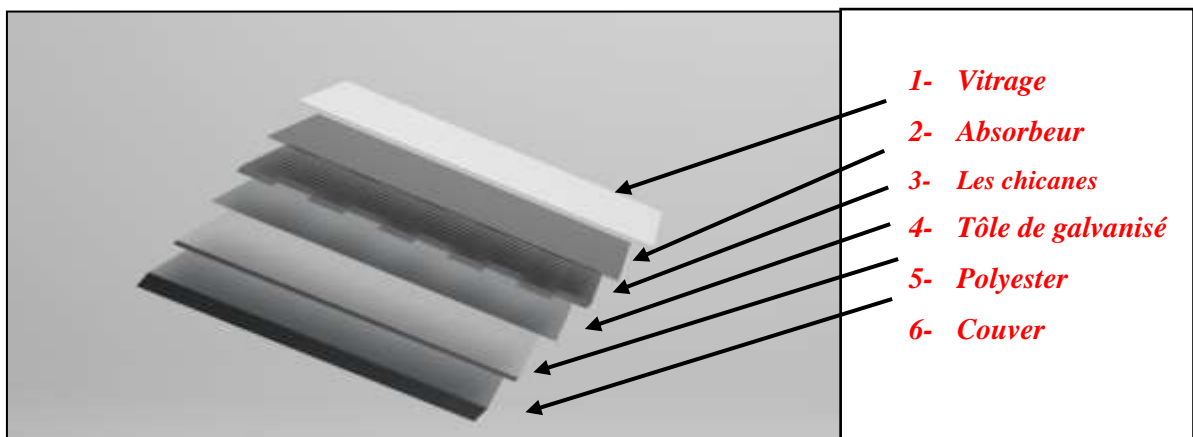


Figure III. 1 Dessine technique des composants du capteur \*S\*

#### ➤ Capteur solaire à air sans chicanes :



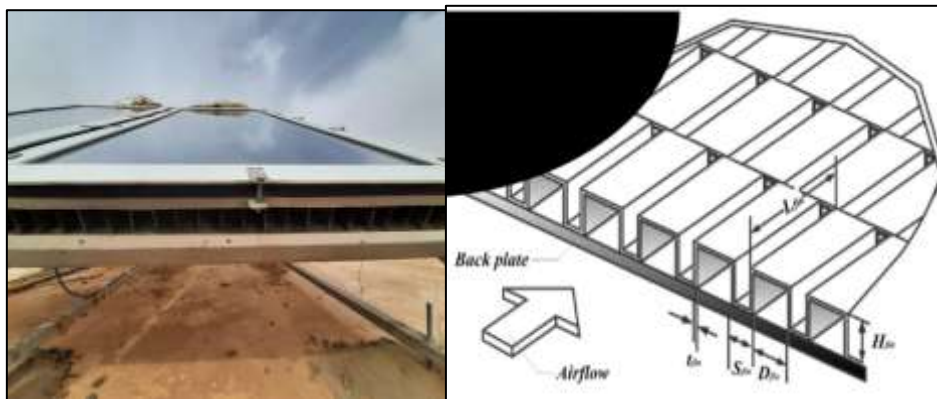
Figure III. 2 Capteur solaire à air sans chicanes

➤ **Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins) :**

Ce système dispose d'un capteur plan à air doté de chicanes, dont elles permettent de rendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et d'augmenter la surface de contact avec elle, afin d'améliorer le rendement thermique (**FigIII.3**).

Les dimensions et la forme des chicanes intégrées dans le capteur solaire à air avec chicanes (**FigIII.3**) [Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., & Wang, P. (2014)].

- $L_{fin} = 200$  mm
- $H_{fin} = 50$  mm
- $S_{fin} = 40$  mm
- $D_{fin} = 40$  mm
- $t_{fin} = 0.5$  mm



**FigIII.3** capteur solaire avec chicanes



**FigIII.4** le prototype utilise pour le séchage de la carotte et la menthe Celui de gauche est sans (chicanes) et celui de droite avec (chicanes)

➤ **L'armoire 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 par le haut et traverse les claies avec un écoulement à convection forcée généré par des ventilateurs qui permet de créer un écoulement forcé (**FigIII.5**).



**FigIII.5** Photographie d'une armoire de séchage (frigo) avec 3 claies (étagères)



**FigIII.6** Dessine technique de prototype \*S\* de séchoirs solaires de type indirect expérimentés

### III.1.2 Instrumentation des prototypes

#### III. 1.2.1 Mesure des températures :

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Nickel-Chrome/NickelAluminium, 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.

Chaque prototype de séchoire solaire indirect est équipé de 6 thermocouples. Trois thermocouples permettent de suivre la température du fluide caloporteur circulant dans la veine d'air mobile du capteur solaire à air (l'entrée, le centre et la sortie), leur emplacement est montré sur la (FigIII.7) Deux thermocouples sont installés sur le niveau de l'entrée et sortie de l'armoire de séchage (Frigo) pour indiquer la température de l'air acheminé vers la chambre de séchage des échantillons (FigIII.8).



FigIII.7 Position des thermocouples dans l'armoire de séchage (Frigo)



FigIII.8 Position des thermocouples dans l'insolateur (avec et sans chicanes)



### III.1.2.2 Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :

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-igrometriche » 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 (Fig III. 9). 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.



**FigIII.9** Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, température et d'humidité relative de l'air ambiant

**III.1.2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage**

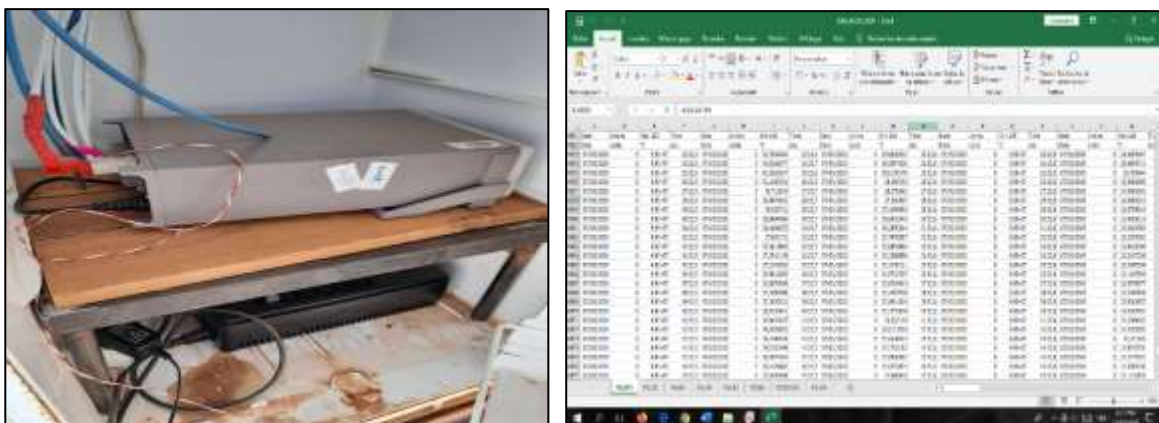
La vitesse de l'air asséchant est mesurée à la sortie du séchoir solaire de type indirect. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre Testo modèle 440. L'humidité relative est également mesurée grâce à la sonde du thermo-hygromètre testo 610.



**FigIII.10** Anemometer Testo 440 + thermo-hygromètre Testo 610

**III.1.2.3 Acquisition et traitement des données**

L'Acquisitions de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22bit) un système de commutation 40 voies Pilotée par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données (**FigIII.6 et FigIII.11**).



**FigIII.11** Photographie de système d'acquisition et de traitement des données

### III.2 MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER

#### ➤ Dessiccateur

C'est un équipement de labo en verre qui permet de protéger des substances contre l'humidité. Il est constitué d'une cuve circulaire surmonté d'un couvercle. Cet ensemble est muni d'un disque perforé et une quantité suffisante de desséchant (gel de silice) **FigIII.12**.



**FigIII.12** Photographies de dessiccateur utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale

#### ➤ Etuve

C'est un appareil de chauffage, il fonctionne à la pression atmosphérique et permet d'effectuer divers traitements thermiques. Dans notre travail on le réglé à 105 °C pendant 24 heures afin de déterminer la teneur en matière sèche des échantillons préparés.



**FigIII.13** Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche

➤ **Balance**

C'est un instrument de mesure qui sert à suivre la masse au cours de séchage. Le suivi est effectué par pesée sur une balance de précision (Type KERN PCB 3500-2 Balance de précision à 3500 g).



**Fig III.14** Balance KERN ABT 220-4M: 220g/0,1m    **FigIII.15** Balance KERN PCB 3500-2: 3500g/

➤ **Agitateur Magnétique Chauffant :**

Un agitateur est un équipement de laboratoire ayant pour but d'assurer l'homogénéisation d'un milieu. Il existe différents types d'agitateur en fonction du milieu, de la configuration de l'unité et de l'effet désiré.



**FigIII.16** Agitateur Magnétique Chauffant utilisé au laboratoire

➤ **Béchers :**

Un bécher est un récipient utilisé pour de nombreuses applications de laboratoire.



**FigIII.17** Becher utilisé au laboratoire

### III.3 MATERIEL VEGETAL

#### ➤ La 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.



FigIII.18 la carotte (*Daucus carotta*)

#### ➤ La 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).



FigIII.19 la menthe

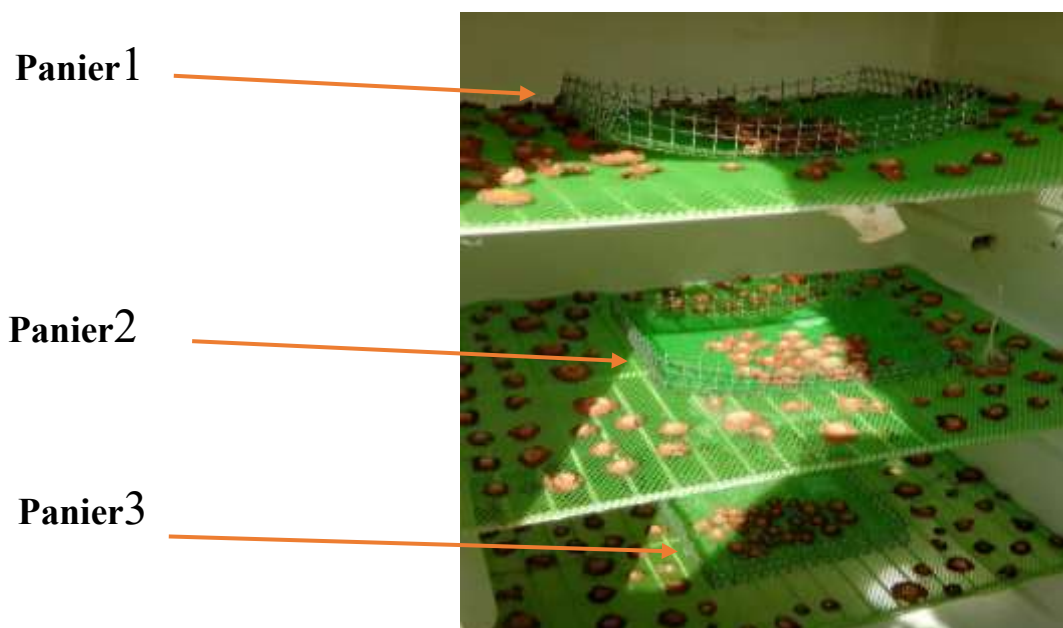
### III.3.1 Protocole de séchage de la carotte (*Daucus carotta*)

#### ➤ Préparation de l'échantillon :

Nous disposons deux séchoirs solaires indirect, fonctionnant en convection forcée, avec et sans chicanes (**FigIII.6**). La quantité de produit à sécher est de 7 kg. Le produit épluché et coupé en rondelles de 1 cm d'épaisseur et dont le diamètre moyen est de 3 cm (calibre du produit utilisé), est réparti à parts égales sur les trois claies (panier) de l'armoire de séchage (Frigo) pour chaque séchoir avec et sans chicanes.

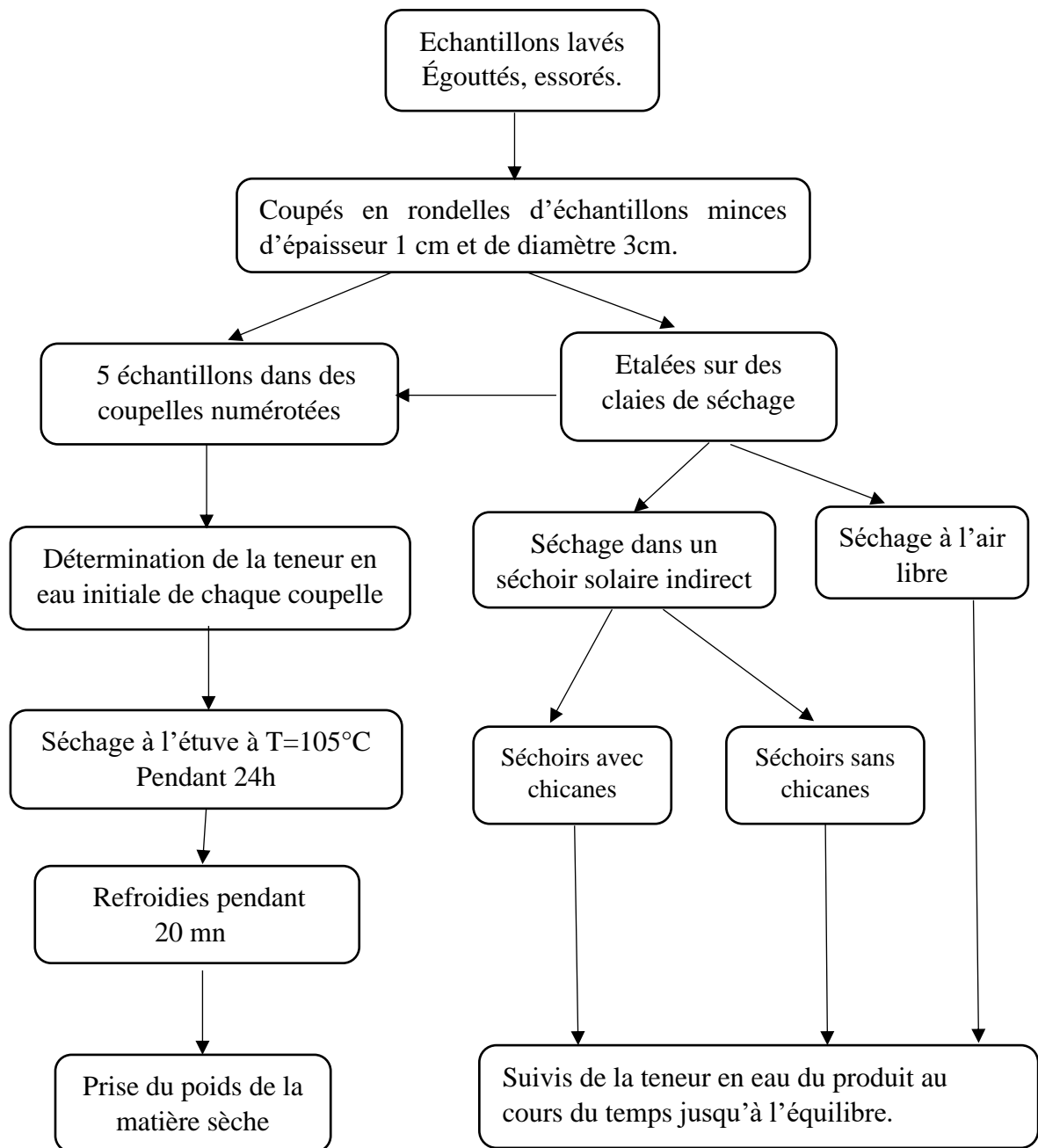
Ce fluide caloporteur est aspiré par un ventilateur fixé à la sortie du séchoir afin d'avoir une bonne distribution de l'air. Afin d'obtenir les courbes de cinétique de séchage, les échantillons est pesée toutes les heures jusqu'au point d'équilibre.

Nous avons pesé les trois échantillons pour chaque séchoir (avec et sans chicanes), puis nous avons calculé la teneur en eau a base sèche et humide, enfin tracé les courbes de la teneur en eau en fonction du temps.



**FigIII.20** quantités de carotte à séchée dans l'armoire de séchage (Frigo)

Pour déterminer la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole suivant (Fig. 21) :



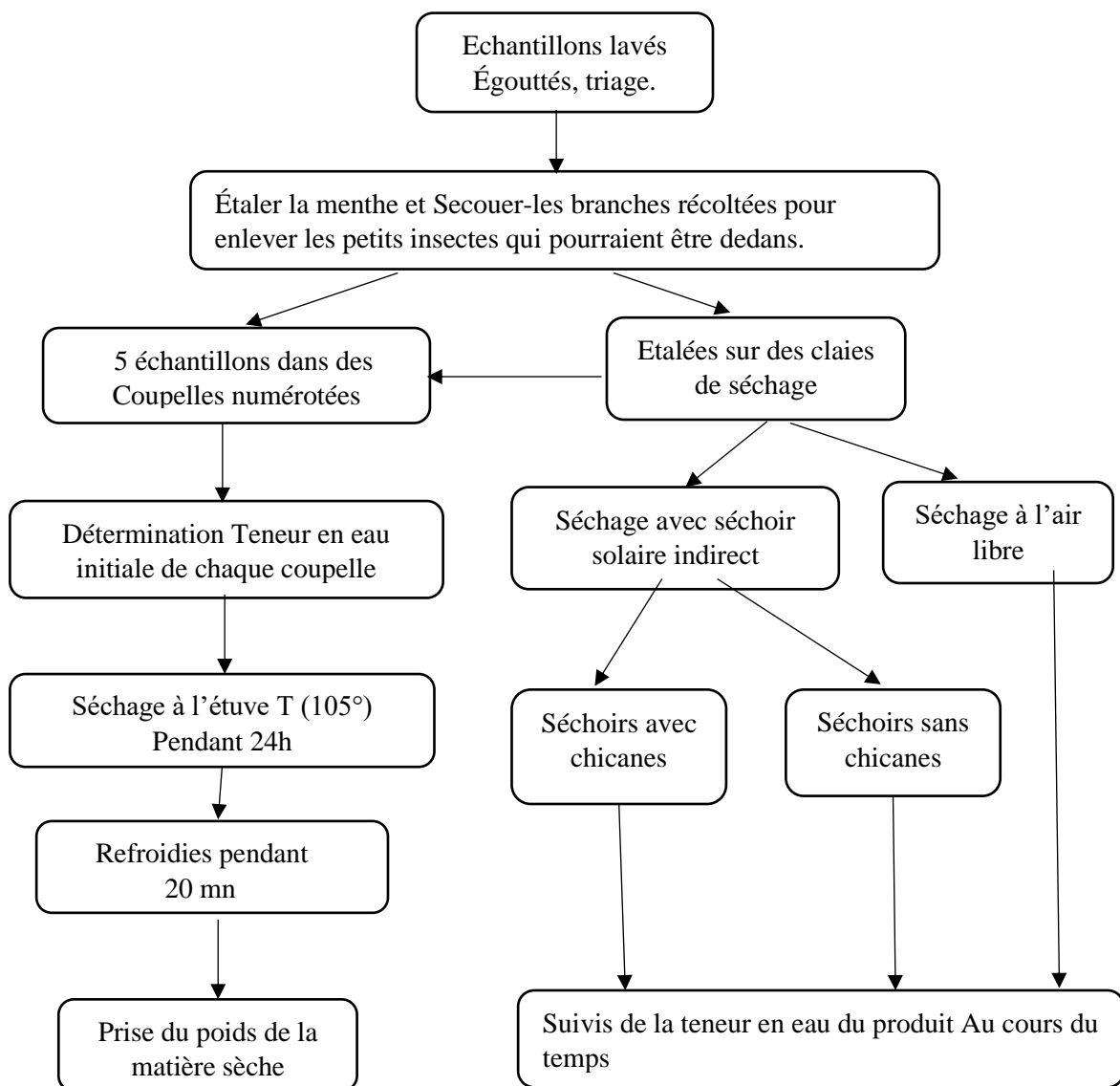
**FigIII.21** Schéma représentant le protocole de séchage de la carotte

### III.3.2 Protocole de séchage de la menthe

#### ➤ Préparation de l'échantillon :

Triage et lavage de la menthe à l'eau froid de robinet, Puis Secouez-les branches récoltées pour enlever les petits insectes qui pourraient être dedans, est réparti à parts égales sur les trois claies (panier) de l'armoire de séchage (frigo) pour chaque séchoir avec et sans chicanes. La quantité de produit à sécher est de 5 kg.

Nous prenons un petit échantillon de la menthe préparé, suivi du découpage de ces racines en fines tranches de 1 à 2 mm d'épaisseurs, ces dernières ont été mise à l'étuve pour déterminer la teneur en eau initiale. Pour déterminer la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole suivant (Fig.22) :



FigIII.22 Schéma représentant le protocole de séchage de la menthe



### III.4 Détermination de la teneur en eau initiale

Des échantillons ont été prélevés afin de mesurer la teneur en eau à base humide et sèche. Ils sont séchés à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  dans une étuve ventilée. À l'aide des masses de produit mesurées on peut calculer les teneurs en eau en deux bases humide et sèche.

La teneur en eau est calculée selon la formule suivante :

$$W (\%) = \frac{m(\text{initiale}) - m(\text{finale})}{m(\text{initiale})} \% \dots \text{(Eq. III.1)}$$

$W (\%)$  : Teneur en eau à base humide en %.

$m(\text{initiale})$  : Masse de l'échantillon avant mise à l'étuve en gramme.

$m(\text{finale})$  : Masse de l'échantillon après mise à l'étuve en gramme.

### III.5 Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel ( $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ et $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) à base de ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Le chlorure de calcium, de formule  $\text{CaCl}_2$  (masse molaire  $M = 111 \text{ g/mol}$ ), se présente aux conditions thermodynamiques standard sous forme d'un solide blanc (chlorure de calcium fondu ou anhydre). On le trouve aussi sous la forme de chlorure de calcium cristallisé ou hydraté  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (masse molaire  $M = 219 \text{ g/mol}$ ), ou le chlorure de calcium desséché  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (masse molaire  $M = 183 \text{ g/mol}$ ). Il est facilement soluble dans l'eau et l'alcool. C'est un composé fortement hygroscopique, ce qui veut dire qu'en présence d'eau il réagit pour donner un hydrate, avec dégagement de chaleur.

Réaction de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau ; en pratique nous avons pesé 2 moles de chlorure de calcium d'hydrate  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  comme matière première soit 300g ainsi que 4 moles d'eau soit 72g (nous avons doublé la quantité des réactifs pour obtenir un bon résultat), puis nous avons mélangé le chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau dans un Becher fermée, en assurant l'homogénéité et agitation continue avec une température de  $120^\circ\text{C}$  (Figures III. 23, 24, 25).

À la fin de la réaction on verse le produit préparé dans les canettes de 24 cl (Fig. III 26).

Cette expérience est répétée avec une augmentation de la quantité de l'eau (8mole de  $\text{H}_2\text{O}$  soit 144g) pour obtenir le chlorure de calcium cristallisé ou hydrate  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . On a vu que la variation de la température de fusion décroît rapidement lorsqu'il y a de l'eau en excès (Tableau1).



FigIII.23 : pesé de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (300g)



FigIII.24 : pesé de l'eau (72g)



FigIII.25 : mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau

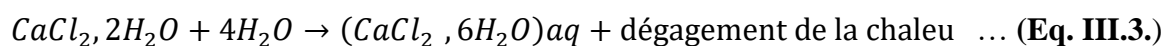
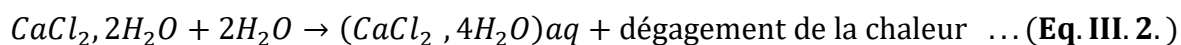


FigIII.26 : Matériau préparé pour le stockage de l'énergie thermique ( $\text{CaCl}_2, 4\text{H}_2\text{O}$ ) versé dans les cannettes

Tableau III.1 : Températures des fusions des Matériaux obtenus  
 $\text{CaCl}_2, 4 \text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CaCl}_2, 6 \text{H}_2\text{O}$

Produits obtenus	$\text{CaCl}_2, 4 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2, 6 \text{H}_2\text{O}$
Températures des fusions [°C]	45	30

Ces expériences sont traduites selon les réactions suivantes :



### III.6 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 :  $MR = f(t)$ .

$$MR = \frac{Mt - Me}{M0 - Me} \quad (Eq. III. 4.)$$

Avec  $Mt$ ,  $Me$  et  $M0$  sont les valeurs de la teneur en eau (base sèche) respectivement à l'instant  $t$ , à l'infini (équilibre) et à  $t=0$ . Les vitesses de séchage ont été calculées en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (Eq. III. 5.)$$

Avec  $M_{t+\Delta t}$  et  $M_t$  sont la teneur en eau à l'instant  $t$  et la teneur en eau à l'instant  $t + \Delta t$  en kg d'eau / kg de matière sèche, respectivement,  $t$  est le temps de séchage en minute.

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. Le Tableau III-2 regroupe quelques équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche minces d'un produit.

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi ces dix différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.2. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant le logiciel « Origin Pro 9.0 ». Le coefficient ( $R^2$ ) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage [Balbay et al., 2012]. En plus de ( $R^2$ ) les différents paramètres statistiques tels que le khicarré 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 suite [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

Tableau III. 2 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces

N°	Modèles	Équations	Références
1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model	$MR = \exp(-kt)$	[Lewis, 1921]
2	Page Model	$MR = \exp(-kx^n)$	[Xanthopoulos, et al., 2007]
3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = A \exp(-kt)$	[Zhang, et al., 1991]
4	Modied Page Model	$MR = \exp(-(kx)^n)$	[Midilli, et al., 2002]
5	Logarithmic Model	$MR = A \exp(-kt) + c$	[Yaldiz, et al., 2002]
6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = A \exp(-kt^n) + bt$	[Midilli, et al., 2002]
7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kbt)$	[Balbay, et al., 2012]
8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	$MR = A \exp(-k_1t) + (1 - A) \exp(-k_2t)$	[Ruiz, et al., 2013]
9	Two-Terms Model	$MR = A \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	[Akpinar, et al., 2004]
10	Two-Terms Exponential Model	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kAt)$	[Corzo, et al., 2011]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \quad \text{(Eq. III.6.)}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad \text{(Eq. III.7.)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad \text{(Eq. III.8.)}$$

Avec

$$\overline{MR}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad \text{(Eq. III.9.)}$$

Où  $MR_{exp}$  et  $MR_{pré}$  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.7 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] :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad (\text{Eq. III.10.})$$

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

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (\text{Eq. III.11.})$$

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] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. III.12.})$$

Où :  $D_{eff}$  est la diffusivité effective (en  $m^2/s$ ),  $t$  est le temps (en s),  $L$  est le 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 (EqIII.8) peut être supposée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. III.13})$$

L'équation (EqIII.10) peut être réarrangée et exprimée comme suit:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (\text{Eq. III.14})$$

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 :

$$\text{Slope}(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad (\text{Eq. III.15})$$

### III.7 Calcule l'humidité relative

$P_s(T)$  est la pression de saturation (d'équilibre liquide-vapeur) de la vapeur d'eau à la température peut également utiliser la *forme de Dupré* valable entre  $-50^\circ\text{C}$  et  $+200^\circ\text{C}$  pour calculer  $P_s(T)$  (**Eq.III.16**), [Jannot, Y. 2005].

$$P_s(T) = \exp \left[ 46.784 - \frac{6435}{T + 273.15} - 3.868 \ln(T + 273.15) \right] \quad (\text{Eq. III. 16})$$

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si  $P_v \leq P_s(T)$ , On définit alors l'**humidité relative HR** de l'air par la relation :

$$0 \leq HR \leq 100 \quad HR = \frac{P_v}{P_s} 100 \quad (\text{Eq. 17})$$

On définit une autre grandeur caractéristique de l'air humide : c'est **humidité absolue**  $X$  (*Kg vapeur /Kg l'air sec*) (**Eq.III.18**).

$$X = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{Eq. III. 18})$$

$$HR_1 = \frac{P_{v-1}}{P_s(T)_1} 100 \Rightarrow P_{v-1} = \frac{P_s(T)_1 \times HR_1}{100} \quad (\text{Eq. III. 19})$$

$$X_1 = 0.622 \frac{P_{v_1}}{P - P_{v_1}} = 0.622 \frac{P_s(T)_1 \times HR_1}{P - P_s(T)_1 \times HR_1} \quad (\text{Eq. III. 20})$$

- L'humidité absolue se conserve lors d'un changement d'altitude ou de température de la masse d'air, tant qu'il n'y a ni condensation ni évaporation dans l'isolateur. La raison est qu'un kilogramme d'air ou de vapeur reste un kilogramme, indépendamment de la pression ou de la température de l'air. Ainsi lorsque l'on donne l'humidité spécifique, l'altitude de la parcelle d'air n'a pas d'importance. Ceci reste valable tant que la quantité de vapeur reste constante, il ne doit donc pas y avoir de changement d'état physique.

$$\text{Donc,} \quad X_1 = X_2 \quad (\text{Eq. III. 21})$$

$$X_2 = 0.622 \frac{P_{V_2}}{P - P_{V_2}} \Rightarrow P_{V_2} = \frac{P \times X_2}{0.622 + X_2} \quad (\text{Eq. III. 22})$$

$$HR_2 = \frac{P_{V_2}}{P_{s(T)_2}} 100 \quad (\text{Eq. III. 23})$$

- Etat 1 : entrée du capteur
- Etat 2 : sortie du capteur
- $X$  : Humidité Absolue de L'air kg eau/kg air sec
- $p_v$  : Pression partielle de vapeur d'eau
- $P$ : Pression totale de l'air humide, que l'on peut en première approche Prendre égale à la pression atmosphérique, soit 101 300 [Pa]
- $HR$ : Humidité Relative de L'air[%]



### III.8 Efficacité thermique du l'insolateur plan à air

L'efficacité thermique du capteur solaire est définie par le rapport suivant [35], [36] :

$$\eta = \frac{\textit{Puissance thermique utile par m}^2 \textit{ de capteur}}{\textit{Flux solaire incident sur le plan du capteur}} \quad (\textit{Eq. III. 24})$$

Cette définition se traduit par l'expression :

$$\eta_{th} = \frac{Qu}{I.Ac.K} \quad (\textit{Eq. III. 25})$$

La puissance utile récupérée par le fluide est déterminée par l'équation suivante :

$$Qu = m.Cp.(TS - TE) \quad (\textit{Eq. III. 26})$$

**m** : Débit massique de l'air dans le capteur (kg/m<sup>2</sup>. S).

**Cp** : Capacité spécifique de l'air (J/kg. K) .

**TE** : Température d'entrée au capteur, (K).

**TS** : Température de sortie du capteur (K).

**Ac** : Surface du capteur (m<sup>2</sup>).

**I** : Puissance solaire incidente (W/m<sup>2</sup>).

**K** : coefficient de transmissivité, pour le vitrage (K=87%).

CHAPITRE IV :  
RESULTAS  
ET  
DUSCUTIONS

**SOMMAIRE**

<b>RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.1 Performances thermiques du prototype de séchoir solaire indirect sans produits.....</b>	<b>61</b>
□ Pour l'unité de chauffage du prototype (insolateur plan à air) .....	61
□ Pour les deux armoires de séchage (Frigos) de prototype .....	68
<b>IV.2. Séchage du carotte et du menthe dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect .....</b>	<b>71</b>
<b>Cas 1 : cinétique de séchage de la carotte le 19 Février 2020 .....</b>	<b>71</b>
<b>Cas 2 : cinétique de séchage de la menthe le 03 Mars 2020.....</b>	<b>74</b>
<b>IV.3 la Vitesse de séchage.....</b>	<b>76</b>
<b>IV.4 Performance thermique des deux prototypes de séchoir solaire indirect .....</b>	<b>78</b>
<b>IV.5. Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince .....</b>	<b>80</b>
<b>IV.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la carotte et la menthe ..</b>	<b>84</b>

**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 des prototypes de séchoir solaire indirect à convection forcée sur des journées 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 prototypes de séchoir solaire indirect est mesurée en termes d'efficacité du système et des températures de l'air à l'intérieur des armoires de séchage (Frigos) et l'isolateurs. Le débit massique d'air est fixé à 60 kg/h pour le séchoir sans chicanes et 50Kg/h avec chicanes. **Les FigIII.5 et 19,20** présentent une vue photographique d'échantillons de produits frais, séchés au soleil et aux prototypes de séchoir solaire indirect.

**IV.1 Performances thermiques du prototype de séchoir solaire indirect sans produits**

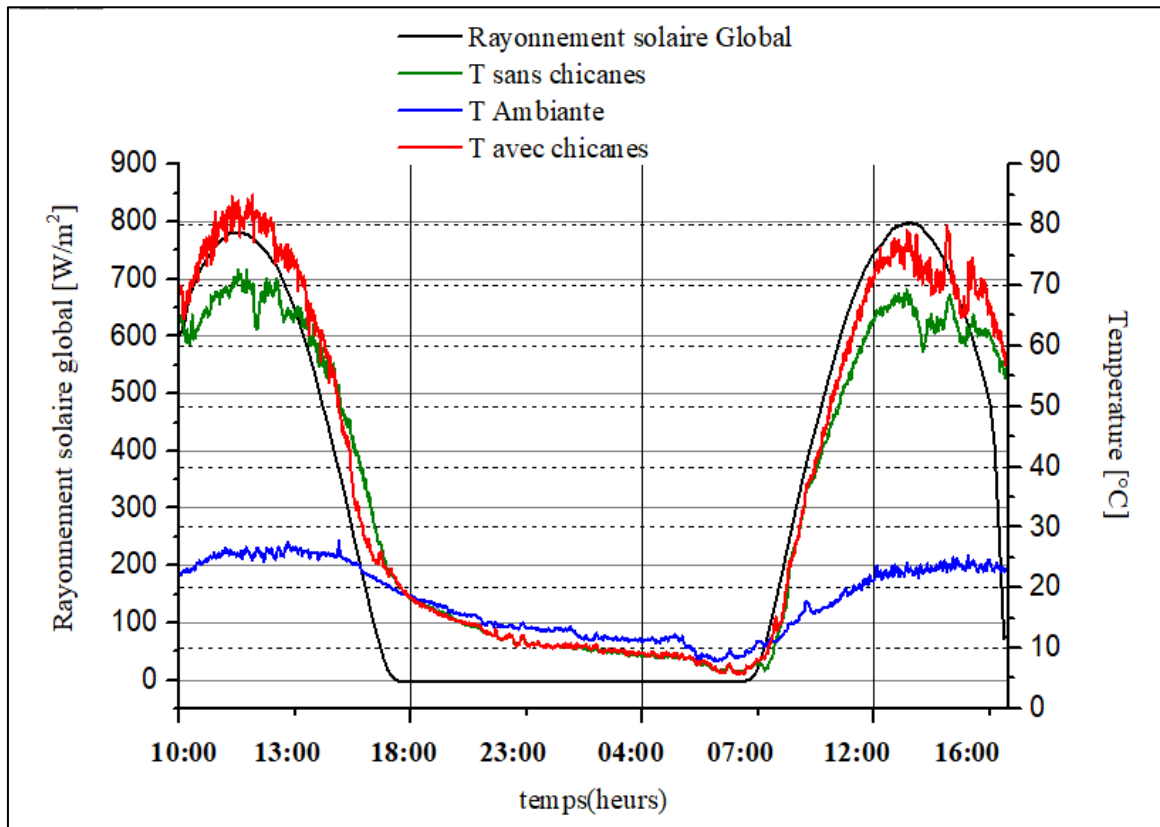
Dans un premier temps, nous avons testé les deux prototypes construits à l'atelier de (URAER) sans introduit le produit à séché (séchoir vide) juste pour montrer l'effet de l'adjonction des chicanes sur le comportement thermique de prototype de séchoir solaire indirect.

- **Pour l'unité de chauffage du prototype (insolateur plan à air) :**

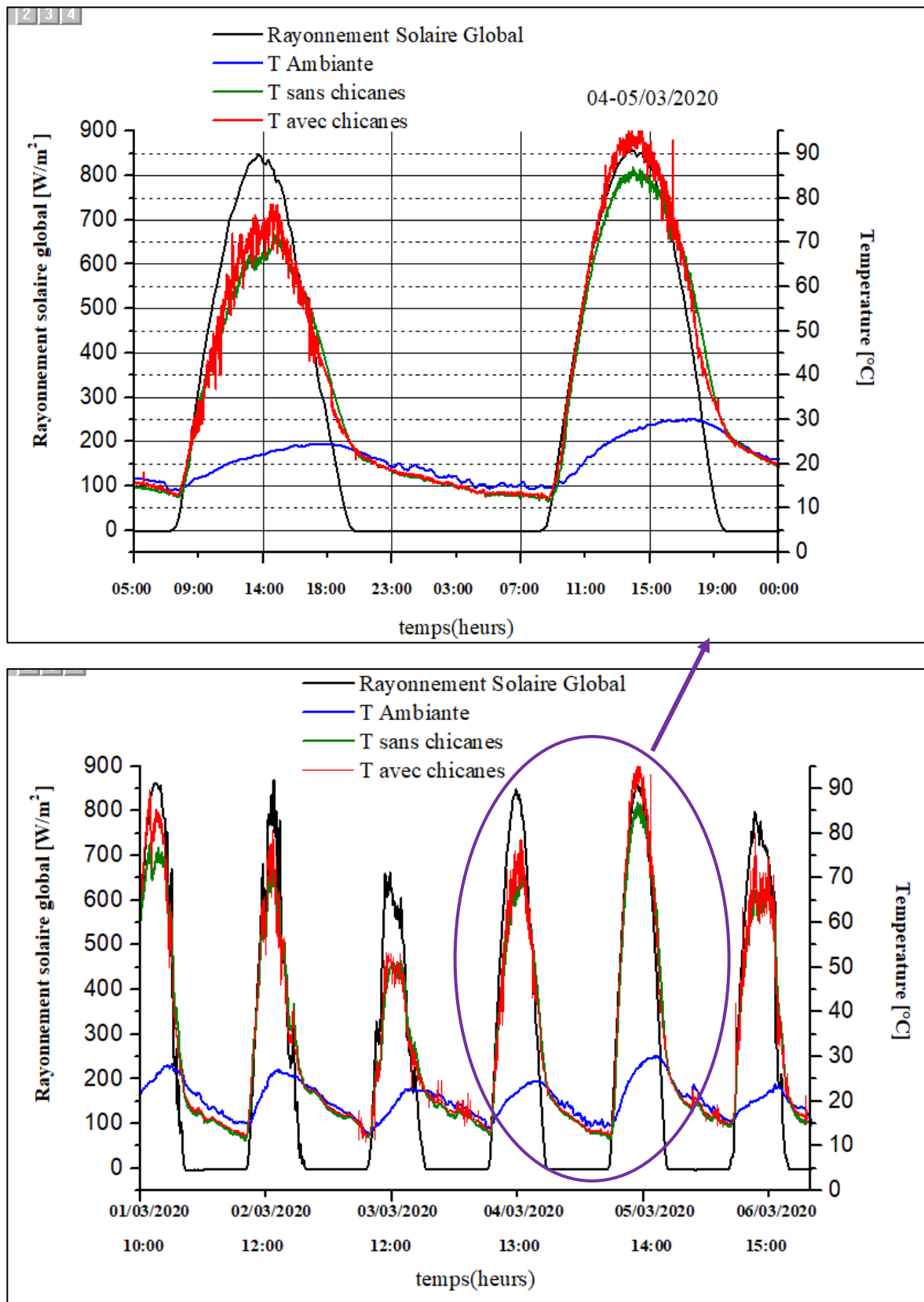
Au cours des essais, il a été observé que la température de l'air à la sortie de l'insolateur avec chicanes était toujours supérieure à celle de l'air à la sortie de l'insolateur sans chicanes (**Fig.VI.1,2,3,4**) en raison de la présence d'un mouvement convectif plus important dans l'insolateur avec chicanes (augmentation de la surface de contact). Une température ambiante moyenne jusqu'à [17 35°C] a demis de journée. Cette observation a été vérifiée même les conditions météorologiques était différentes comme le montre les figures présentées relative aux essais du (*17 – 18 Février 2020,01-06/10-15 Mars, 03-04-05 Mai 2020*).

Nous remarquons que l'éclairement a une valeur moyenne autour de 1100 W/m<sup>2</sup>. Il y a des jours marqués par le passage de quelques nuages ce qui se traduit par des chutes de flux allant jusqu'à 700 W/m<sup>2</sup>, par ailleurs au milieu de la journée la température atteinte une valeur moyenne entre (80°C et 86°C) pour l'insolateur avec chicanes et entre (65°C et 80°C) pour l'insolateur sans chicanes.

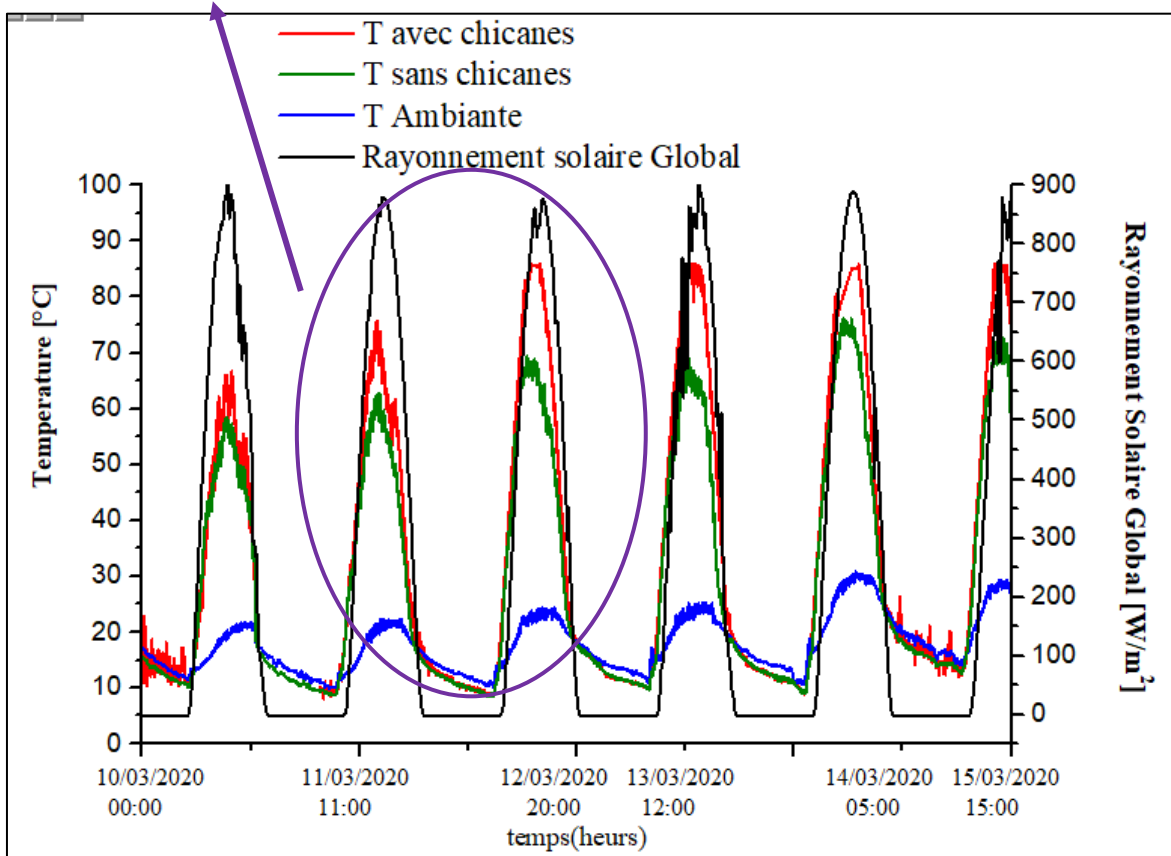
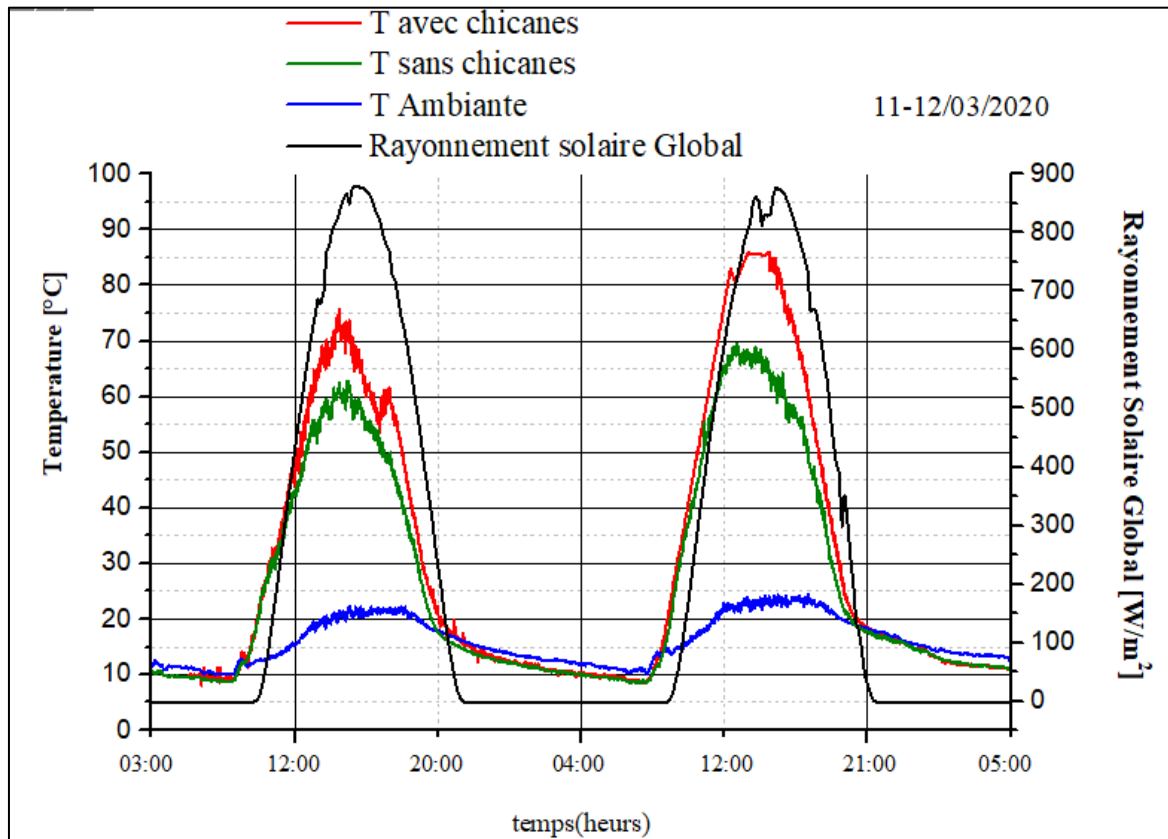
Les jours où il y avait le problème des nuages se traduit par des chutes de flux (rayonnement solaire) qui implique une chute de température allant jusqu'à 65°C. L'amélioration de la température de l'air à la sortie de l'insolateur avec chicanes est entre (11% et 13.33%) obtenue par adjonction des chicanes.



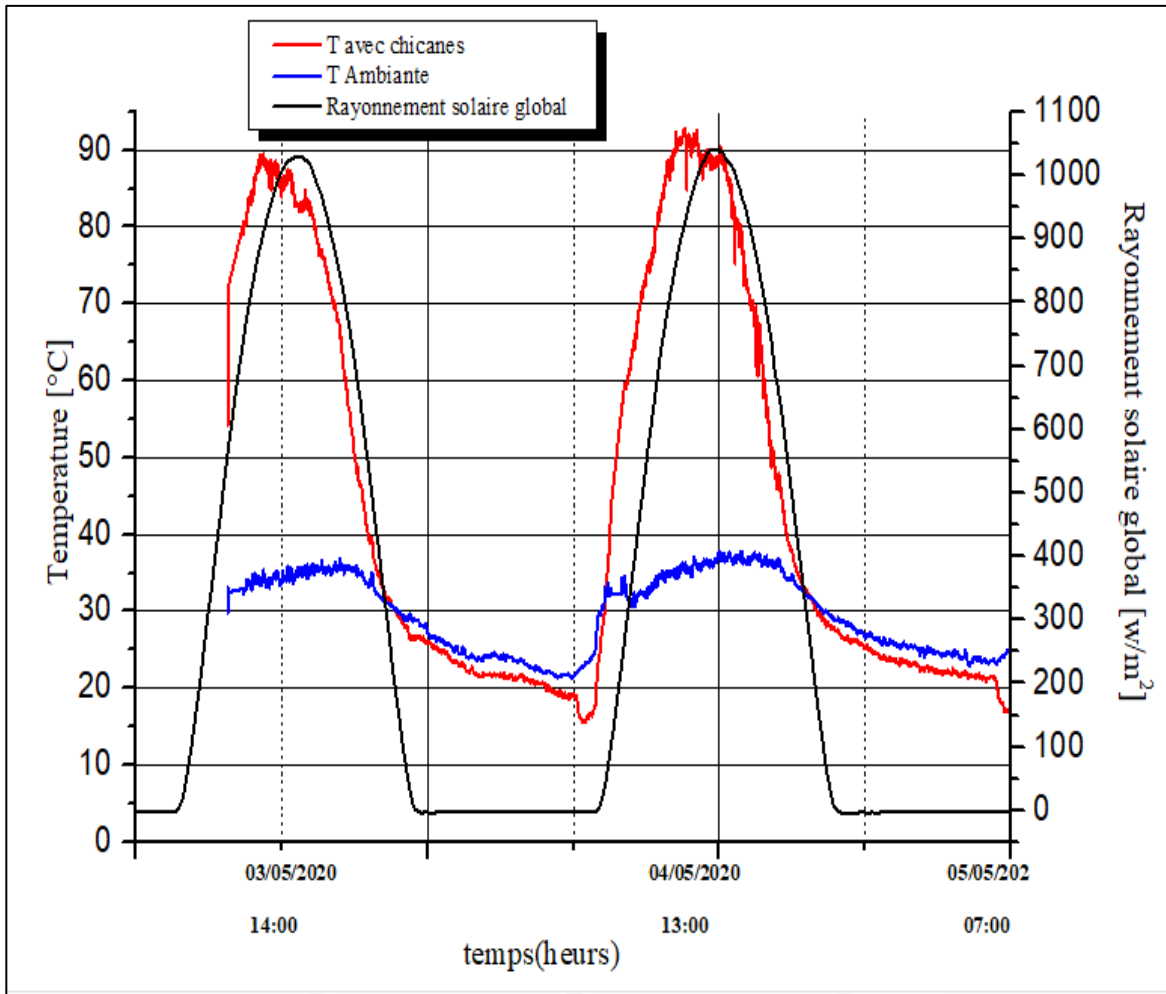
FigIV.1 évolutions de la température à la sortie de l'insolateur et d'éclairement solaire global en fonction du temps (17-18/02/2020)



FigIV.2 évolutions de la température à la sortie de l'insolateur et d'éclairement solaire global en fonction du temps (01-06/03/2020)



FigIV.3 évolutions de la température à la sortie de l’insolateur et d’éclairement solaire global en fonction du temps (10-15/03/2020)



**FigIV.4** évolutions de la température à la sortie de l'insolateur et d'éclairement solaire global en fonction du temps (03-05/05/2020)



- **Intégration des matériaux à changement dans l'insolateur sans chicanes :**

Afin d'assurer la fusion des matériaux à changement de phase (Chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  et Paraffine wax) dans les canettes à différentes zones de l'insolateur sans chicanes, nous nous sommes basés sur les résultats des trois thermocouples installés dans l'insolateur (Fig.IV.5,6,7).

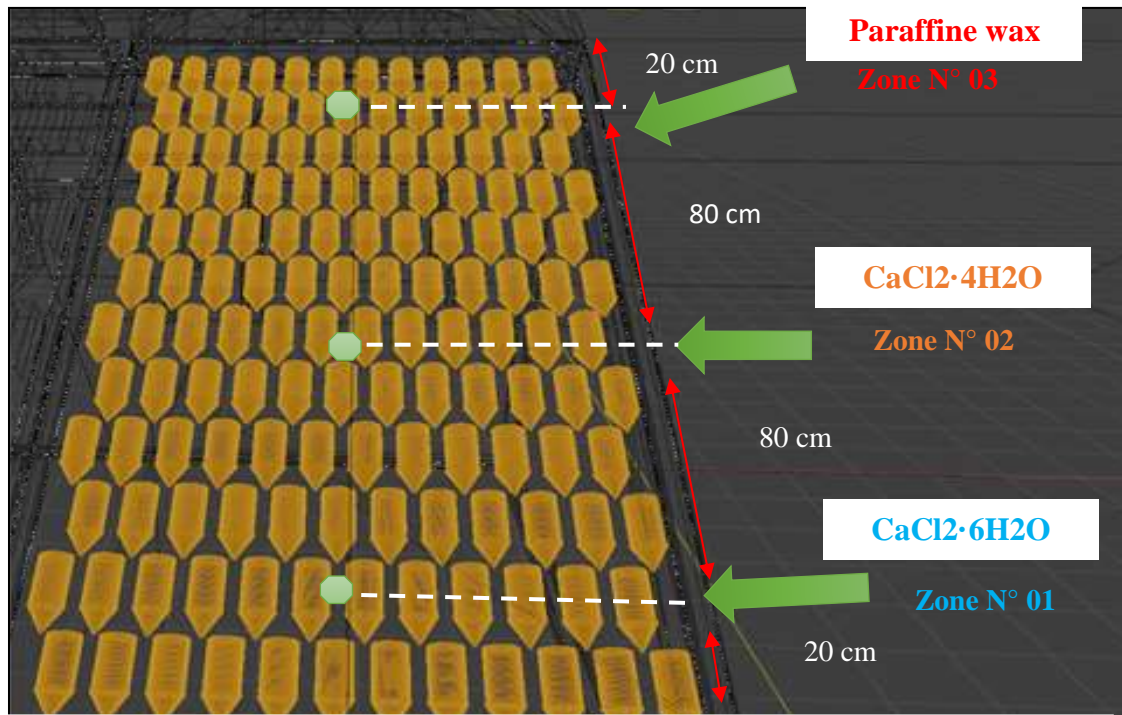
Donc objectif est de connaître l'évolution des températures de chaque zone pour un meilleur emplacement des canettes remplis de ( $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $T_{\text{fusion}}=43^\circ\text{C}$ ), ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $T_{\text{fusion}}= 29^\circ\text{C}$ ) et (Paraffine wax,  $T_{\text{fusion}}=58^\circ\text{C}$ ) dans l'insolateur plan à air sans chicanes.



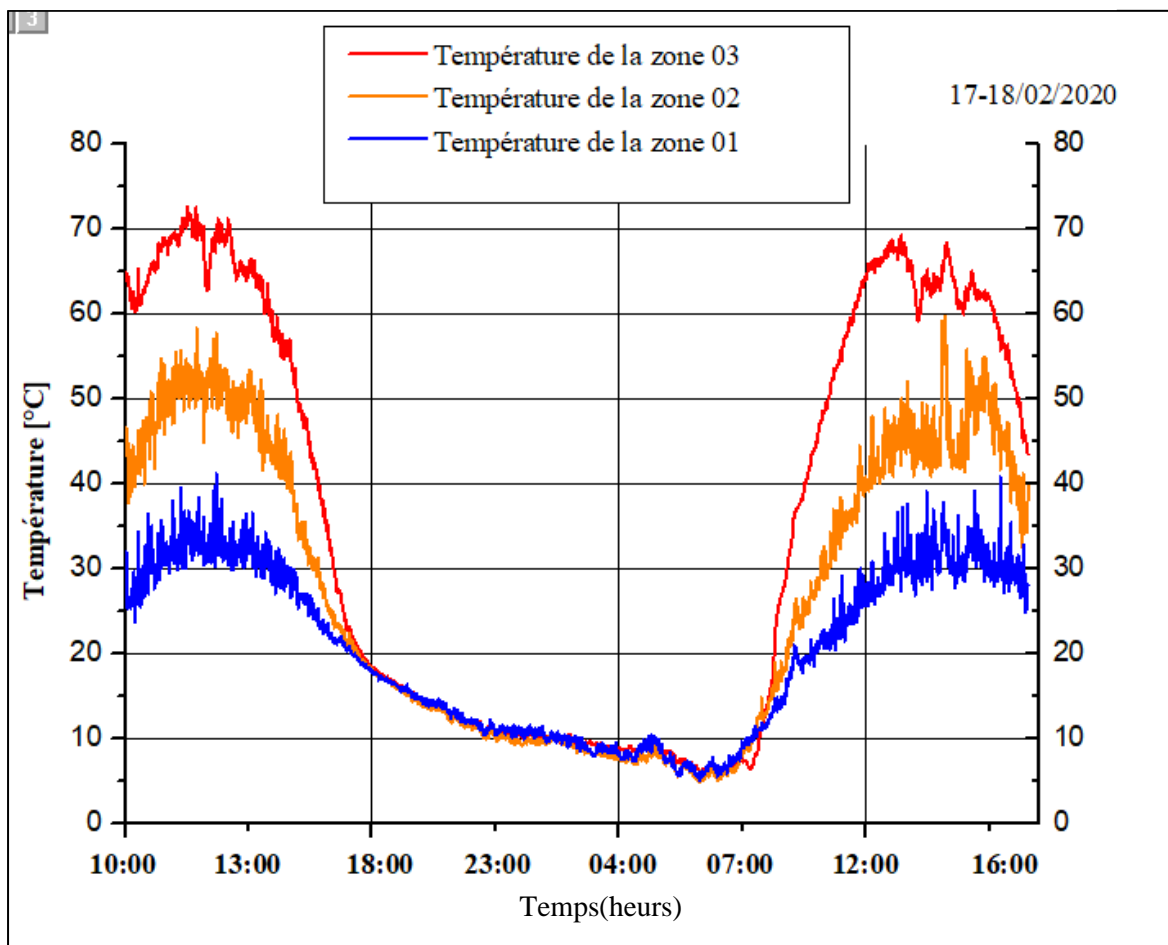
**FigIV.5** L'insolateur plan à air sans chicanes et sans canettes



**FigIV.6** L'insolateur plan à air avec des canettes



FigIV.7 dessine technique Intégration des matériaux à changement dans l'insolateur sans chicanes



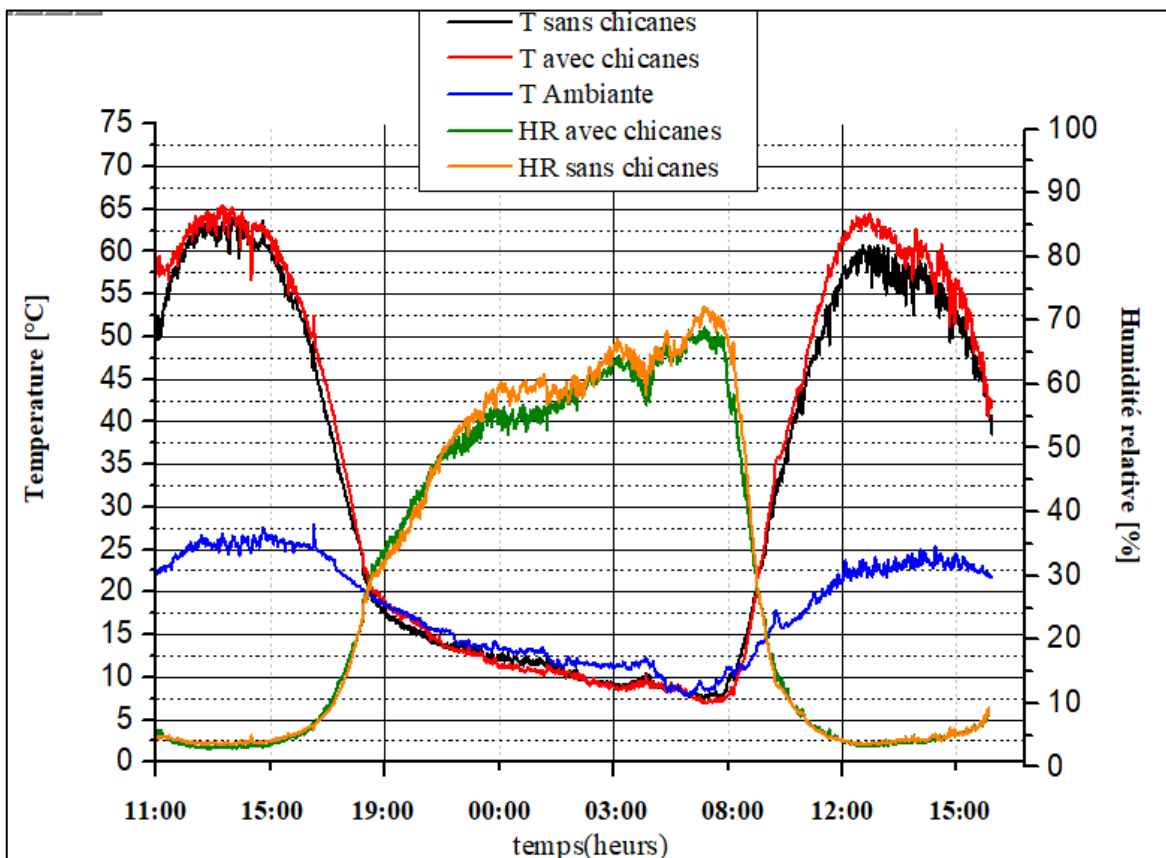
FigIV.8 évolutions des températures en fonction du temps a diffèrent zones

- Pour les deux armoires de séchage (Frigos) de prototype :

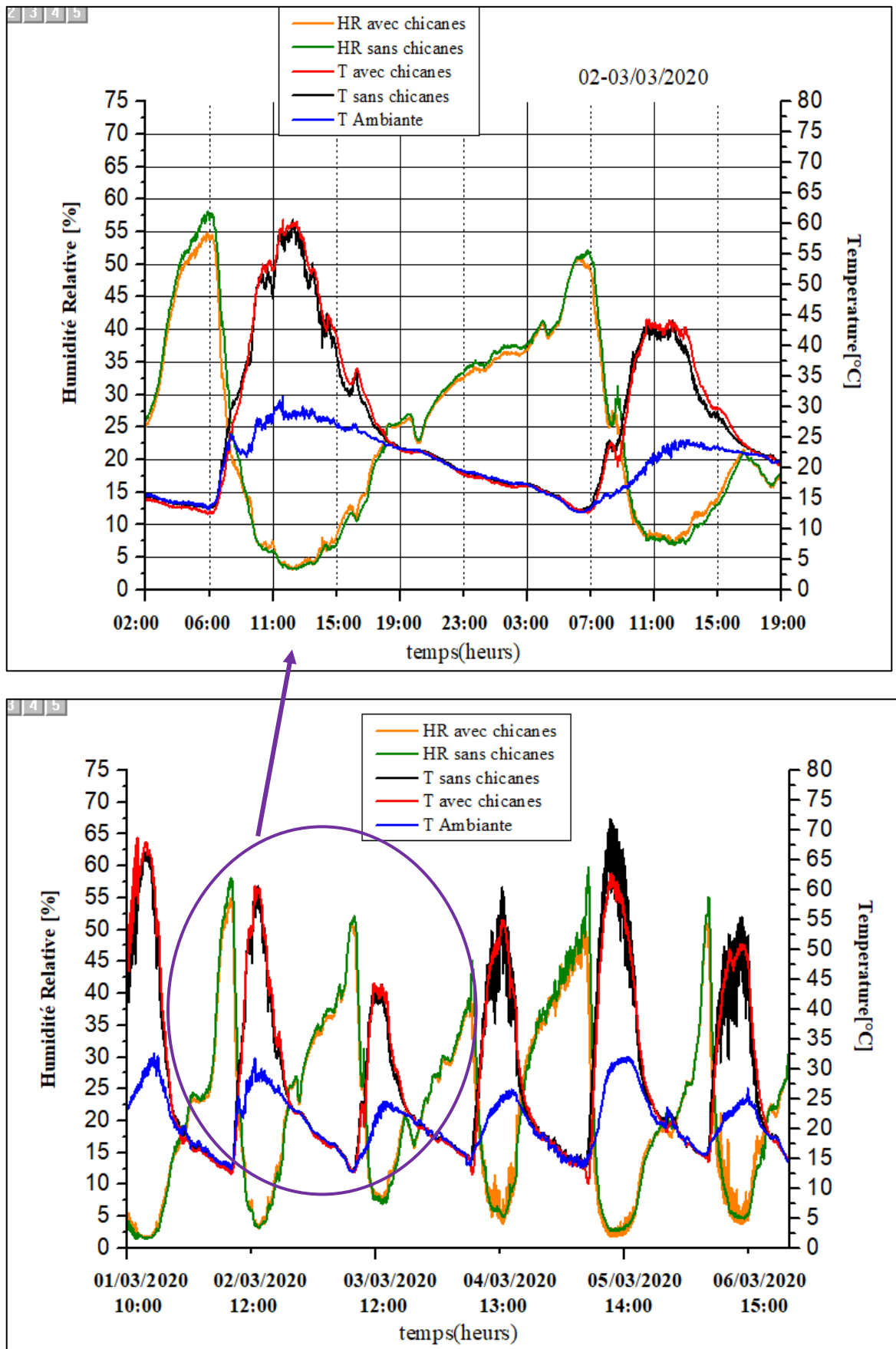
L'historique de la température et de l'humidité relative de l'armoire de séchage en fonction du temps sont présentées dans le séchoir solaire avec et sans chicane sous les mêmes conditions d'essai du (17 – 18 Février 2020 et 01-06/10-15 Mars et 03-04-05 Mai 2020).

Il a été observé que l'humidité relative d'air à l'entrée des armoires de séchage avec et sans chicane varie avec la température de l'air de séchage. Lorsque la température augmente, en journée, l'humidité relative diminue. Un taux d'humidité relative de 7 à 20 % correspond à un air de séchage trop sec de température autour de (80°C à 75°C). Inversement, lorsque les températures chutent autour de (20°C à 11°C) au cours de la nuit, l'humidité relative augmente et peut atteindre la saturation soit une humidité relative de 65 %.

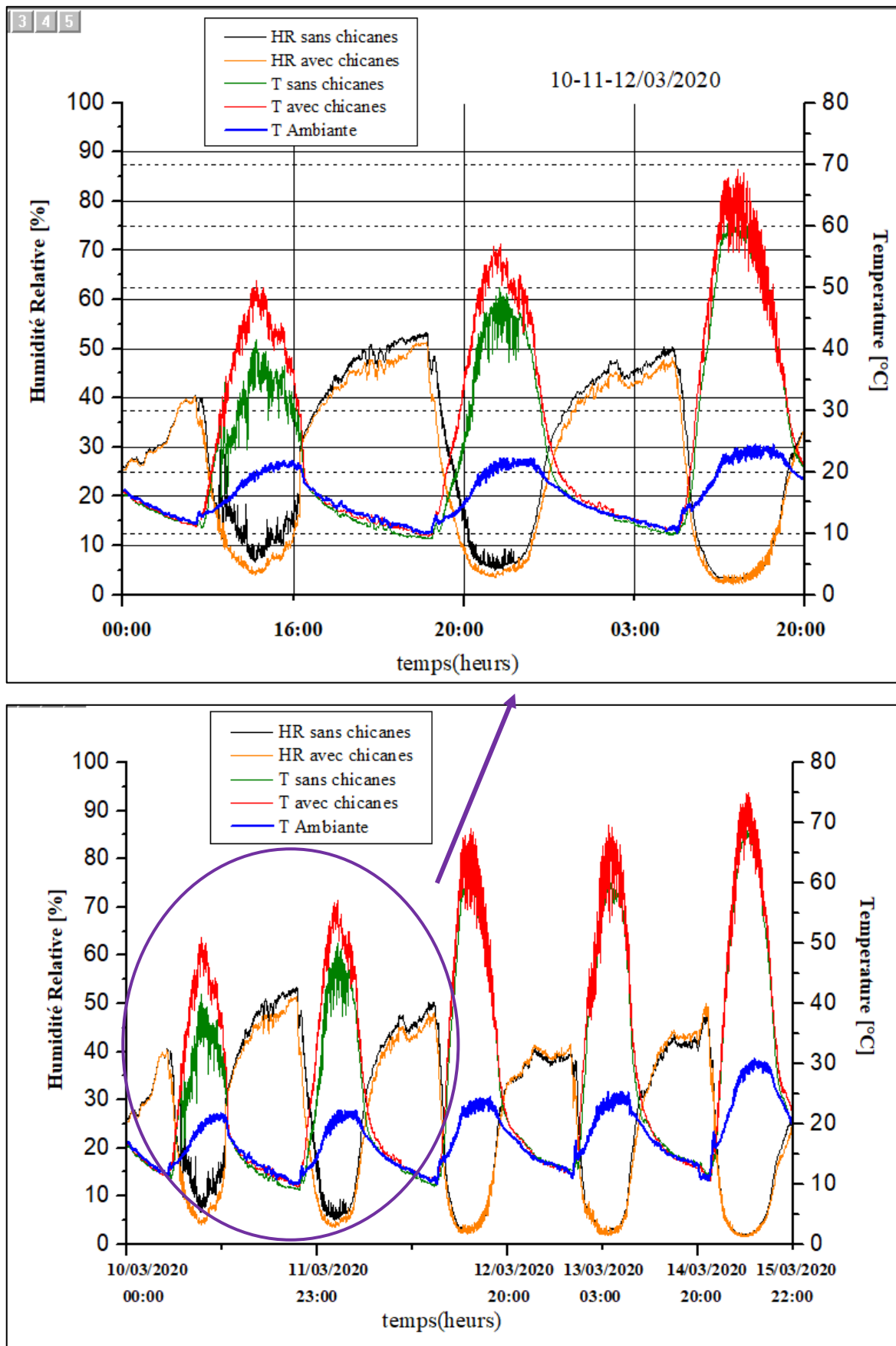
Donc l'adjonction des chicanes dans la veine d'air mobile augmente la température de l'air dans l'insolateur en raison de l'augmentation de la turbulence et par suite le transfert de chaleur.



**FigVI.9** évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire  
17-18/02/2020 en fonction du temps



FigVI.10 évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire  
01-06/03/2020 en fonction du temps



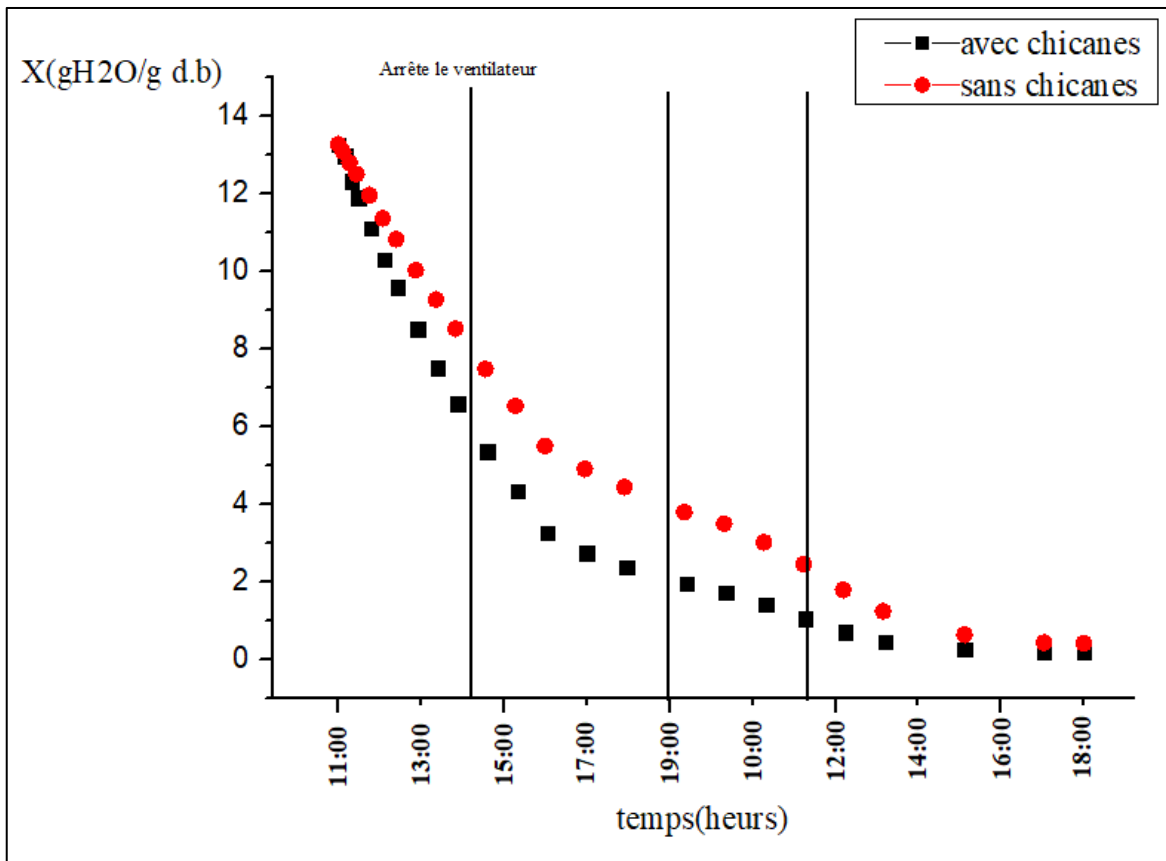
FigVI.11 évolutions de température et d'humidité Relative à l'entrée de l'armoire  
10-15/03/2020 en fonction du temps

## IV.2. Séchage de la carotte et du menthe dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect

**Cas 1** : cinétique de séchage de la carotte le 19 Février 2020

La carotte est coupée en tranches avant d'être placée dans le prototype de séchoir solaire indirect. Un échantillon de 300 g chacun a été prélevé pour le séchage sous le soleil et dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect. Les figures 12 et 14,15 montrent les évolutions la teneur en eau a base sèche en fonction du temps de la carotte pour chaque séchoir (avec chicanes, sans chicanes), sont semblables à ceux obtenus par **Ebru Kavak Akpinar** [29].

- Effet des chicanes



**FigIV.12** évolutions de la teneur en eau base sèche de la carotte en fonction du temps pour **Panier1**

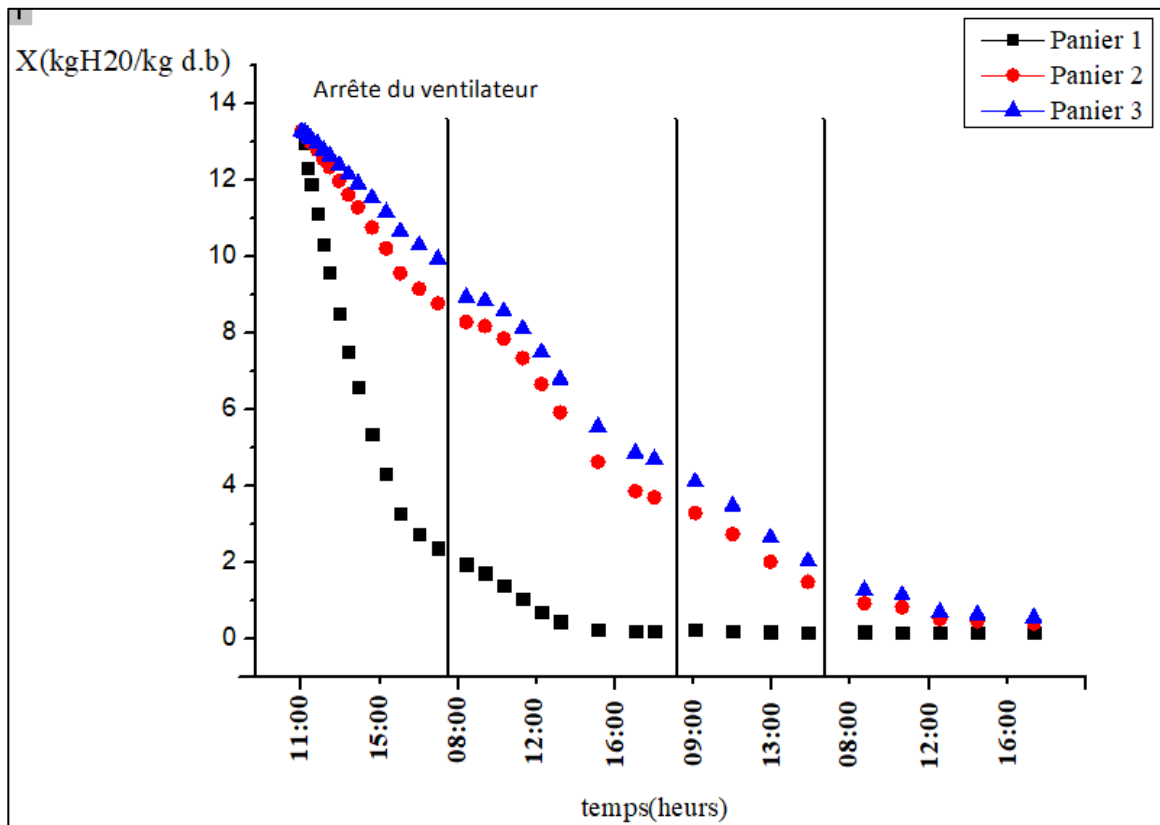
- On remarque une chute de poids ou une évaporation d'eau du produit pendant l'arrêt de fonctionnement du ventilateur (la nuit), le produit disposé sur le séchoir avec chicanes a mis moins de temps pour se sécher (03 jours), En même temps, le produit est disposé sur le séchoir sans chicanes, l'équilibre est atteint après 04 jours de séchage ( $X=0.24$  Kg H<sub>2</sub>O/Kg d.S).

**A****B**

**FigIV.13** Photographies d'échantillons de la carotte après le séchage (**B**) séchoir indirect avec chicanes et (**A**) sans chicanes

• Effet de la position des claies (Panier)

Pour un débit d'air massique pris égale à 50 kg/h, on représente sur la FigIV.14 les résultats expérimentaux des profils de la teneur en eau à base sèche de la carotte disposé sur les trois claies de l'armoire de séchage. On remarque une chute de poids ou une évaporation d'eau du produit pendant l'arrêt de fonctionnement du ventilateur (la nuit). Dans le premier cas, le produit disposé sur la première grille a mis moins de temps pour se sécher (02 jours), alors que dans le second cas, ou le produit est disposé sur la deuxième et la troisième grille, l'équilibre est atteint après 04 jours de séchage, ce qui est normal parce que l'air se charge d'humidité et se refroidit au fur et à mesure qu'il traverse le produit disposé sur les grilles.

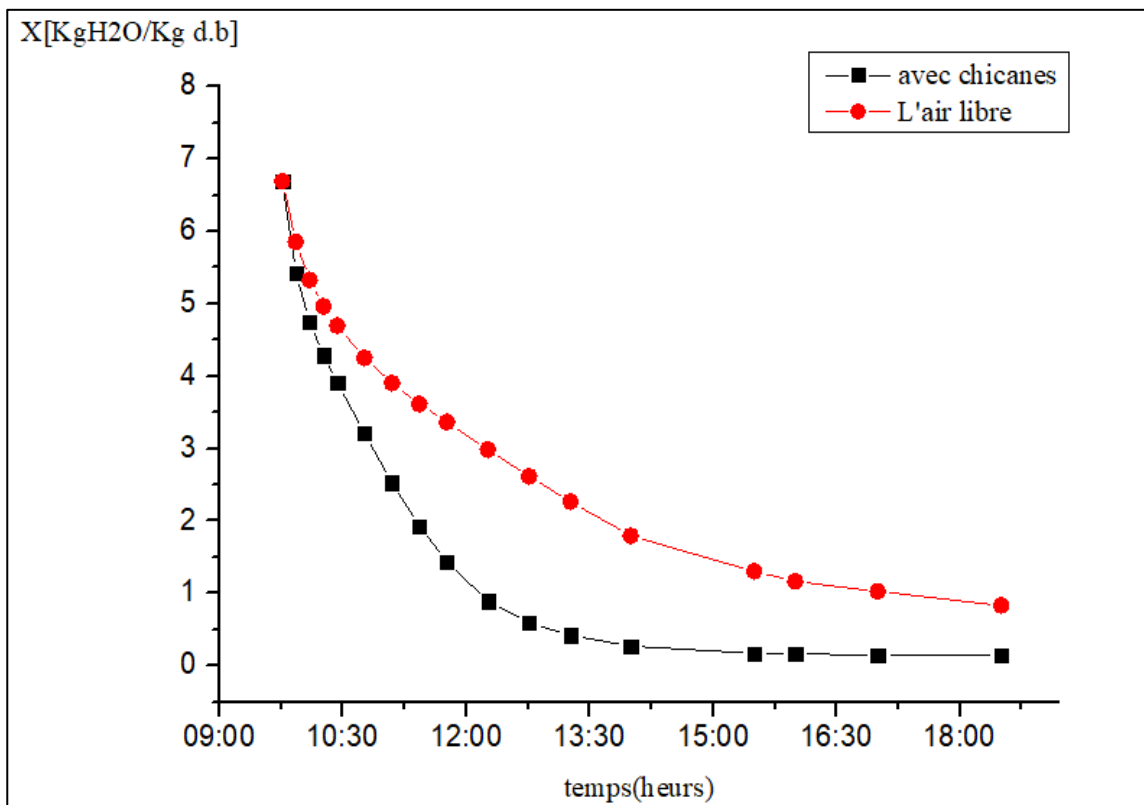


FigIV.14 évolutions de la teneur en eau base sèche de la carotte en fonction du temps pour les trois Panier



**Cas 2** : cinétique de séchage de la menthe le 03 Mars 2020

La Menthe est coupée en tranches et triée avant d'être placée dans le prototype de séchoir solaire indirect. Un échantillon de 50 g chacun a été prélevé pour le séchage sous le soleil et dans le prototype de séchoir solaire indirect avec chicanes. **La Figure 15** montrent les évolutions la teneur en eau a base sèche de L'air libre et séchoir avec chicanes en fonction du temps de la Menthe.



**FigIV.15** évolutions de la teneur en eau base sèche de la Menthe en fonction du temps

- En observant la courbe de séchage, on distingue deux phases. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et un deuxième où cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage.
- Par ailleurs à sécher avec chicanes, la perte en eau contenue dans la Menthe a été très rapide. En atteignant un temps de 120 min, une phase de stabilisation s'installe jusqu'à la fin du séchage. Tandis qu'à l'air libre, le séchage de la masse de menthe est moins rapide ce qui est confirmé par le temps 150 et 180 min avant la phase de stabilisation, L'effet de la vitesse du vent sur le processus de séchage se produit lorsque la teneur en eau à base sèche dans l'échantillon est très importante, Cela explique l'évolution de la masse à l'air libre au début de séchage. Il faut 6h pour sécher avec chicanes pour l'évaporation totale de l'eau contenue dans la matrice végétale, et environ 8h et 11h pour l'échantillon à l'air libre.

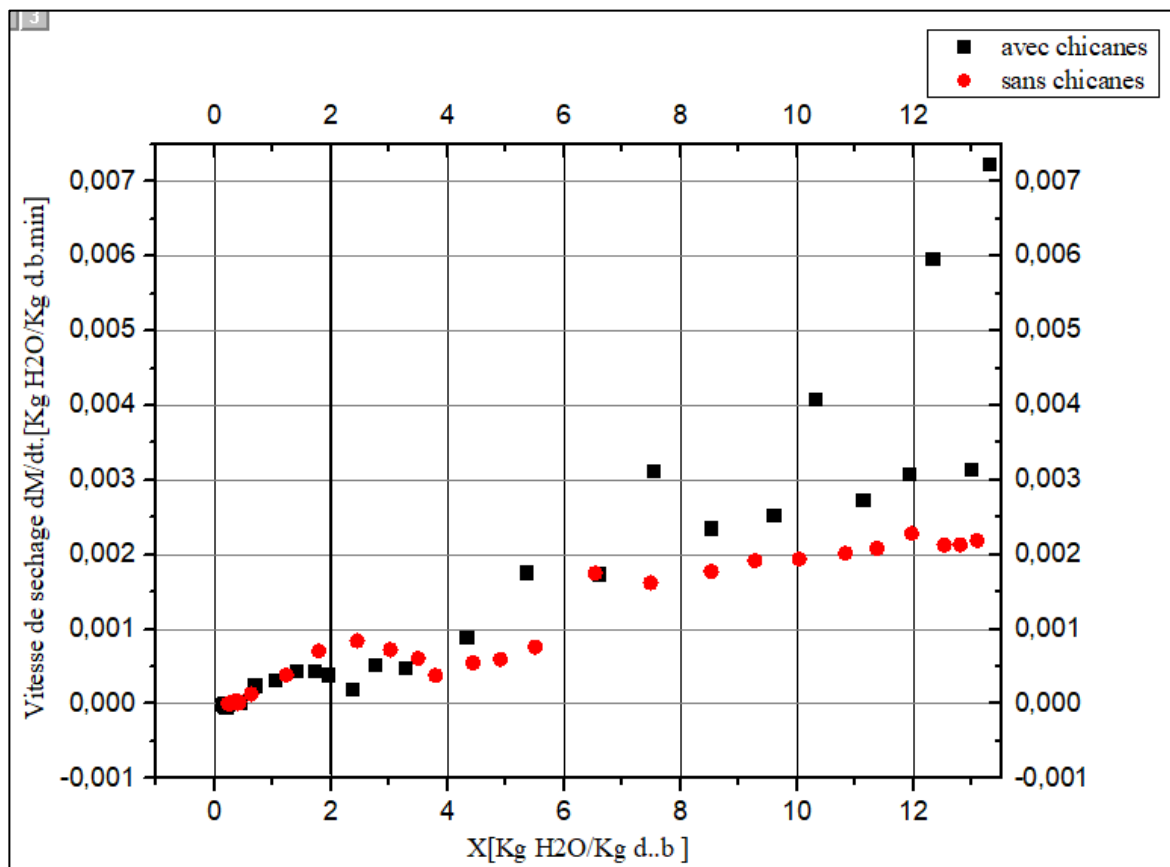


**FigIV.16** Photographies d'échantillons de la menthe après le séchage (A) séchoir indirect avec chicanes et (B) L'air libre

IV.3 la Vitesse de séchage

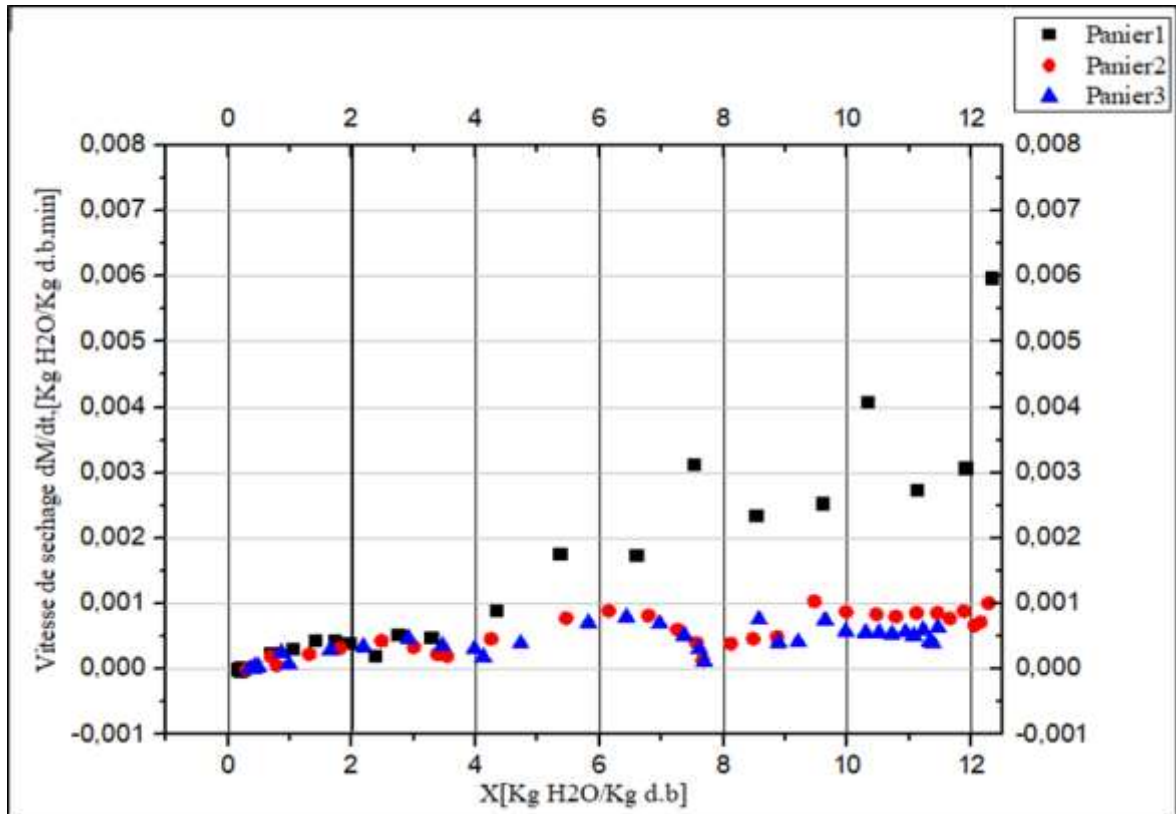
Les variations des vitesses de séchage en fonction de la teneur en humidité pour différentes produits et prototypes de séchage solaire sont illustrées aux *Figures. IV (13,14,15)* pour la *Figure VI.18(A, B, C, D, E)* pour la carotte et la Menthe. Il est évident que le processus de séchage comprenait deux périodes, une période d'accélération et une période de descente, sans période de séchage à vitesse constante. Au début du processus de séchage, la vitesse de séchage augmente rapidement avec la diminution de la teneur en eau et atteint son maximum. Ensuite, le taux de séchage décroît continuellement avec la teneur en eau, et les opérations de séchage se produisent pendant la période de taux de chute. Il a également été noté l'effet de séchage solaire pour les différent clais et séchoirs (avec et sans chicanes) et séchage dans l'air libre sur le taux de séchage, comme les montrent les *Figures. IV (13,14,15)* et *Figure VI.18(A, B, C, D, E)*. Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents [Xiao-Kang, 2012 ; Seyfi S\_evik, 2013].

Par ailleurs, Selon les résultats précédents la cinétique du séchage, l'effet de la vitesse du vent n'est que dans le premier jour, avec l'importance de la température après 33% de teneur en eau, Bien que le type d'échantillon séché différent

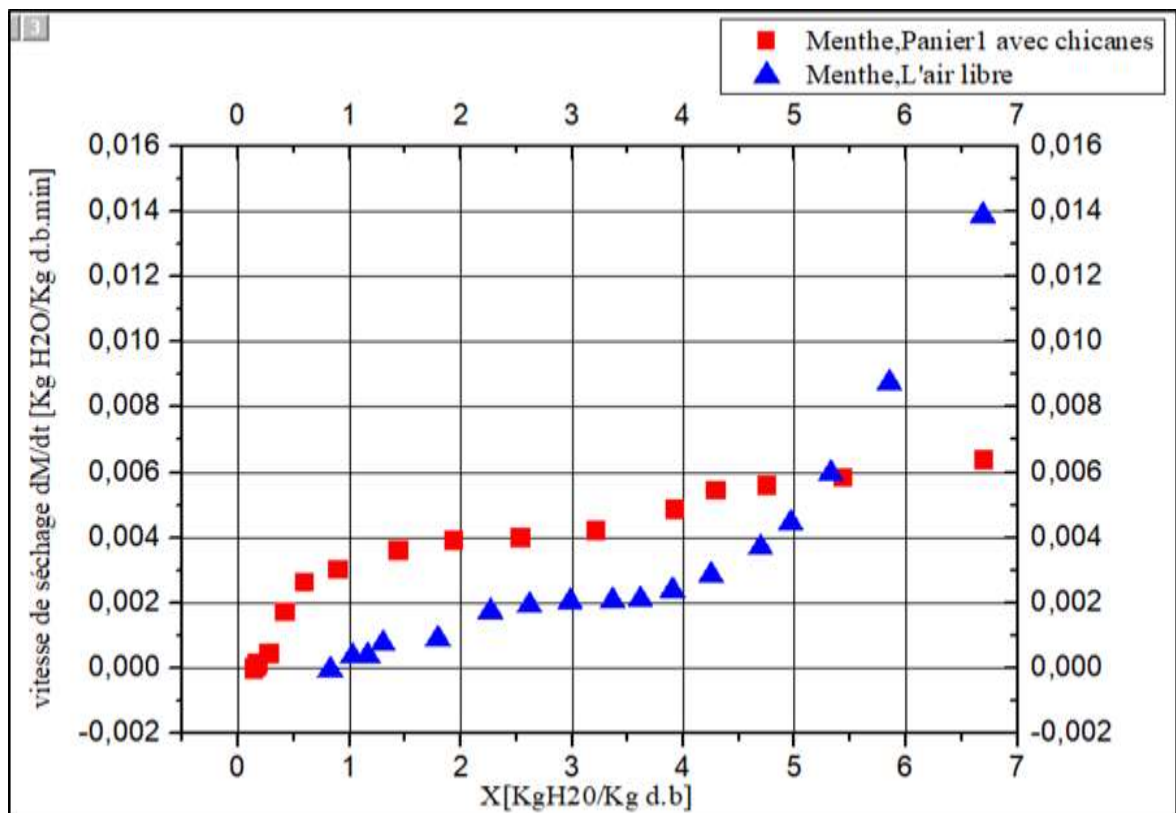


FigIV.17 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la carotte pour les deux séchoirs

Figure 1



FigIV.18 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la carotte a différent Panier (clais)

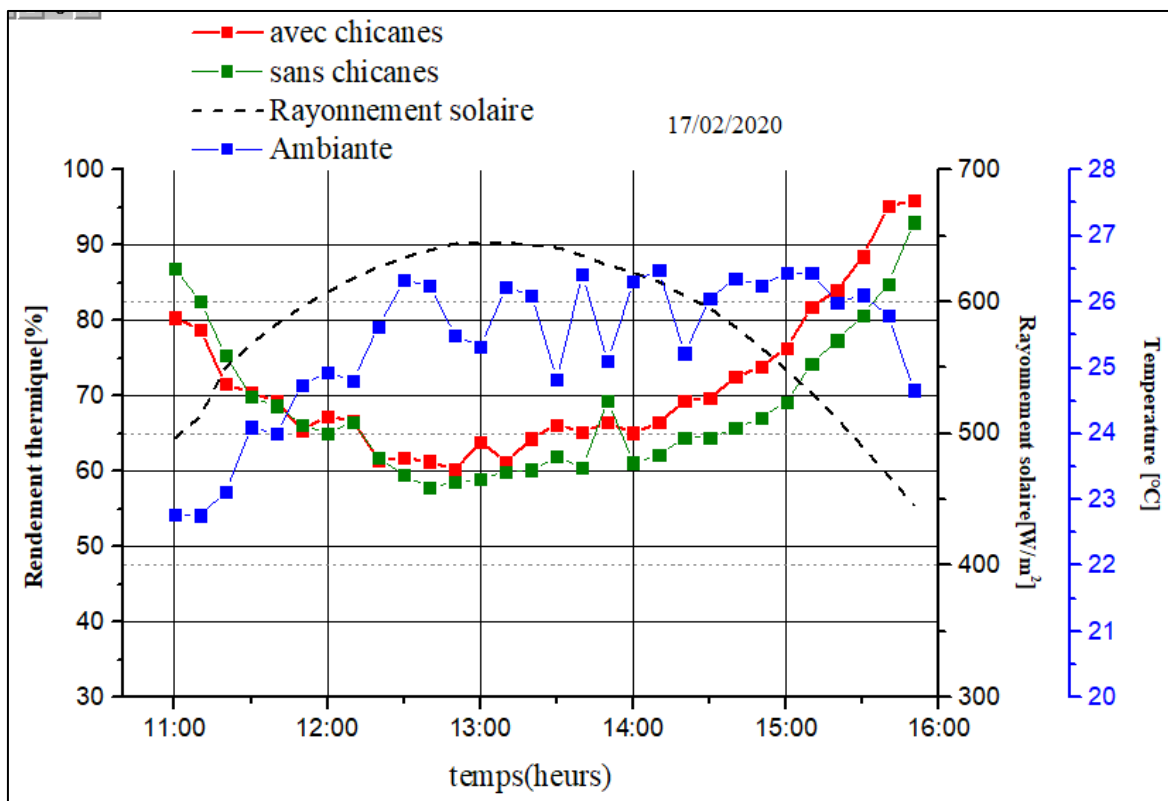


FigIV.19 Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour la Menthe

**IV.4 Performance thermique des deux prototypes de séchoir solaire indirect**

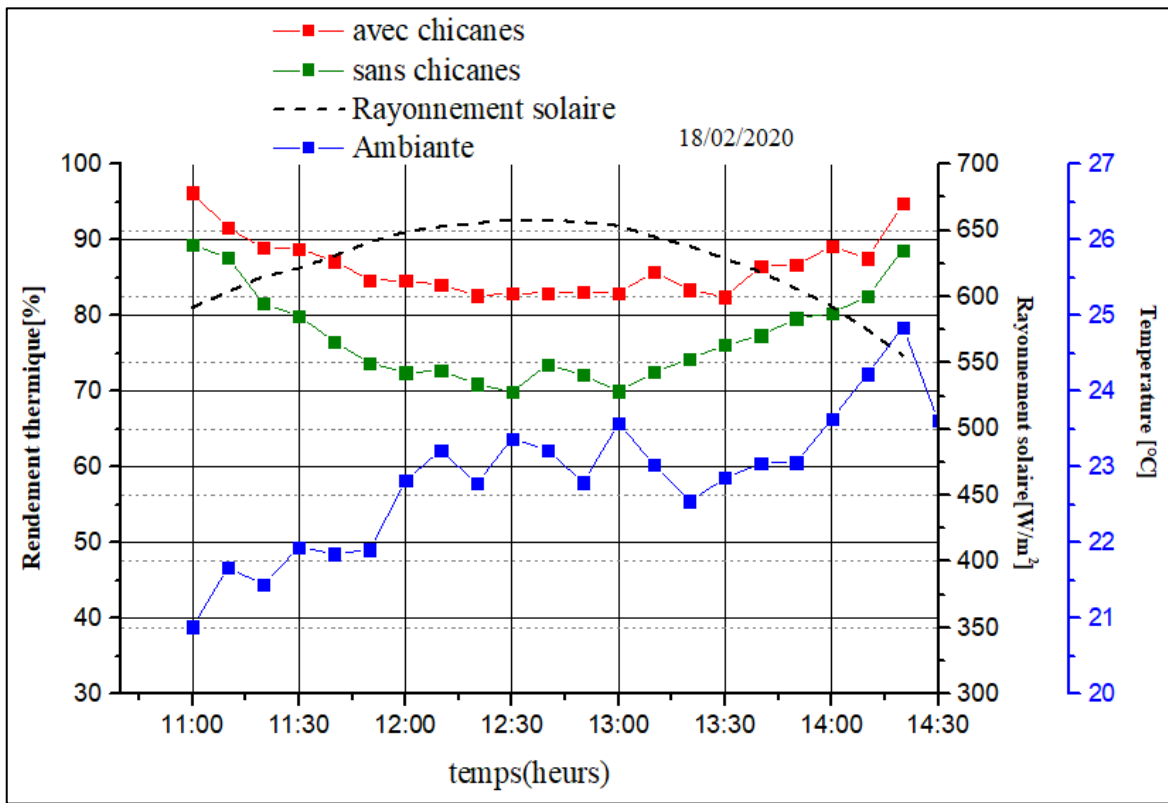
D'après les Figures 20 et 21, pendant les heures du matin, on observe que le rendement des deux capteurs solaire thermique à différent débit (0.015 et 0.02Kg/s) de type avec et sans chicane pour les jours 17 et 18 Février varie respectivement entre 59% et 88%. Entre 11 h 00 et 16 h 00, le rendement du capteur de type 1 était de l'ordre de 60 à 88% et celui du type II de 59 à 80%.

Le rendement thermique augmente à mesure que l'intensité solaire diminue. La température de l'air moyenne et l'intensité du rayonnement solaire autour de 21-27 ° C et 450-650 W/m<sup>2</sup>. On observe l'efficacité thermique de capteur avec chicane a été supérieur a sans chicane en raison de l'effet des chicanes sur la température de sortie par rapport à sans chicane voir (la FigIV.1). Par ailleurs, l'efficacité thermique était relativement importante au jour 18 par rapport au 17 février, ce qui explique l'effet de la température Ambiante, qui était inférieure à celle du premier jour.



**FigIV.20** Variation du rendement thermique de séchoir avec et sans chicane avec l'intensité solaire et Température Ambiante en fonction du temps 17/02/2020

Figure 4



**FigIV.21** Variation du rendement thermique de séchoir avec et sans chicanes avec l'intensité solaire et Température Ambiante en fonction du temps 18/02/2020

#### IV.5. Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince

Afin de déterminer le rapport de teneur en eau en fonction du temps de séchage, dix modèles de séchage de couche mince différents dans le *Tableau IV.1* ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans le *Tableau VI.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 le voir dans le *Tableau VI.1*, par rapport à d'autres modèles, les modèles de (**Diffusion Approximation**) et (**Verma et al**) a donné le meilleur accord entre le taux d'humidité expérimental dans 1ere Panier et dans Le deuxième panier était un meilleur modèle (**Page**) et dans L'air libre était un meilleur modèle (**Two-Terms**) et prévus, car il correspond le mieux aux données expérimentales en premier.

En ce qui concerne les échantillons de menthe, le modèle (**Verma et al**) était meilleur dans un panier1 et le modèle (**Midilli-Kucuk**) était meilleur dans L'air libre.

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	X <sup>2</sup>	
			A	B	C	K1	K2				N
Panier1 avec chicanes	1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model				0,002			0,99874	0,0128	1.6E-4
	2	Page Model				0,002	1.02		0,99876	0,0127	1.6E-4
	3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	1,012			0,002			0,99887	0,0121	1.4E-4
	4	Modied Page Model				0,002	1.02		0,99876	0,0127	1.6E-4
	5	Logarithmic Model	1,010		0,004	0,002			0,9989	0,012	1.4E-4
	6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	1,013	2E-6		0,002		1.001	0,99884	0,0123	1.5E-4
	7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	1,016	6000		0,002			0,99889	0,012	1.4E-4
	8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	1,016			0,002	4.47		0,99889	0,012	1.4E-4
	9	Two-Terms Model	1,005	0.01		0,003	3.6E-4		0,99886	0,012	1.4E-4
	10	Tow-trms Exponential Model	1,001			0,002			0,9987	0,0131	1.7E-4
Panier2 avec chicanes	1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model				0,001			0,98816	0,042	0.001
	2	Page Model				2E-4	1.27		0,99809	0,016	2.8E-4
	3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	1,043			0,001			0,99074	0,037	0.001
	4	Modied Page Model				6E-4	1		0,98207	0,052	0.003
	5	Logarithmic Model	1,02091		-0,04	5E-4			0,98366	0,049	0.002
	6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	0,98	-5E-6		5,6E-4		1,01	0,98262	0,051	0.002
	7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	-6,6E7	1		8,2E4			0,98206	0,052	0.002
	8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	0,982			6,1E-4	4,662		0,98198	0,052	0.002
	9	Two-Terms Model	0,054	0,95		0,01	-6E-4		0,98196	0,052	0.002
	10	Tow-trms Exponential Model	1,433			7,1E-4			0,98253	0,051	0.002



Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>	
			A	B	C	K1	K2				n
L' air libre	1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model				9,8E-4		0,992	0,0341 2	0,001	
	2	Page Model				0,003	0,84	0,99767	0,0184	3,3E-4	
	3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	0,7			9,4E-4		0,99349	0,0307	9,4E-4	
	4	Modied Page Model				0,001	0,001	0,99767	0,0184	3,3E-4	
	5	Logarithmic Model	1,1		0,3	0,001		0,99459	0,0280	7,8E-4	
	6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	1,1	-2E-7		0,004		0,802	0,99796	0,0172	2,9E-4
	7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	0,5	3,684		5,72E-4			0,9983	0,0157	2,4E-4
	8	Verma et al. Model	0,7			9,2E-4	4,62		0,99356	0,0306	9,3E-4
	9	Two Terms Model	0,3	0,67		0,003	6,9E-4		0,9987	0,0137	1,8E-4
	10	Towtrms Exponential Model	0,2			0,003			0,99826	0,0159	2,5E-4

Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la Menthe. Tableau 1

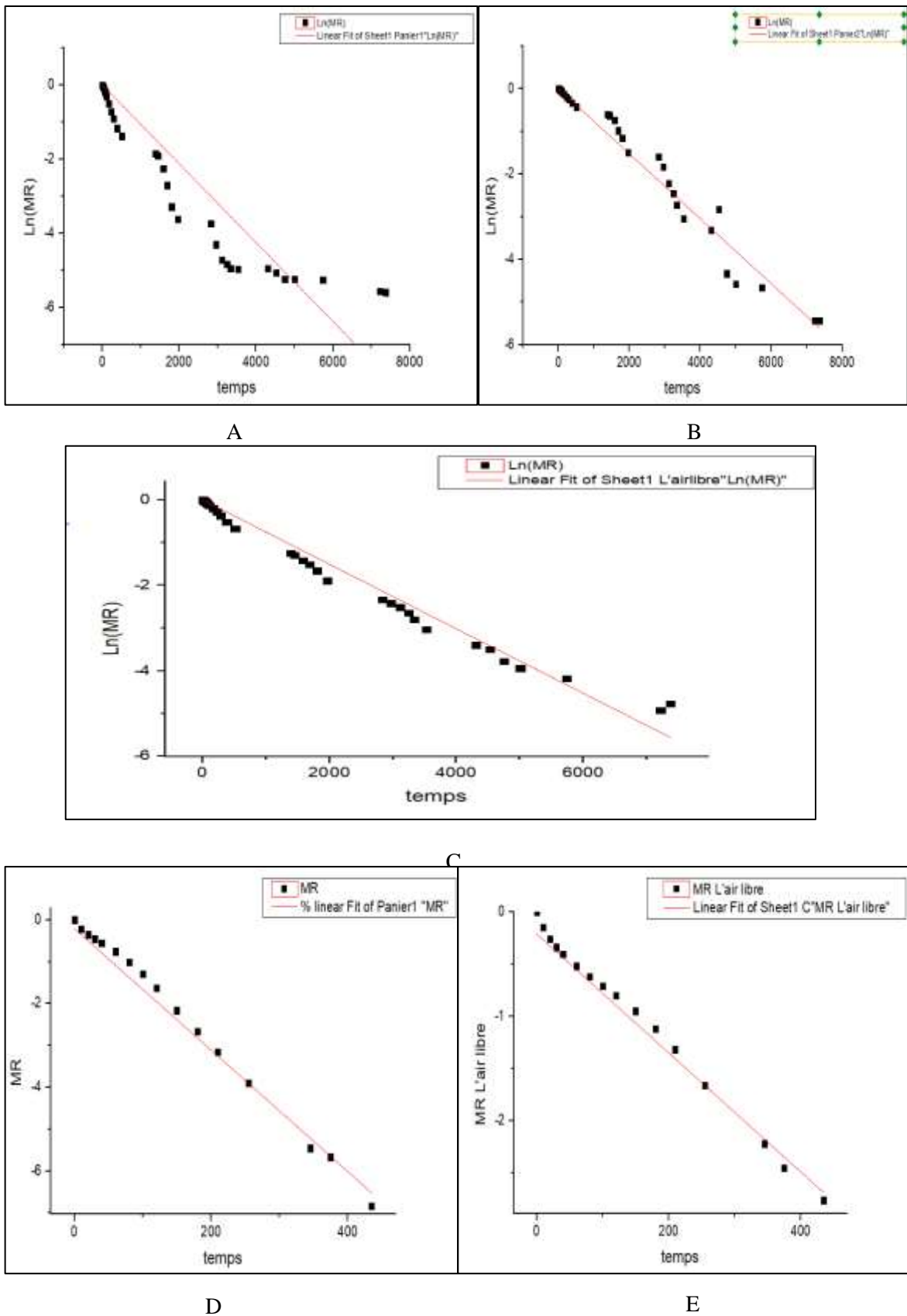
SYSTEME	N°	MODELES	CONSTANTES DES MODELES					R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>	
			A	b	C	K1	K2				n
PANIERI AVEC CHICANES	1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model				0,013		0,99355	0,0263	6,95E-4	
	2	Page Model				0,019	0,92	0,9946	0,0241	5,81E-4	
	3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	0,96			0,013			0,99461	0,0241	5,17E-4
	4	Modied Page Model	0,97	-2,7E-5		0,016	0,95		0,99489	0,0234	5,51E-4
	5	Logarithmic Model	0,96		-0,02	0,012			0,99514	0,0228	5,23E-4
	6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model		0	1,056	0,011	0,75		0,98973	0,0367	0,0013
	7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	1	1		0,013			0,99263	0,0282	7,95E-4
	8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	0,92			0,012	6,03		0,99677	0,0186	3,48E-4
	9	Two Terms Model	0,92	0,0721 3		0,012	8		0,99652	0,0193	3,75E-4
	10	Towtrms Exponential Model	0,99			0,013			0,99116	0,0308	9,53E-4

SYSTEME	N°	MODELES	CONSTANTES DES MODELES					R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>	
			A	b	C	K1	K2				n
L' air libre	1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model				0,0066			0,98034	0,0431	0,00186
	2	Page Model				0,012	0,87		0,98634	0,0359	0,00129
	3	Herdersonand Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	0,93			0,0060			0,98943	0,0316	9,993E-4
	4	Modied Page Model				0,007	1		0,9785	0,0452	0,00205
	5	Logarithmic Model	0,97		0,05	0,0052			0,99119	0,0228	8,3E-4
	6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	0,981	3E-4		0,0206	0,73		0,99583	0,0198	4E-4
	7	DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model	-3E5	1		0,005			0,97805	0,0455	0,00207
	8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	0,9			0,006	6,83		0,99317	0,0254	6E-4
	9	Two Terms Model	0,46	0,46		0,006	0,01		0,98795	0,0337	0,00119
	10	Towtrms Exponential Model	0,084			0,706			0,99076	0,0295	8E-4

**IV.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la carotte et la menthe :**

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 ( $t$ ). D'après l'équation (Eq. 0-2), la pente des droites présentées dans les figures VI.3 A,B,C,D est , avec  $L$  la demi épaisseur des échantillons de la carotte et la menthe.



FigVI.22 Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de la carotte et la menthe

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 les *Tableaux VI.3. VI.4*. Pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives ( $Deff$ ) lors du séchage des échantillons de la carotte et de la menthe ont varié de  $1.45 \times 10^{-9}$  à  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  dans les deux prototypes de séchoir solaire de type séchoirs indirect avec chicanes à différents Paniers ou clairs et dans l'air libre. La diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de carotte séchées dans le (1er panier) de chaleur sensible ( $10.745 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) était supérieure à celle des tranches de carotte séchées dans le (2ème Panier) de prototype. Ainsi que la diffusivité effective de l'humidité dans l'air libre ( $7.15 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ), a été notée comme la limite la plus basse par rapport aux deux paniers (Panier1 et 2). Néanmoins la diffusivité efficace de l'épreuve dans les feuilles de la menthe séchées dans le même prototype avec chicanes 1er panier (Panier1) ( $1.47017 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) était supérieur à celle des séchées dans l'air libre ( $1.8613 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) à cause de la courte durée de séchage des feuilles de la menthe. C'est principalement parce que pendant au milieu du séchage, l'effet de la température est plus important par rapport à la vitesse du vent dans l'armoire avec chicanes (*Figure VI.18.A, B, C, D, E*) et donc la température élevée de l'armoire avec chicanes pourrait accélérer l'évaporation rapide des molécules d'eau présentes dans les feuilles de la menthe, ce qui obtiendrait une valeur plus élevée de la diffusivité efficace.

**Tableau VI.3.** Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la carotte en couche mince

Diffusivité effective moyenne $Deff [m^2s^{-1}]$ <b>Carotte</b>		Valeurs statistiques		
		$R^2$	RMSE	$\chi^2$
Panier1 avec chicanes	10.7E-09	0,93538	0,21213	0,87872
Panier2 avec chicanes	7,22E-09	0,97485	0,38117	0,14529
L'aire libre	7,15E-09	0,99202	0,21213	0,045

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

Diffusivité effective moyenne $Deff$ [ $m^2s^{-1}$ ] <b>Menthe</b>		Valeurs statistiques		
		$R^2$	RMSE	$\chi^2$
Panier1 avec chicanes	1,47017E-09	0,99374	0,24399	0,05953
L'aire libre	0.609E-09	0,97963	0,21258	0,04543

## **Conclusion générale et perspectives**

Deux prototypes de séchoirs solaires de type indirect semblables avec et sans chicanes ont été expérimentés dans différentes conditions météorologiques, afin de tester l'influence de toutes modifications apportées. Dans les mêmes conditions météorologiques, la température moyenne de l'insolateur sans chicanes a atteint 75 °C et celle de l'armoire de séchage a atteint 62.5 °C. Lorsqu'un moyen supplémentaire (chicanes OSF) a été intégré, la température moyenne de l'insolateur a atteint 83° C et celle de l'armoire de séchage a atteint 69.6 °C.

Les performances des deux prototypes de séchoirs solaires de type indirect ont été évaluées en utilisant de la menthe et de la carotte, dans lesquels les teneurs en eau initiales ont été réduites de 87% et 93% à 13 % et 14 %, respectivement, en deux à trois jours. Une meilleure performance du sécheur en termes de vitesse de séchage a été obtenue lorsque le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes OSF. En conséquence, le taux de séchage a augmenté de 13.29% (la menthe) et 15.7 % (la carotte) par rapport au taux de séchage en l'air libre et séchoir solaire sans chicanes OSF. L'efficacité des insolateur étaient de 75% et 65% pour l'insolateur avec et sans chicanes, respectivement. La diffusivité effective de la menthe était de  $(1.47017 \times 10^{-9}) \text{ m}^2 / \text{s}$  alors que pour la carotte, il était de  $10.74 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

Il a été constaté que le séchoir solaire indirect muni de chicanes OSF peut sécher des fruits et légumes à haute teneur en eau initiale, tels que la menthe et la carotte à la valeur recommandée de la teneur en eau pour un stockage sûr dans un délai de deux à trois jours. Le séchoir solaire peut être utilisé même à faible intensité de rayonnement solaire grâce à l'adjonction des chicanes OSF. Par conséquent, il peut fournir un moyen de préserver les produits agricoles qui sont récoltés pendant des périodes à faible intensité de rayonnement solaire.

Les performances du séchoir solaire de type indirect à convection forcée peuvent encore être améliorées en apportant des modifications et en suivant les recommandations ci-dessous :

1. L'espace entre le collecteur et la chambre de séchage doit être réduit au maximum pour éviter les pertes de chaleur.
2. L'intégration d'un dispositif de stockage constitué de canettes en aluminium contenant de la cire de paraffine en dessous de la plaque absorbante améliore nettement les performances de séchoir solaire.
3. Des modifications de conception à la sortie de l'armoire de séchage sont nécessaires pour accélérer la circulation de l'air de séchage vers l'extérieur. Une telle suggestion serait d'installer un diffuseur à la sortie de l'armoire de séchage. Cela aiderait à augmenter la pression à la sortie et éviter la stagnation de l'air à l'intérieur de l'armoire de séchage.
4. Enfin, le développement des techniques de séchage sont bien plus importants que la simple considération du conception type ou de la modélisation. Autrement dit, cette étude mérite d'être poursuivie avec d'autres perspectives (paramétrés, Produits végétales, désignes... etc.).



## Bibliographie :

- [1] **Boulemtafes. A** 2011. le séchage solaire des produits agricoles. Bulletin des énergies renouvelables, à publication du centre de développement des énergies renouvelables, CDER N° 21. [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_021\\_07.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_07.pdf)
- [2] **Goudjal. Y** “Séchage solaire du raisin, variété sultanine” thèse de magister 2005. Institut National Agronomique Alger. Algérie
- [3] **Benseddik. A**, Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée mémoire de magistère énergétique, Université Abou-Bekr belkaid-Tlemcen, 06 Juillet 2011
- [4] **Nasri. M** “ FAISABILITE ET ADAPTATION DES SÈCHOIRS SOLAIRES SOUSLE CLIMAT LOCAL” thèse de doctorat le 14 février 2018. UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI. CONSTANTINE 1 Algérie.
- [5] **Boussalia. A** ‘CONTRIBUTION A L'ETUDE DE SECHAGE SOLAIRE DE PRODUITS AGRICOLES LOCAUX’ thèse de magister le 27/06/2010. UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE Algérie.
- [6] **Khaldi. S** “ Etude numérique du comportement thermique d’un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d’énergie” thèse de doctorat le 23 juin 2018, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie
- [7] **Aumporn. O** “ Contribution à l’étude des performances d’un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase” thèse de doctorat le 7 décembre 2017, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA France.
- [8] **Boughali. S** (2010). Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques (Doctoral dissertation, Université de Batna 2) O. Prakash et A. Kumar “Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems” International Journal of Green Energy · August 2013.
- [9] **Shrivastava. V., Kumar, A., & Baredar, P.** (2014). Développements in indirect solar dryer: a review. *International Journal of Wind and Renewable Energy*, 3(4), 67-74.
- [10] **Pranav C. Phadke, Pramod V. Walke and Vilayatrai M. Kriplani** “ A REVIEW ON Phadke, P. C., Walke, P. V., & Kriplani, V. M. (2015). A review on indirect solar dryers. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(8), 3360-3371.
- [11] **Gaikwad, J. R., & Walke, P. V.** Current Trends in Indirect Solar Dryer: A Review.N.

- [12] **Arfaoui, N., Bouadila, S., & Guizani, A.** (2017). A highly efficient solution of off-sunshine solar air heating using two packed beds of latent storage energy. *Solar Energy*, 155, 1243-1253.
- [15] **Vásquez, J., Reyes, A., & Pailahueque, N.** (2019). Modeling, simulation and experimental validation of a solar dryer for agro-products with thermal energy storage system. *Renewable energy*, 139, 1375-1390.
- [16] **Merlin, K.** (2016). *Caractérisation thermique d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice* (Doctoral dissertation, Nantes).
- [17] **Dufour, T.** (2017). *Optimisation énergétique et environnementale de l'intégration des matériaux de stockage dans les systèmes de réfrigération* (Doctoral dissertation).
- [18] **Verdier-Gorcias, D.** (2016). *Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé* (Doctoral dissertation).
- [19] **Kenda Nitedem, E.** (2017). *Stockage thermique à base d'éco-matériaux locaux pour centrale solaire à concentration : cas du pilote CSP4AFRICA* (Doctoral dissertation, Perpignan).
- [20] **Ango, S. E.** (2011). *Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase* (Doctoral dissertation).
- [21] **Boutaoui, M.** " Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique" diplôme de Master.2016 Université M'Hamed Bougara Boumerdes Algérie.
- [22] **Soupart-Caron, A.** (2015). *Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase* (Doctoral dissertation, Grenoble Alpes).
- [23] **SOUCI, Y.** *Étude de la convection naturelle dans une enceinte avec des parois contenant des matériaux à changement de phase* (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis).
- [24] **GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND** « Amélioration de la conductivité Thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [25] **Oró Prim, E.** (2013). *Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications* (Doctoral dissertation, Universitat de Lleida).
- [26] **Larnicol, M.** « Stocker de la chaleur avec les Matériaux à changement de phase»- Ghislenghien2009.

- [27] **Mehling, H., & Cabeza, L. F.** (2008). *Heat and cold storage with PCM* (Vol. 308). Berlin: Springer.
- [28] **Sharma, S. D., & Sagara, K.** (2005). Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, 2(1), 1-56.
- [29] **Youcef-Ali, S., & Moummi, N.** (2009). Etude expérimentale des séchoirs solaires à plusieurs claies. *Revue des énergies renouvelables*, 273-284.
- [30] **Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y. and Liu, H.** (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220, pp.242-273.
- [31] **Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y. and Liu, H.** (2018). Cet article fournit une revue de l'état de l'art sur les matériaux à changement de phase (PCM) et leurs applications pour le chauffage, le refroidissement et la production d'électricité en fonction de leurs plages de températures de travail de (-20 ° C à + 200 ° C).
- [32] **Khaldi, S** "Etude Numérique Du Comportement Thermique D'un Séchoir Solaire Utilisant Un Lit Thermique Pour Le Stockage D'énergie." Bourgogne Franche-Comté, 2018. Rendement d'une installation solaire thermique - Energie Plus Le Site. (2020). Retrieved 18 August 2020, from <https://energieplus-lesite.be/theories/eau-chaude-sanitaire12/rendement-d-une-installation-solaire-thermique/>.
- [33] **Belghit, A., Belahmidi, M., Bennis, A., Boutaleb, B. C., & Benet, S.** (1997). Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée. *Revue générale de thermique*, 36(11), 837-850.
- [34] **Semmar, D., Betrouni, S., & Lafri, D.** (1998). Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air'. *Revue des énergies renouvelables (CDER)*. Issn, 1112-2242.
- [35] **S. Youcef-Ali, N. Moummi,** ' Etude expérimentale des séchoirs solaires à plusieurs claies ', *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger* (2008) 273 – 28.
- [36] **Jugurta, A. and Jugurta, A.,** 2018. Ethnocentrisme Du Consommateur Et Attitudes Envers Les Produits Étrangers Et Locaux : Etude Auprès Des Consommateurs De La Wilaya De Tizi-Ouzou. *مجلة إقتصاديات شمال إفريقيا*, p.39.
- [37] **Chekroune, M.** (2009). *Etude comparative de deux techniques de séchage (convection et micro-onde) par application des plans d'expérience. Cas du fruit de datte* (Doctoral dissertation, univ-bouira. dz; université bouira; univ bouira).

- [38] **Aumporn, Zeghmati, B., Chesneau, X., & Janjai, S.** (2018). NUMERICAL STUDY OF A SOLAR GREENHOUSE DRYER WITH A PHASE-CHANGE MATERIAL AS AN ENERGY STORAGE MEDIUM. *Heat Transfer Research*, 49(6), 509-528. doi: 10.1615/heattransres.2018020132
- [39] **Atalay, H.** (2019). Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system. *Energy*, 172, 1037-1052.
- [40] **Lazaar, M., Bouadila, S., Kooli, S., & Farhat, A.** (2014). Conditioning of the tunnel greenhouse in the north of Tunisia using a calcium chloride hexahydrate integrated in polypropylene heat exchanger. *Applied thermal engineering*, 68(1-2), 62-68.
- [41] **Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., & Wang, P.** (2014). Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate. *Applied Energy*, 113, 1349-1362.
- [42] **Kabeel, A. E., Hamed, M. H., Omara, Z. M., & Kandel, A. W.** (2018). On the performance of a baffled glazed-bladed entrance solar air heater. *Applied Thermal Engineering*, 139, 367-375.
- [43] **Intawee, P., & Janjai, S.** (2012). Performance evaluation of a large-scale polyethylene covered greenhouse solar dryer. *International Energy Journal*, 12(1).
- [44] **Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C.** (2017). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable energy*, 105, 583-589.
- [45] **Prashant Singh, Shubham Vyas & Avadhesh Yadav,** (2018) : Experimental comparison of open sun drying and solar drying based on evacuated tube collector, *International Journal of Sustainable Energy*, DOI: 10.1080/14786451.2018.1505726
- [46] **Zhu, T. T., Zhao, Y. H., Diao, Y. H., Li, F. F., & Quan, Z. H.** (2017). Experimental investigation and performance evaluation of a vacuum tube solar air collector based on micro heat pipe arrays. *Journal of cleaner production*, 142, 3517-3526.
- [47] **Jannot, Y.** (2005). L'air humide. *Laboratoire Energétique et Phénomène de Transfert (LEPT)*.

## المخلص :

الهدف من هذا العمل هو تجرية نموذجين أوليين لمجففات شمسية غير مباشرة مع الحمل القسري. الأول عبارة عن مجفف شمسي غير مباشر بدون حواجز والثاني به حواجز (OSF (Offset Strip Fins)). يتم اختبار النموذجين الأوليين للمجفف الشمسي وتحليلهما تجريبيا في وحدة أبحاث الطاقات المتجددة التطبيقية (URAER) غرداية، الجزائر في ظل ظروف مناخية في المنطقة. حولت الدراسة بشكل أساسي في حل مشكلة أن مجففات الطاقة الشمسية تعمل بكفاءة فقط عندما يكون هناك طاقة شمسية كافية. لذلك، تم تضمين وسيلة إضافية لزيادة نقل الحرارة (حواجز OSF) بحيث يمكن للتجفيف أن يعمل بشكل جيد خلال فترات الطاقة الشمسية المنخفضة. تم إجراء اختبارات مختلفة من أجل تقييم أداء النموذج الأولي لمجفف شمسي غير مباشر بالحمل القسري. لم يتم إجراء أي اختبار حمل، أي بدون الاحتفاظ بأي مادة حتى تجف، وأشار إلى أن درجة الحرارة يمكن أن ترتفع إلى 87 درجة مئوية في المجفف الشمسي غير المباشر مع حواجز و80 درجة مئوية في المجفف الشمسي غير المباشر بدون حواجز. كان متوسط درجة الحرارة المسجلة للعوازل مع وبدون حواجز 80 درجة مئوية و75 درجة مئوية على التوالي. كما تم تقييم أداء المجففات الشمسية غير المباشرة بالحمل القسري باستخدام النعناع والجزر. بالنسبة للاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها، تضمنت معايير الأداء المستخدمة في التقييم درجات حرارة الهواء في مواقع مختلفة من المجفف الشمسي النموذجي، وحركية التجفيف، والانتشار الفعال والكفاءة الحرارية. تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف الطبقة الرقيقة للنعناع والجزر. أظهرت النتائج أن نماذج Diffusion Approximation (Two-Terms, Midilli-Kucuk) (Verma et al, Page) هي الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي للمنتجين اللذين تم تجفيفهما في عمليات تجفيف شمسي مختلفة. انخفض محتوى الماء في النعناع والجزر من 87% إلى 93% و11% و12% على التوالي في يومين إلى ثلاثة أيام. باستخدام المجفف الشمسي غير المباشر بدون حواجز، كان انتشار النعناع الفعال  $1.47 \times 10^{-9}$  متر مربع / ثانية بينما كان للجزر  $10.74 \times 10^{-9}$  متر مربع / ثانية. تم العثور على هذه القيم لتكون  $1.45 \times 10^{-9}$  متر مربع / ثانية و  $10.74 \times 10^{-9}$  متر مربع / ثانية، على التوالي للنعناع والجزر، عندما تم إجراء التجفيف الشمسي باستخدام المجفف الشمسي غير المباشر مع حواجز. كانت كفاءة العازل 70% و60% للعازل مع وبدون حواجز على التوالي.

**الكلمات الدالة :** تجفيف الفاكهة والخضروات، عمليات التجفيف الشمسي، حركيات التجفيف، السلوك الحراري، مواد التخزين المختلفة.

## Résumé :

L'objectif de ce travail est l'expérimentation des deux prototypes de séchoirs solaires indirects à convection forcée. Le premier c'est un séchoir solaire indirect sans chicanes et le deuxième avec chicanes OSF (Offset Strip Fins). 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.

L'étude a principalement tenté de résoudre le problème lié au fait que les séchoirs solaires ne fonctionnent efficacement que lorsqu'il y a suffisamment d'énergie solaire. Par conséquent, un moyen supplémentaire d'augmenter le transfert de la chaleur (chicanes OSF) a été inclus afin que le séchage puisse être performant pendant les périodes à faible énergie solaire. Différents tests ont été réalisés afin d'évaluer les performances du prototype de séchoir solaire indirect à convection forcée. Aucun test de charge, c'est-à-dire sans garder aucun matériau à sécher, n'a été effectué et il a été indiqué que la température pouvait monter jusqu'à 87 °C dans le séchoir solaire indirect avec chicanes et 80 °C dans le séchoir solaire indirect sans chicanes. La température moyenne enregistrée des isolateurs avec et sans chicanes était de 80°C et 75 °C respectivement. Les performances des séchoirs solaires indirects à convection forcée ont également été évaluées en utilisant de la menthe et de la carotte. Pour les différents tests effectués, les paramètres de performance utilisés pour l'évaluation comprenaient les températures de l'air à différents endroits de prototype de séchoir solaire, la cinétique de séchage, la diffusivité effective et le rendement thermique. Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la menthe et la carotte. Les résultats ont montré que les modèles de (Diffusion Approximation, Verma et al, Page, Two-Terms, Midilli-Kucuk) étaient les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire des deux produits dans différentes procédures de séchage solaire.

La teneur en eau de la menthe et de la carotte a été réduite de 87% et 93% à 11% et 12%, respectivement, en deux à trois jours. En utilisant le séchoir solaire indirect sans chicanes, la diffusivité effective de la menthe était de  $1.47 \times 10^{-9}$  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  $1.45 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s et  $10.74 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, respectivement pour la menthe et la carotte, lorsque le séchage solaire était effectué avec le séchoir solaire indirect avec chicanes. L'efficacité des isolateurs était de 70% et 60% pour l'isolateur avec et sans chicanes, respectivement.

**Mots clés :** séchage des fruits et légumes, procédés de séchage solaire, cinétique de séchage, comportement thermique, différents matériaux de stockage.

## Abstract :

The aim of this work is primarily testing the two indirect prototypes of solar drying at forced convection, the first is an indirect solar dryer with OSF (Offset Strip Fins) and the second without OSF. Both of solar drying systems are experimentally tested and analyzed at the Applied Energies Research Unit of (URAER) Ghardaia, under real meteorological conditions region. The study mainly tries to address the problem of the fact that solar dryers Efficiently functions when there is enough solar energy. Consequently, to increase heat transfer (OSF baffles) has been included so that the drying process is able to be performed during periods of fable solar energy. In order to study the indirect solar dryer performance at forced convection, different tests were realized. Without any charge testing, i.e. without keeping any material out of the drying process, it wasn't accomplished and it indicated that the temperature can rise up to 87 °C in indirect solar drying using OSF and 80 °C in the indirect solar drying without OSF. The recorded temperature of the insulators with and without baffles was respectively between 80°C and 75 °C. The performance of indirect solar dryers at forced convection was also evaluated through the use of mint and carrots. For the different accomplished tests, the parameters of performance used are the air temperature at several points of the solar drying prototype, the drying kinetic, the effective diffusion and the thermal efficiency. Ten mathematical models were used to describe the drying kinetic into a thin layer of mint and carrots. The results indicated that (diffusion approximation, verma et al, page, twoterms , midilli - kucuk) Was the most suitable and appropriate to describe the solar drying process of two different dried products in different solar drying operations. The moisture content of mint and carrot was respectively reduced from 87% and 93% to 11% and 12%, in two to three days. Using the solar dryer without OSF, the diffusion effectiveness of mint was  $1.47 \times 10^{-9}$  while for carrot it was from  $10.74 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. These values were confirmed as  $1.45 \times 10^{-9}$  and  $10.74 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, for the indirect solar dryer with OSF. The efficiency of the insulators was respectively of 70% and 60% for insulator with and without OSF.

**Key words:** fruits and vegetables drying, the processes of drying, drying kinetic, Thermal behavior, different storage materials.