



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهرو ميكانيك

Département d'Automatique et Electromécanique

## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électromécanique

Spécialité : Energies Renouvelables

**Thème : *Etude expérimentale et comparaison des performances d'un séchoir solaire indirect avec et sans système de stockage d'énergie thermique***

Soutenue publiquement le 17/06/2021

Par :

**HOUDJEDJE Zakaria & REFFIS Bahmed**

Devant le jury composé de:

<b>BOUAROUR Kamel</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>Univ. Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>YETTOU Fatiha</b>	<b>Maître de Recherche A</b>	<b>URAER. Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>BENSEDDIK Abdelouahab</b>	<b>Maître de Recherche A</b>	<b>URAER. Ghardaïa</b>	<b>Encadreur</b>
<b>HAMDOUNE Ghania</b>	<b>Ingénieur chargé d'études</b>	<b>URAER. Ghardaïa</b>	<b>Co- Encadreur</b>

Année universitaire 2020/2021

# Dédicace

*Grâce à Dieu tout uissant, je dédie ce modeste travail à  
touts les personnes qui m'ont aidé de près*

*ou de loin à la réalisation de*

*ce mémoire de masterplus  
particulièrement :*

*A m es très chers parents,*

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

*A m es très chers frères, mes sœurs.*

*A toute ma famille. Et a tous mes amis.*

*A tout m es enseignants.*

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

*HOUDJEDJE Zakaria*

## *Dédicace*

*Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très  
Miséricordieux.*

*Je dédie ce travail à....*

*A ma Chère Maman*

*et à mon chère papa*

*Pour tous ses sacrifices, sons amours, ses tendresses,  
sons soutiens et ses prières tout au long de mes études,*

*A mon chère conjoint*

*et tous mes chères enfants*

*Pour tous ses sacrifices, ses amours, ses tendresses, ses  
soutiens.*

*A mon chère Frères et mes sœurs*

*Pour leurs encouragements permanents, et leur  
soutien moral,*

*A toute ma famille pour leur soutien  
tout au long de mon parcours académique,*

*A mon binôme Zakaria houdjedj et*

*tous mes amis*

*A tous ceux qui m'ont étudié et contribué à mon éducation.*

*Bahmed REFFIS*

# 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

**Dr: BENSEDDIK Abdelouahab**

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. et 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.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à **Mr. BENSAHA Abdelhamid**, **Mr. BENSAHA Houcine** et **Mr. BEN ABDERRAHMANE Mahfoud**, qui était à nos côtés dans la mise en œuvre et la réalisation du projet sur le terrain.

Nos vifs remerciements vont également à tous les professeurs et les docteurs qui nous ont accompagnés tout au long des années d'études du Département Electrotechnique pour leurs encouragements, aide, conseils et critiques constructives, qui nous ont permis de terminer ces années académiques dans les meilleures conditions.

Chers membres de la famille, parents et amis, je vous remercie tous pour votre soutien, votre participation et vos encouragements continus tout au long des années d'études.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE :	1
I.1 Le Séchage.....	5
I.1.1. Définition :	5
I.1.2. Pourquoi le séchage ?	5
I.1.3. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire:	5
I.1.4.Séchage et énergie :	6
I.1.5. Caractéristiques des solides humides:	6
I.1.5.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche):	7
I.1.5.2. Humidité relative (teneur en eau):	7
I.1.5.3. Teneur en eau :	8
I.1.5.4. Activité de l'eau dans un produit :	8
I.2. Séchage des produits agricoles :	10
I.2.1. Mode de séchage:	10
I.2.2 Histoire du séchage solaire :	10
I.2.3. les différents types des séchoirs solaires :	10
I.2.3.1. Les séchoirs naturels :	11
I.2.3.2. Les séchoirs solaires directs :	12
I.2.3.3. Les séchoirs solaires indirects :	13
I.2.3.4. Les séchoirs solaires tunnels:	14
I.3. Les capteurs solaires :	15
1.3.1. Capteurs plans :	15
I.3.2.Capteurs concentrateurs :	16
I.4.Travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires :	17
II.1.Le stockage thermique :	33
II.2.MODE DE STOCKAGE DE CHALEUR :	33
II-2.1.Storage par chaleur sensible :	33
II-2.2 Stockage par chaleur latente :	34
II-2.3 Stockage thermochimique :	35
II.3.STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE :	36

II.3.1 Matériaux à changement de phase (MCP) :	36
II-3.2 Caractéristiques d'un MCP idéal (MCP) :	36
II-3.2.1. Propriétés thermodynamiques et thermiques:	36
II-3.2.2. Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) :	37
II.3.3. Classification des matériaux à changement de phase :	37
II.3.3.1. MCPs organiques :	38
III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER :	35
III.1.1.1 Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins):	35
III.1.1.2. Capteur solaire à air avec roches:	37
III.1.1.3. Capteur solaire à air avec cannettes:	37
III.1.1.4. L'armoire de séchage :	39
III.1.2. Modification du séchoirs solaires et de la salle de séchage :	40
III.1.3. Instrumentation des prototypes :	40
III. 1.3.1. Mesure des températures :	40
III.1.3.2. Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :	42
III.1.3.3. Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage :	43
III.1.3.4 Acquisition et traitement des données :	44
III.1.3.5. Channel Température Recorder PCE-T 1200 Caractéristiques :	45
III.1.4. MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER :	46
III.1.4.1. Dessiccateur :	46
III.1.4.2. Etuve :	47
III.1.4.3. Balance :	47
III.1.4.4. Agitateur Magnétique Chauffant :	48
III.1.4.5. Béchers :	48
III.5. MATERIEL VEGETAL :	49
III.5.1. Le basilic :	49
III.5.2. Le Persil :	49
III.5.3. La coriandre :	50
III.5.4. La tomate :	50
III.6. Protocole de séchage :	51
III.6.1. Préparation de l'échantillon de basilic :	51

III.6.2.Préparation de l'échantillon de la tomate : .....	52
III.6.3.Détermination de la teneur en eau initiale : .....	55
III.7. Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) pauvre en ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) :.....	55
III.8. Préparation de matériaux à changement de phase paraffine :.....	57
III.9. Modélisation des cinétiques de séchage : .....	58
IV.1 RESULTATS ET DISCUSSION : .....	63
IV.1.2. Performance thermique de prototype de séchoir solaire indirect sans produits : .....	63
IV.1.2.1. Test N°01 : du 26 au 27-05-2021 .....	63
IV.1.2.2.Test N°02 : du 12 au 13-05-2021 .....	66
IV.1.3 SECHAGE DE LE BASILIC, LA TOMATE .....	74
IV.1.3.1 Courbes de séchage .....	74
Conclusion générale et perspectives .....	77
Bibliographie : .....	79

## Liste des Figures :

Fig 1.1: Description du solide humide	07
Fig 1.2 Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau	09
Fig 1.3.a : schéma du séchage solaire en plein air	11
Fig 1.4.b : schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle	13
Fig 1.5.c : schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée	13
Fig 1.6: schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle	14
Fig 1.7: schéma d'un séchoir solaire tunnel	15
Fig 1.8.a : Schéma d'un capteur plan à air	16
Fig 1.9.b : Schéma d'un capteur plan à air	16
Fig 1.10: Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur	17
Fig 1.11: Schéma d'un séchoir solaire avec stockage thermique	18
Fig 1.12: Schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle	19
Fig 1.13. Schéma de principe d'un sécheur solaire à convection forcée en mode mixte	20
Fig 1.14. Schéma de principe d'un sécheur solaire à convection naturelle en mode mixte	20
Fig 1.15. Configuration du sécheur solaire	21
Fig 1.16. Brochette en bois	21
Fig 1.17. Séchoir en armoire ventilé par vent solaire	22
Fig 1.18. Schéma de principe du sécheur tunnel solaire intégré au réchauffeur d'air solaire	23
Fig 1.19. (a) Schéma du sécheur solaire intégré à déshydratant.	24
Fig 1.19. (b) Vue illustrée du montage expérimental	24
Fig.I.20 Sécheur à lit compact avec aérotherme solaire multi passe avec système de stockage et réflecteur	25
Fig.I.21 Sécheur avec aérotherme solaire multi passe avec système de stockage	26
Fig.I.22. (a) Diagramme schématique du montage expérimental. (b): Montage expérimental.	27
Fig.I.23. Schéma de principe des plateaux de la chambre de séchage et du conteneur PCM dans l'unité de séchage.	27
Fig.I.24. Sécheur hybride solaire.	28
Fig.I.25. Panneau solaire.	29
Fig.I.26. Chambre de séchage avec champignons	29
Fig.I.27. Accumulateur d'énergie solaire	30
Fig.I.28 Vue de dessous de la plaque absorbante avec ailettes décalées	31
Fig.I.29 Schéma de principe de la vue de dessous de la plaque absorbante fixée avec des ailettes décalées (Auto-CAD 2007).	31
Fig. II.1: Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	34
Fig.II.2. Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.	35
Fig.II.3. Classification des matériaux à changement de phase	36
Fig.III.1. Dessin technique des composants du capteur *S*	35
Fig.III.2 dimensionnements des chicanes	36
Fig.III.3. capteur solaire avec chicanes	36
Fig.III.4 capteur solaire avec roches	37
Fig.III.5. capteur solaire avec cannetes	38



FigIII.6 capteurs solaires avec cannettes et avec chicanes	38
FigIII.7. Photographie d'une armoire de séchage (frigo)	39
FigIII.8.les séchoirs solaires de type indirect expérimentés	39
FigIII.9.(A).état initial	40
FigIII.10.(B).état final	40
FigIII.11 Position des thermocouples dans l'armoire de séchage (Frigo)	41
FigIII.12.Position des thermocouples dans les séchoirs solaires	42
FigIII.13. Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, température et d'humidité relative de l'air ambiant	43
FigIII.14.Anemometer Test o 440 + thermo-hygromètre T esto 610	43
FigIII.15.ventilateur utilisé pour aspirer l'air du capteur solaire vers chambre de séchage	44
FigIII.16. Photographie de système d'acquisition et de traitement des données	44
FigIII.17.le système d'acquisition et de traitement des données par keithley 2701	45
FigIII.18.Acquisition et de traitement des données-Recorder PCE-T 1200-	46
FigIII.19.Photographies de dessiccateur utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale	46
FigIII.20 Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche	47
Fig.III.21.Balance KERNABT 220-4M: 20g/0,1m	47
FigIII.22Balance KERN PCB 3500-2: 3500g/	47
FigIII.23 Agitateur Magnétique Chauffant utilisé au laboratoire	48
FigIII.24.Becher utilisé au laboratoire	48
FigIII.25.Le basilic	49
FigIII.26.Le Persil	49
FigIII.27.La coriandre	50
FigIII.28.La tomate	50
FigIII.29.quantités de basilic à séchée dans l'armoire de séchage (Frigo)	51
FigIII.30.Schéma représentant le protocole de séchage de le basilic	52
FigIII.31.quantités de tomate à séchée dans l'armoire de séchage (Frigo)	53
FigIII.32.Schéma représentant le protocole de séchage de la tomate	54
FigIII.33.pesé de l'eau (200g)	56
FigIII.34. pesé de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (392g)	56
FigIII.35. mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau	56
FigIII.36 : Matériau préparé pour le stockage de l'énergie thermique remplissage des cannettes par chlorure de calcium( $\text{CaCl}_2,6\text{H}_2\text{O}$ )	56
Fig.III.37.paraffinesoide	57
Fig.III 38.dégivrer paraffine Verser dans les cannetes	57
FigIII .39:Outillages de travail	58
FigIII.40: Etat final	59
Fig IV.1 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).	64
FigIV.2 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire	64

de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B)	
Fig IV.3: Evolution des températures T3, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.2) pour les journées du 26 au 27 Mai 2021	65
Fig IV.4 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).	66
Fig IV.6 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B).	66
Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.2) pour les journées du 12 au 13 Mai 2021	67
Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.2) pour les journées du 26 au 27 Mai 2021	68
Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.6) pour les journées du 17 au 18 Mai 2021	69
Fig IV.7 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).	70
Fig IV.8 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B).	70
Fig IV.9: Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.2) pour les journées du 06 au 06 Juin 2021	71
Fig VI.10 Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits	75

***Liste des tableaux :***

Tableau.II.1: Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latente	35
Tableau II-2: Caractéristique de quelques MCPs organiques	39
Tableau III.1 :Températures des fusions des Matériaux obtenus et $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	57
Tableau III. 2 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces	60
Tableau VI.4. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de tomate en couche mince	67
Tableau VI.5. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de basilic en couche mince	77

## NOMENCLATURE

$m$	: Masse	Kg
$C_p$	: Chaleur spécifique	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$
$m$	: masse du MCP	Kg
$m_{prs}$	: masse du produit à sécher	Kg
$M$	: masse du matériau	Kg
$Q$	: Chaleur Sensible	J
$\Delta T$	: la variation de température	K
$T_i$	: Température initiale	K
$T_m$	: Température de fusion du MCP	K
$T_f$	: température finale respectivement	K
$MR_{pré}$	: la teneur en eau issue de prédite	
$MR_{exp}$	: la teneur en eau issue de l'expérience	
$M_0$	: les valeurs de la teneur en eau initiale	Kg eau /Kg MS
$M_{ep}$	: la teneur en eau d'équilibre finale	Kg eau /Kg MS
$MR$	: la teneur en eau réduite	Kg eau /Kg MS

### Lettre grecques :

$RMSE$	: la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
$N$	: nombre d'observations
$n$	: nombre de constantes du modèle
$T$	: le temps
$D_{eff}$	: la diffusivité effective
$L$	: la demi d'épaisseur de la tranche
$X^2$	: khicarré réduit
$R^2$	: coefficient de corrélation

## ملخص :

كانت أهداف هذه الدراسة هي التحقيق بشكل نسبي في تأثير استخدام مواد تغيير الطور (PCM)

والصخور والحواجز كوسيلة لتخزين الحرارة وخلق الاضطراب من أجل تحسين الأداء الحراري لنماذج المجففات الشمسية من النوع غير المباشر. تم إجراء الاختبارات بثلاثة معدلات تدفق للكتلة الهوائية من 2.28 إلى  $1104 \text{ PCM} / \text{كجم} / \text{ساعة}$ . تم اختبار مواد تخزين الحرارة في شكلين ، والحساسية (الصخور) في النموذج الأولي للمجفف الشمسي. تم استخدام المجفف الشمسي النموذجي الثاني المزود بحواجز للمقارنة. إن استخدام الصخور كوسيلة لتخزين الحرارة وخلق اضطراب في تيار الهواء المتحرك بين العزل والممتص يقلل بشكل كبير من وقت التجفيف ، مع تقليل انخفاض الضغط اللحظي بشكل طفيف ، ويسمح كانت مقارنة السلوك الحراري اليومي بين النماذج الأولية للمجففات الشمسية من بزيادة درجة حرارة التجفيف النوع غير المباشر مع الصخور لصالح النموذج الأولي للمجفف الشمسي ذي الحواجز عند القيم العالية. بالنظر PCM إلى السلوك الحراري اليومي ، فإن النماذج الأولية للمجففات الشمسية من النوع الصخري غير المباشر مع تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية. تكون أكثر كفاءة ، خاصة عند معدلات التدفق الكتلي العالية الأسي Two-Terms و Midilli-Kucuk تجفيف الطبقة الرقيقة للطماطم والنعناع. أظهرت النتائج أن نموذجي كانا الأنسب لوصف عملية تجفيف الطماطم بالطاقة الشمسية في نموذجين أوليين لمجففات الطاقة الشمسية غير Logarithmic و Midilli-Kucuk والصخور والحواجز والهواء. ومع ذلك ، فإن نماذج PCM المباشرة مع كانت الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي للرياح

الكلمات المفتاحية: تجفيف المنتجات الغذائية. مجفف شمسي غير مباشر أداء التجفيف الحركي الحراري ؛ النماذج الرياضية

## Résumé :

Les objectifs de cette étude étaient d'étudier de manière comparative l'effet de l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM), de la roche et des chicanes comme moyenne de stocker la chaleur et de créer la turbulence afin d'améliorer les performances thermiques des prototypes de séchoir solaire de type indirect. Les tests ont été effectués à trois débits massiques d'air de 2.28 à 1104 kg/h. Les matériaux de stockage de chaleur ont été testés sous deux formes, PCM (paraffine wax et  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) et sensible (roche) dans le premier prototype de séchoir solaire. Le deuxième prototype de séchoir solaire muni des chicanes a été utilisé à titre de comparaison. L'utilisation de roche comme moyenne de stocker la chaleur et de créer la turbulence dans la veine d'air mobile entre l'isolant et l'absorbeur réduit considérablement le temps de séchage, tout en réduisant légèrement les pertes de charge instantanée, et permet une augmentation de la température de séchage.

La comparaison de comportement thermique quotidienne entre les prototypes de séchoirs solaire de type indirect avec roche était en faveur du prototype de séchoir solaire avec chicanes à des valeurs importants. Compte tenu de comportement thermique quotidienne, les prototypes de séchoirs solaires de type indirect avec roche avec PCM sont plus efficaces, en particulier à des débits massiques élevés.

Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la tomate et de la menthe. Les résultats ont montré que les modèles de Midilli-Kucuk et Two-Terms exponentiel était les plus appropriés pour décrire le processus de séchage solaire de la tomate dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect avec PCM, roche et avec chicanes et à l'air libre. Cependant, les modèles de Midilli-Kucuk et Logarithmic était les plus approprié pour décrire le processus de séchage solaire de basilic.

**Mots clefs :** séchage des produits alimentaires ; séchoir solaire indirect ; performances thermiques cinétique de séchage ; modèles mathématiques.

---

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

---

### INTRODUCTION GENERALE :

Le séchage est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits alimentaires et agricoles. L'objectif principal du séchage est de réduire la teneur en humidité au niveau de stockage sûr, auquel les produits peuvent être stockés pendant une période plus longue sans aucune détérioration. La faible teneur en humidité empêche la croissance de micro-organismes tels que les moisissures, les bactéries et les levures dans les produits agricoles et réduit les réactions chimiques détériorant la qualité des produits (Bahnasawy et Shenana, 2004). Il réduit également la masse et le volume des produits, ce qui réduit les coûts d'emballage, de stockage et de transport (Akpinar, 2006). Le séchage est une opération énergivore car la chaleur latente associée à la teneur en humidité du produit doit être éliminée en fournissant de l'air chaud. Différentes sources d'énergie telles que le GPL, le charbon, la biomasse et l'énergie solaire sont utilisées pour répondre aux besoins énergétiques de l'opération de séchage. L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus largement utilisée dans le processus de séchage. Il est utilisé par l'humanité depuis de nombreuses décennies. Le séchage traditionnel à l'air libre est la plus grande application d'énergie solaire et c'est une technique de séchage bon marché. Cependant, le temps de séchage plus long, la contamination, la difficulté de contrôler le processus de séchage, les pertes de couleurs et de minéraux naturels, les pertes de produits dues aux insectes, aux oiseaux et aux intempéries, la grande surface de séchage requise et les coûts de main-d'œuvre élevés sont les principales limitations associées avec le séchage au soleil ouvert. Toutes ces limitations du séchage à l'air libre ont conduit au développement des séchoirs solaires. Dans le séchoir solaire, le produit est séché dans un espace clos ou une armoire de séchage à une température élevée. C'est un processus de séchage efficace par rapport au séchage direct au soleil. Le produit est séché à haute température et à faible humidité relative dans le séchoir solaire par rapport au séchage au soleil ouvert pour la même intensité de rayonnement solaire. Le produit peut être séché dans le séchoir solaire à une température de l'air de séchage variant entre 45 °C et 60 °C, ce qui est une plage de température de l'air de séchage plus appropriée pour de nombreux produits agricoles (Agrawal et Sarviya, 2016a). Cependant, le caractère intermittent et l'incertitude de la disponibilité du rayonnement solaire restent les préoccupations associées au séchoir solaire. Ces préoccupations affectent la fiabilité du séchoir solaire et limitent ainsi l'application. Pour surmonter ces défis, des sources de chaleur auxiliaires telles qu'un radiateur électrique, un poêle à biomasse et un poêle à GPL sont généralement intégrées au séchoir solaire. Le séchoir solaire est également intégré au stockage thermique pour fournir la chaleur nécessaire au séchage pendant la couverture nuageuse ou une période de rayonnement



solaire inadéquate. Habituellement, deux types de modules de stockage d'énergie thermique, à savoir le stockage de chaleur sensible (SHS) et le stockage de chaleur latente (LHS) sont utilisés dans le séchoir solaire. Dans le stockage de chaleur sensible, la température des matériaux de stockage tels que la pierre, la roche, le béton, les cailloux et l'eau (Leon et Kumar, 2008 ; Madhlopa et Ngwalo, 2007 ; Aguilar-Castro et al., 2012) est augmentée pour stocker l'énergie thermique. Pendant le stockage de chaleur latente, les matériaux à changement de phase (PCM) tels que la cire de paraffine (Esakkimuthu et al., 2013) et le chlorure de calcium hegzahydrat (Cakmak et Yildiz, 2011) sont généralement utilisés. L'énergie thermique est stockée par la transition de phase du matériau de stockage de solide à liquide. L'application du LHS dans le séchoir solaire a récemment fait l'objet de nombreuses recherches en raison de nombreux avantages qui lui sont associés, tels qu'une capacité de stockage d'énergie élevée, une dissipation de l'énergie à une température presque constante et un faible rapport volume/masse.

Dans les séchoirs solaires, le rayonnement chauffe directement ou indirectement le produit et l'air de séchage peut s'échapper par convection naturelle ou forcée (CHAVAN et al., 2020). La circulation d'air dans la chambre de séchage peut avoir un effet dominant sur l'élimination de l'humidité de la surface du produit, lorsque le séchage est limité par des mécanismes externes et principalement convectifs. Cependant, cette condition n'a pas d'effet significatif pour les produits à haute résistance interne au transfert d'humidité, dans lesquels le séchage est principalement limité par des mécanismes de diffusion (EKKA et al., 2020 ; INYANG ; OBOH ; ETUK, 2018). Pour produire la convection forcée de l'air de séchage, de simple ventilateur de faible puissance peuvent être utilisés. Cet équipement a un potentiel d'application dans la transformation alimentaire à petite échelle, améliorant la qualité finale du produit sec par rapport au simple séchage à l'air libre (UDOMKUN et al., 2020). Dans ce contexte, le présent travail est basé sur le développement d'un séchoir solaire direct capable de transformer des fruits et légumes à petite échelle, visant chez les agriculteurs familiaux ou les petits producteurs.[27]

### **Objectifs de recherche :**

L'objectif principal de la recherche était d'évaluer les performances des séchoirs solaires direct intégrant des chicanes, des systèmes de stockage par chaleur sensible et par chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP). Le système de stockage par chaleur latente, est composé des canettes remplies de cire de paraffine mélangée à 5% de poudre d'aluminium, et de chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

### **Objectifs spécifiques :**

Les objectifs spécifiques de la recherche étaient :

1. modifier les séchoirs solaires de type indirect et intégré des systèmes de stockage d'énergie thermique par chaleur sensible et latente.
2. Évaluer les performances des prototypes de séchoir solaire de type indirect à l'aide de différents paramètres tels que la température, la teneur en humidité du produit, la période de séchage et la vitesse de séchage.
3. Comparer les performances des prototypes de séchoir solaire de type indirect avec différents systèmes d'améliorations apporté.
4. Ajuster les courbes de séchage à dix modèles mathématiques

---

---

## **Chapitre I :ETAT DE L'ART SUR LE SECHAGE SOLAIRE**

---

---

## I.1 Le Séchage

### I.1.1. Définition :

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.[1]

### I.1.2. Pourquoi le 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, 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 :

- 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. [2]

### 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 [3]

#### a. Zone du littoral :

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 :**

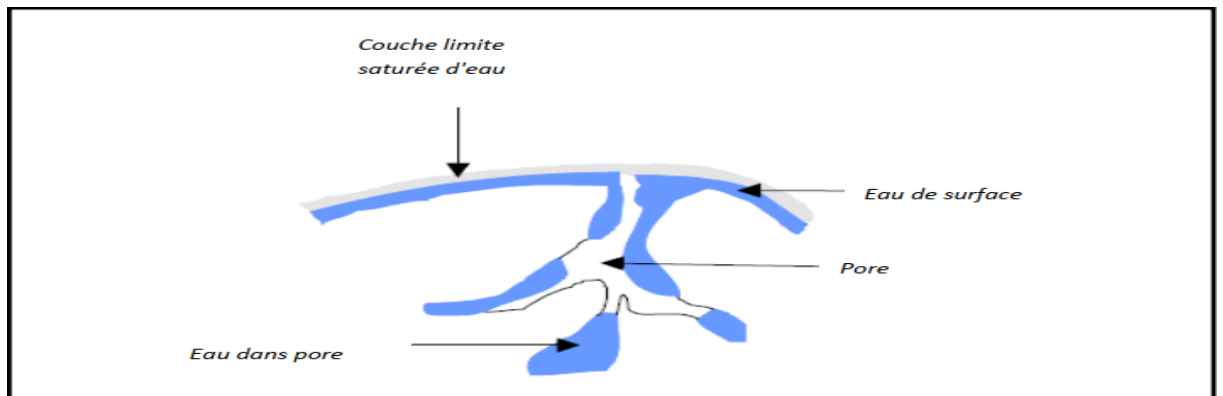
Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie. Globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser 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 [4]

**I.1.5. Caractéristiques des solides humides:**

Avant le séchage, un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure 1.1. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui

serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. [5]



**Fig.1.1:** Description du solide humide[5]

#### **I.1.5.1. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche):**

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [5]

$$x = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad \text{Eq.I.01}$$

#### **I.1.5.2. Humidité relative (teneur en eau):**

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$x_r = \frac{Mh - Ms}{Mh} \quad \text{Eq.I.02}$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [5]:

$$x = \frac{Xr}{1 - Xr} \quad \text{Eq.I.03}$$

$$Xr = \frac{X}{1 + X} \quad \text{Eq.I.04}$$

### I.1.5.3. 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 :

$$X = \frac{me}{ms} \quad \text{Eq.I.05}$$

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

- Teneur en eau (base humide) :

$$W = \frac{me}{m} \quad \text{Eq.I.06}$$

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

### I.1.5.4. 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 :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{Hr(\%)}{100} \quad \text{Eq.I.07}$$

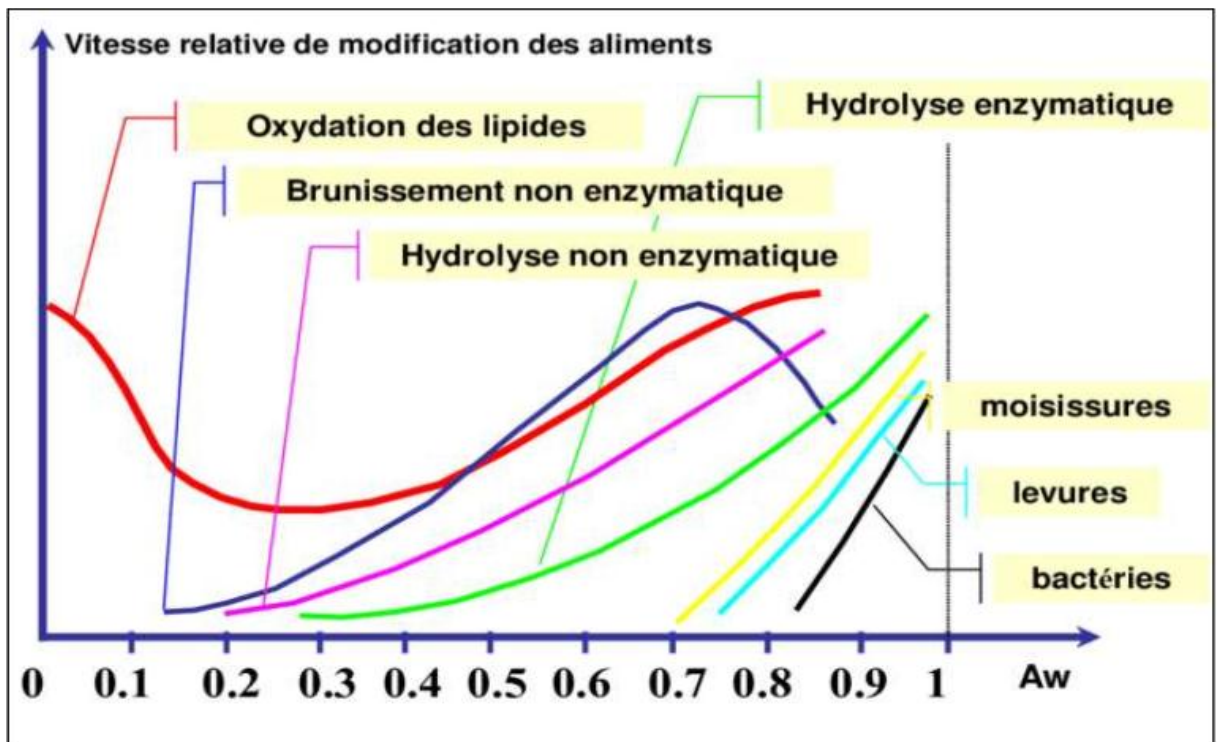
**Avec:**

- $P_{vp}$  : 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 **Fig.1.2** 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 [6].



**Fig.1.2** Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau [6].



## **I.2. Séchage des produits agricoles :**

### **I.2.1. Mode de séchage:**

On peut distinguer divers procédés de séchage [07]:

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression)
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

Diverses méthodes de chauffage peuvent également être utilisées:

- Convection naturelle,
- convection forcée
- Conduction
- Rayonnement
- Pertes diélectriques

Le procédé de séchage par convection, appelé aussi par entraînement, est plus répandu et fait l'objet de notre étude. [07]

### **I.2.2 Histoire du séchage solaire :**

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes utilisées depuis les temps préhistoriques pour conserver et conserver les aliments tels que la viande, les légumes, le poisson, les fruits, etc..... et c'est en utilisant l'énergie solaire. d'énergie thermique disponible pour le séchage et la conservation de tous les nutriments nécessaires à la séparation. , le séchage des briques de terre pour leurs maisons et des peaux d'animaux.

### **I.2.3. les différents types des séchoirs solaires :**

Il y plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité .On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

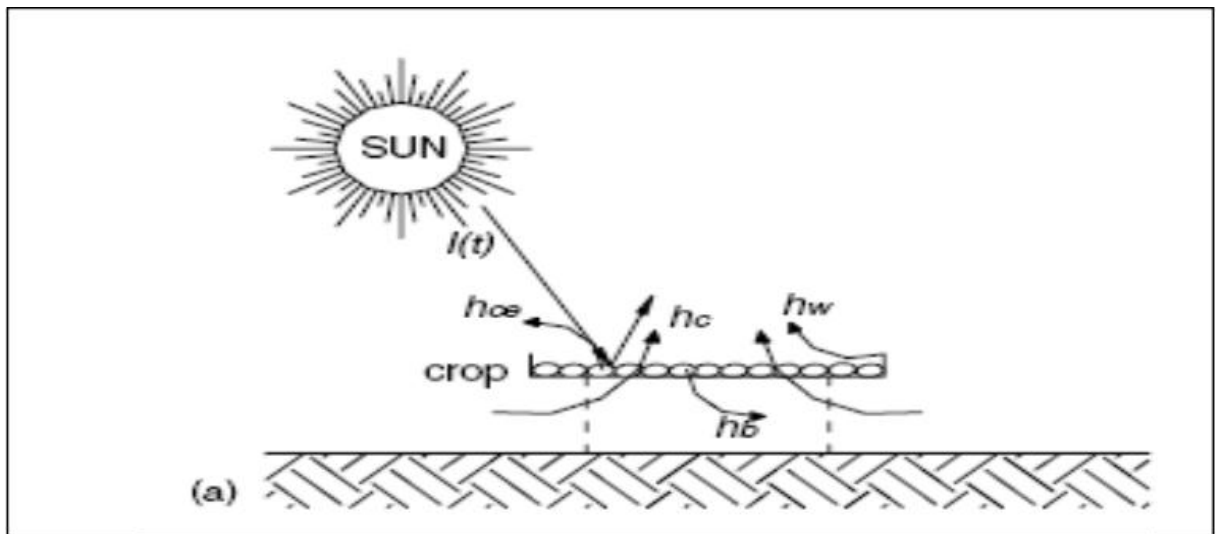
Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produit, le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.

- 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 assurés par une action mécanique.[08]

### I.2.3.1. 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 disposé même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (**Fig 1.3.a**). Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières). [08]



**Fig.1.3.a** : schéma du séchage solaire en plein air[08]

### I.2.3.2. 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) (**Fig 1.4.b**), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur (**Fig 1.5.c**), 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. **[08]**

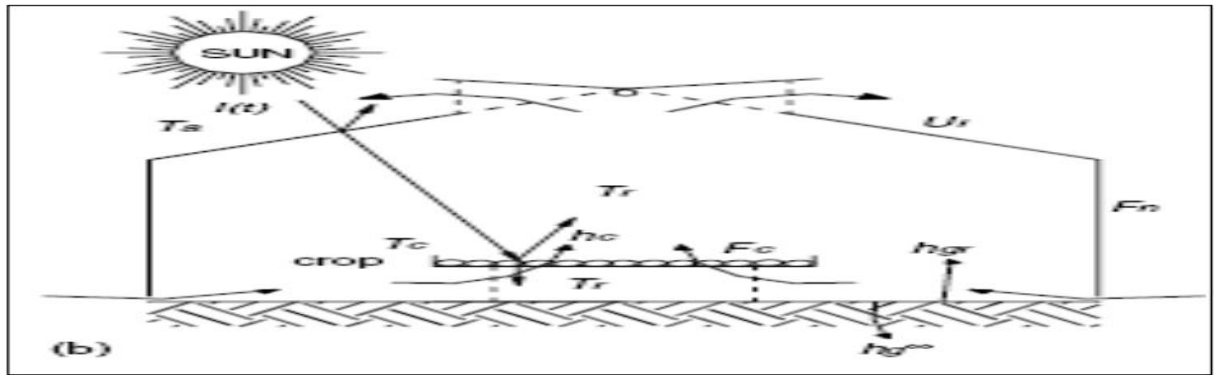


Fig.1.4. b : schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle [08]

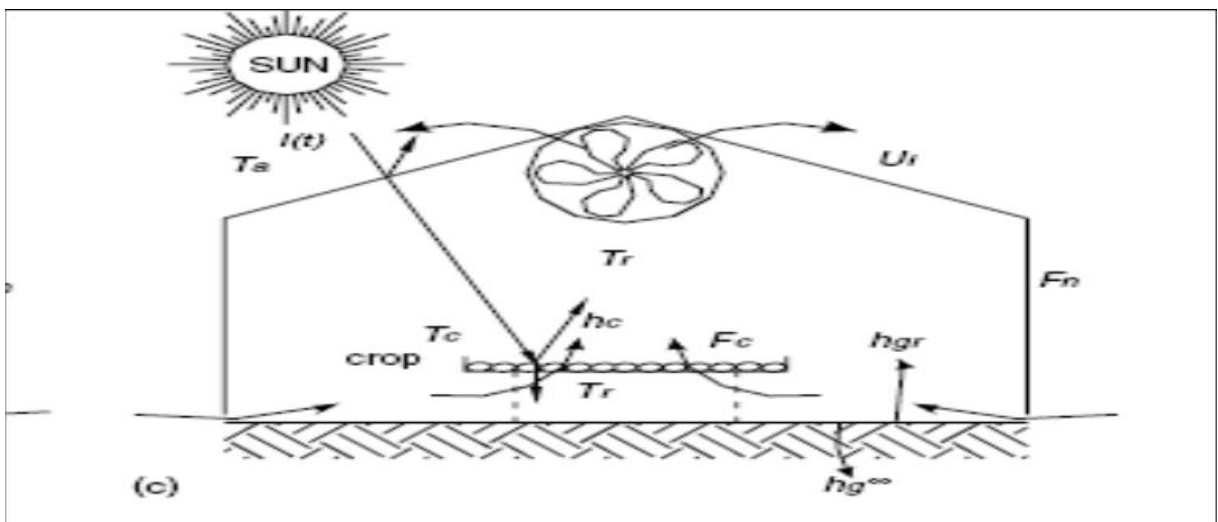


Fig.1.5. c : schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée [08]

### I.2.3.3. Les séchoirs solaires indirects :

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (Fig 1.6).

L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé [08]

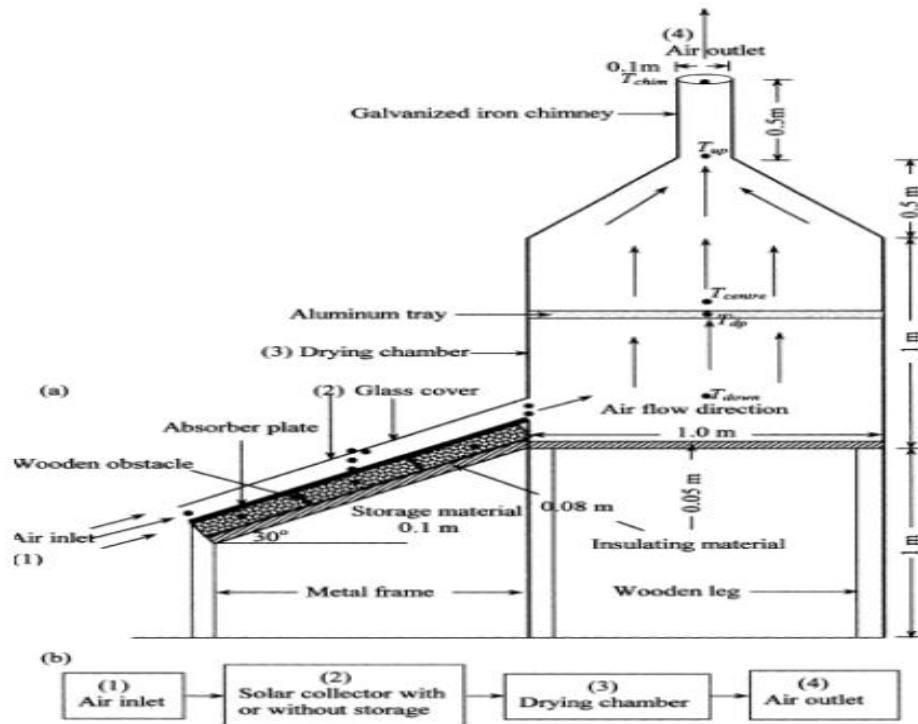
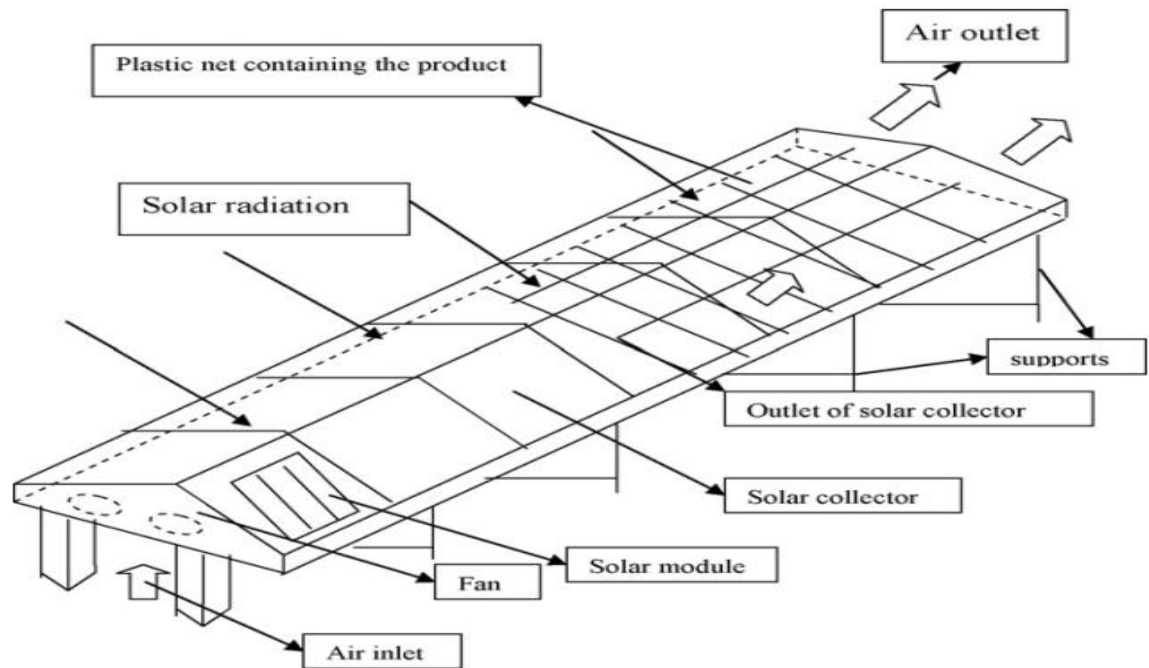


Fig.1.6: schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle[08]

#### I.2.3.4. 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 (Fig 1.7) 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..). [08]



**Fig.1.7:** schéma d'un séchoir solaire tunnel[08]

### I.3. Les capteurs solaires :

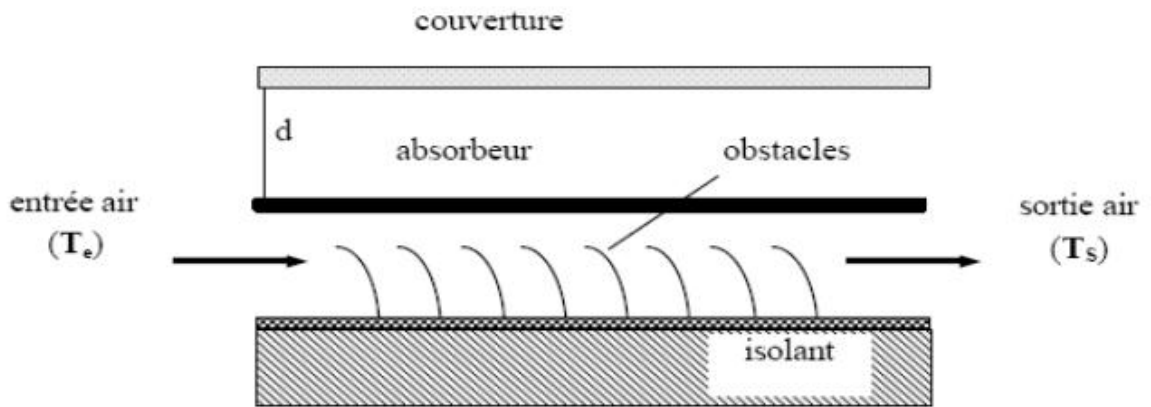
Les capteurs solaires sont des systèmes, qui captent et transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation est obtenue à l'aide des collecteurs thermiques. Il existe deux principaux types de capteurs solaires:

- Les capteurs plans
- Les capteurs concentrateurs [09]

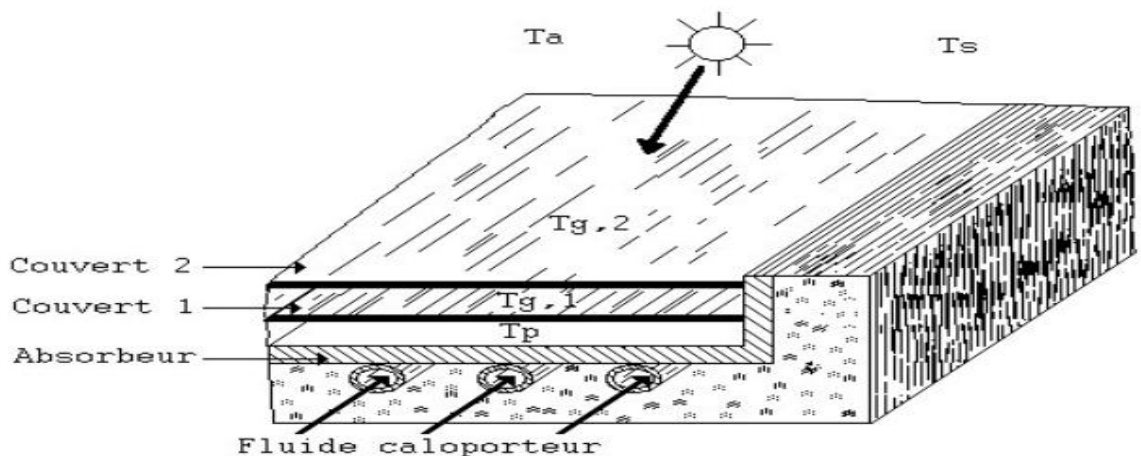
#### 1.3.1. Capteurs plans :

Les capteurs plans (**Fig 1.8.a** et **Fig 1.9.b**) absorbent le rayonnement solaire à l'aide d'une plaque noire (absorbeur) et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduites, sa température (liquide ou air) augmente, en raison

de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Il est constitué d'une couverture transparente (polycarbonate, vitre), qui piège le rayonnement solaire thermique absorbé par la plaque noire qui chauffe les fluides caloporteurs à des températures inférieures à 100°C avec un rendement variant de 40% à 80 %.[09], [10]



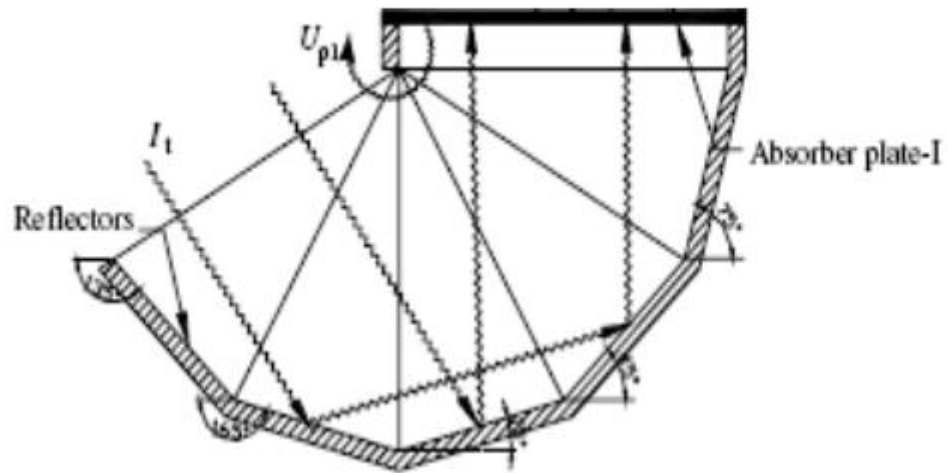
**Fig.1.8.a** : Schéma d'un capteur plan à air [10]



**Fig.1.9. b** : Schéma d'un capteur plan à air[10]

### I.3.2. Capteurs concentrateurs :

Les capteurs solaires plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. C'est pour cela, il est possible d'utiliser des capteurs concentrateurs en demi-cercle (Paraboliques) (**Fig 1.10**), qui concentrent le rayonnement solaire capté sur un tuyau où circule le fluide caloporteur. Cette concentration provoque une augmentation de la température qui peut atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius. [09], [10]



**Fig.1.10:** Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur[09], [10]

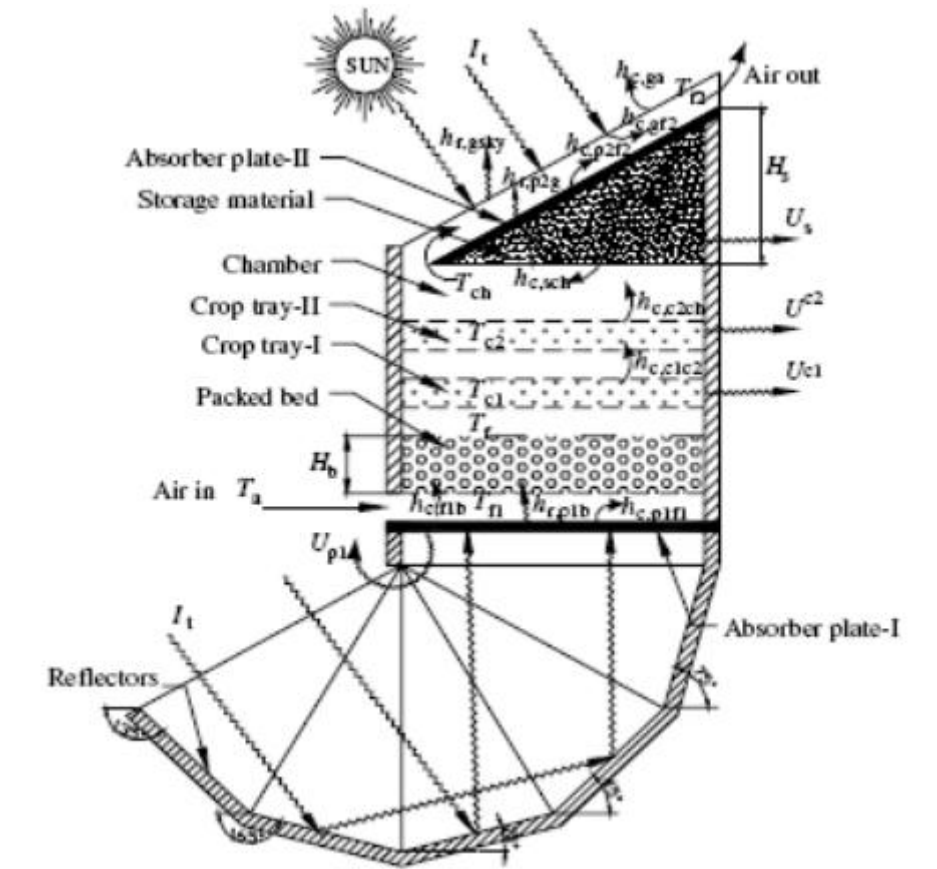
#### I.4.Travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires :

**M. Krokida**, dans ce travail, s'est intéressé à plusieurs paramètres intrinsèques et extrinsèques. Pour les paramètres extrinsèques il a pris en considération, entre autre la température, l'humidité et la vitesse de l'air, pour les paramètres intrinsèques il a considéré, entre autre, les dimensions des produits. L'objectif de son travail est d'étudier l'influence de ses paramètres sur la cinétique du séchage. Les plages de valeurs pour les différents paramètres choisis durant l'expérience sont les suivants: 5, 10 et 15 mm pour le diamètre du produit; 65, 75 et 85 °C pour la température de l'air; et 1.5, 2 et 2.5 m/s pour la vitesse de l'air et finalement 20 %, 30 % et 40 % pour l'humidité relative de l'air. Ce qui a ressortit des différents résultats obtenus par cette étude est l'importance des certains paramètres, à savoir les conditions extérieures et les attributs du produit pour l'expression d'un modèle mathématique du séchage. Il a été constaté, également l'importance de la température de l'air comparée à sa vitesse, vis-à-vis à l'altération du séchage. [11]

**Dilip J**, développe un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage thermique pour assurer l'air chaud pendant la période non ensoleillée. Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygonale pour refléter le maximum du rayonnement solaire incident (**Fig 1.11**). Ce système est destiné pour le séchage de



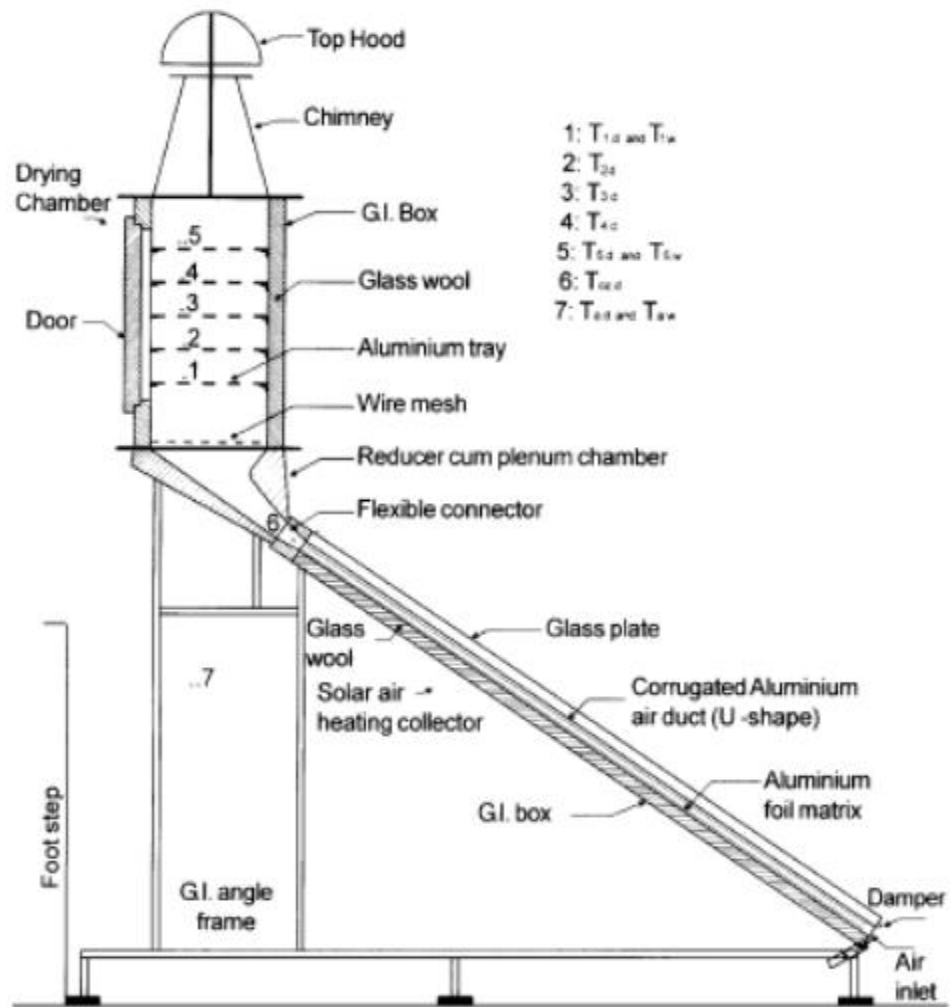
l'oignon ,avec une capacité de 90 kg. Cette opération est effectuée pendant un jour du mois d'octobre[12]



**Fig.1.11:** Schéma d'un séchoir solaire avec stockage thermique [12]

Dans la suite de section, nous présentons les principales recherches ayant abordé le séchage et les séchoirs solaires. Dans tous ces travaux les chercheurs se sont motivés leur contribution par l'avantage à ce type de séchage qui est principalement la propreté et le caractère, renouvelable de l'énergie utilisée à savoir l'énergie solaire. L'ensemble de ces travaux peuvent être divisés en deux classes: les séchoirs directs et le système indirect. Au sein de l'école de l'énergie et Etude environnementales à l'Inde, **Dilip R. et al.**, [13] dans ce travail, ont utilisé un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle (**Fig 1.12**), leur séchoir est composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Les résultats obtenus par ce séchoir, concernant la température qui varient entre 50 °C et 55 °C. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de Mars à Mai, les températures obtenues étaient suffisantes pour le séchage de plusieurs produits

(fruits et légumes). Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend 4 jours, alors que le séchage traditionnel nécessite de 7 à 15 jours. [13]



**Fig .1.12:** Schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle [13]

Le test a été réalisé à une vitesse de séchage constante de 1,5 m / s. Le max. La température atteinte était de 61 ° C. Les efficacités la plus élevée et la plus basse de 61,82% et 45,40% ont été obtenues à 11,00 h et 9 h 00 respectivement. Le taux d'humidité de 60% à 8% sur une base sèche a été réduit en 6 heures. **Shobhana Singh et al** [14] ont réalisé des expériences sans charge sur un sécheur en mode mixte pour une circulation d'air naturelle et forcée dans des conditions contrôlées à l'intérieur. Le sécheur a été testé dans des conditions de fonctionnement d'énergie thermique absorbée (300 à 800 W / m<sup>2</sup>) et de débit massique d'air (0,009 à 0,026 kg / s).

Le rapport de performance du sécheur (DPR) a été utilisé comme outil pour vérifier la capacité du sécheur solaire à transférer la chaleur vers l'air qui circule. Il a été défini comme le rapport du taux de capacité thermique du fluide de travail (mcp) utilisé pour extraire l'énergie de la surface de l'absorbeur du sécheur solaire au coefficient de transfert de chaleur convectif (hcpf) entre la surface de l'absorbeur et l'air circulant à travers l'ensemble collecteur-sécheur. [14]

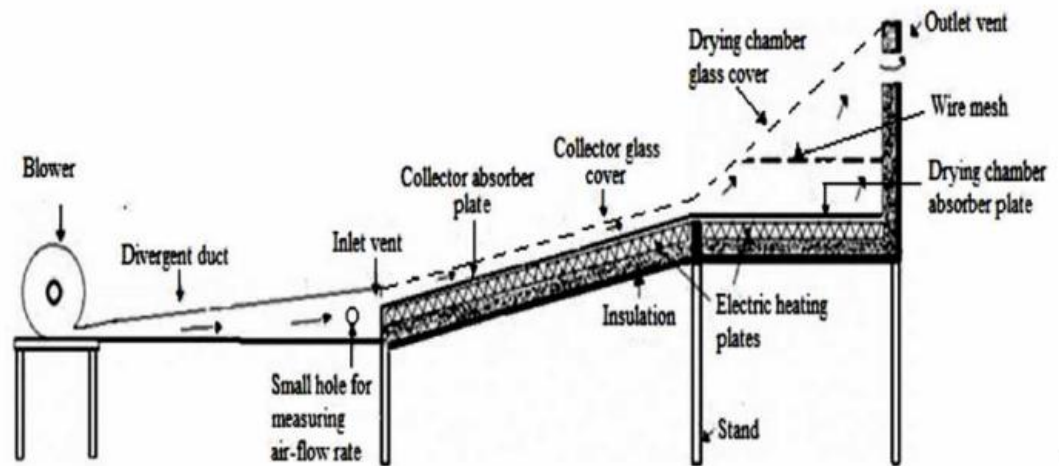


Fig .1.13. Schéma de principe d'un sécheur solaire à convection forcée en mode mixte[14]

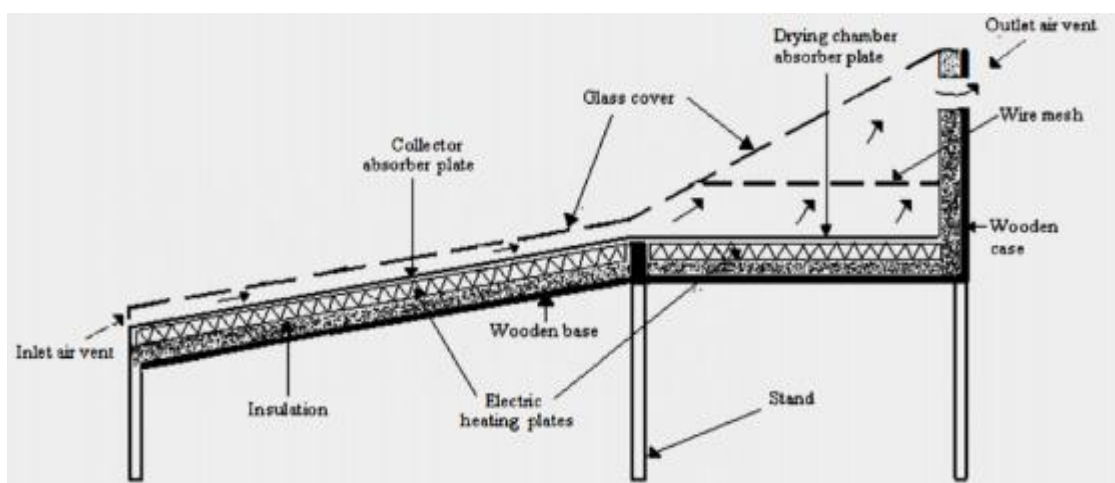


Fig .1.14.Schéma de principe d'un sécheur solaire à convection naturelle en mode mixte [14]

La comparaison des valeurs de DPR pour les circulations d'air naturel et forcé a mis en évidence une amélioration considérable des performances de 94% au débit d'air minimum de 0,009 kg / s. Une forte augmentation du DPR de 31% a été observée lorsque le débit d'air a été augmenté de 0,009 à 0,017 kg / s et par la suite une augmentation marginale de 4% a été notée pour une amélioration du débit d'air de - 53%. Une autre découverte importante de la présente étude concerne les valeurs de DPR invariables obtenues pour une large gamme de données d'énergie absorbée et de température de l'air ambiant, quel que soit le mode de circulation de l'air adopté pour un sécheur. Un séchoir à armoire solaire à mode mixte à faible coût a été conçu et calibré par **Basumatary et al** [14].

Les résultats ont montré que pendant 7 heures d'opération de séchage, le sécheur a éliminé 48,7% à 33% d'humidité tandis que le séchage à l'air libre a éliminé 15,38% d'humidité. Le taux de séchage dans la sécheuse en armoire en mode mélange est environ 2 à 3 fois plus élevé que le séchage à l'air libre.

Un séchoir solaire indirect, de type actif, respectueux de l'environnement et peu coûteux a été conçu et des expériences ont été menées par He g de et al [14] pour sécher des tranches de banane afin d'étudier ses caractéristiques de séchage telles que le taux de séchage et la qualité de la banane séchée en termes de goût, couleur et forme. Les expériences ont été menées pour deux configurations de flux d'air différentes: flux supérieur (flux d'air entre le couvercle en verre et plaque absorbante) et flux inférieur (flux d'air entre la plaque absorbante et l'isolation inférieure du capteur solaire), flux forcé avec des débits variables de 0– 3 m / s et deux schémas de montage différents (plateaux conventionnels et brochettes en bois).



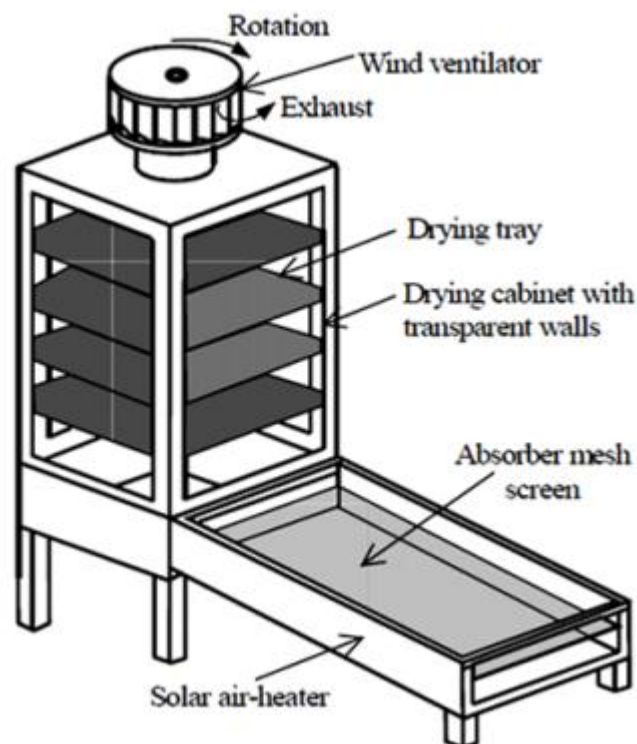
**Fig .1.15.**Configuration du sécheur solaire[14]



**Fig 1.16.**Brochette en bois[14]

Par rapport à l'écoulement supérieur, l'écoulement inférieur a fourni des températures de chambre d'environ 2,5 ° C plus élevées pour la même entrée d'énergie solaire. L'efficacité de la configuration de débit supérieur était s'est avérée être de 27,5%, alors que l'efficacité de la configuration d'écoulement de fond s'est avérée être plus élevée à 38,21%. Les brochettes en bois pour monter les tranches de banane ont donné un taux de séchage plus élevé par rapport aux plateaux conventionnels. Un débit d'air de 1 m / s s'est avéré être optimal pour la meilleure qualité en termes de couleur, de goût et de forme par rapport au séchage à un débit d'air de 0,5 et 2 m / s pour presque les mêmes conditions météorologiques.

**Bukola O. Bolaji.et.al** [14] a testé le séchoir d'armoire ventilé par vent solaire au Nigeria. Pendant la période d'essai, la vitesse moyenne de l'air à travers le sécheur solaire a été maintenue à 1,62 m / s. Le max. la température de séchage a été trouvée à 64 ° à l'intérieur du séchoir, tandis que la température de séchage moyenne a été trouvée 5 ° C plus élevée que la température ambiante le matin et 31 ° C à la mi-journée. Des pertes de poids de 80% et 55% ont été rapportées respectivement pour les chips de poivre et d'igname.



**Fig .1.17.**Séchoir en armoire ventilé par vent solaire [14]

Un séchoir à tunnel solaire avec réchauffeur d'air solaire a été construit et étudié expérimentalement avec des galets enduits de noir comme matériau de stockage de chaleur sensible à l'Université VIT par **SandeepBukke et al** [14].



**Fig .1.18.**Schéma de principe du séchoir tunnel solaire intégré au réchauffeur d'air solaire[14].

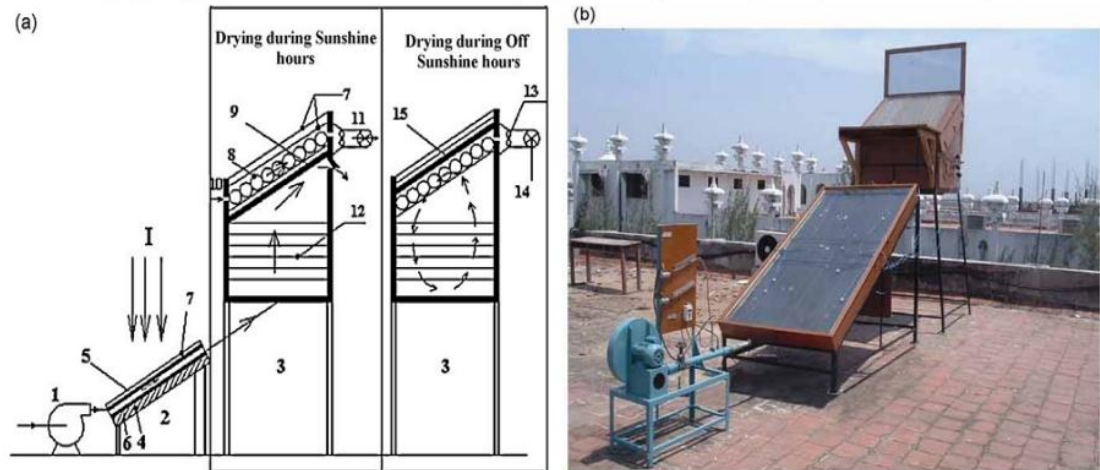
La température la plus élevée atteinte était de  $79^{\circ}\text{C}$ . La réduction de l'humidité de 80,24% à 19,57% en 14 heures a été obtenue en 14 heures sous convection naturelle sans matériau de stockage de chaleur alors que 18,21% d'humidité niveau a été atteint en 8 heures avec des galets. Les galets ont maintenu une température moyenne de  $60^{\circ}\text{C}$  dans le séchoir.

**A. O. Adelaja et al** [15] ont développé un séchoir solaire de type indirect à convection naturelle et effectué des analyses thermiques et de séchage pour obtenir certains paramètres d'évaluation des performances du système.

Les résultats des expériences ont montré que le séchage des légumes à l'aide de cette technique produisait une bonne uniformité du produit et conservait leur couleur fraîche, leur texture et leur forme d'origine et leur teneur élevée en vitamines. La vitesse de séchage de ce système était 6 fois plus rapide que celle du séchage par déshydratant conventionnel et jusqu'à 12 fois plus rapide que celle du séchage au soleil à ciel ouvert.

Un séchoir solaire intégré à convection forcée indirecte et déshydratant a été conçu et étudié dans les conditions climatiques chaudes et humides de Chiennai, en Inde par

**Shanmugam et Natarajan**[14]. Un déshydratant solide à base de  $\text{CaCl}_2$  constitué de 60% de bentonite, 10% de chlorure de calcium, 20% de vermiculite et 10% de ciment a été utilisé comme matériau de stockage d'énergie thermique. La teneur en humidité d'équilibre a été atteinte en 14 h à un débit d'air de  $0,03 \text{ kg} / \text{m}^2\text{s}$ . Le séchage par dessiccation a produit un séchage plus uniforme et une qualité améliorée du produit séché.



**Fig 1.19.** (a) Schéma du sécheur solaire intégré à déshydratant. [14].

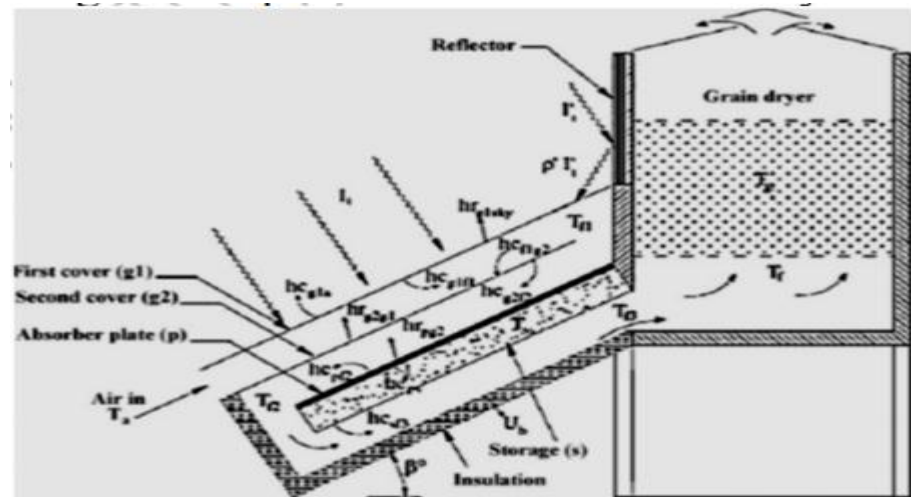
(b) Vue illustrée du montage expérimental

1. Souffleur, 2. Collecteur d'air solaire à plaque plate, 3. Chambre de séchage, 4. Isolation, 5. Plaque absorbante, 6. Plaque inférieure, 7. Couvercle transparent, 8. Lit de des sic cant, 9. Contreplaqué, 10. Entrée d'air, 11. Conduit de sortie d'air, 12. Plateaux de séchage, 13. Ventilateur réversible, 14. Vanne, 15. Contreplaqué. [22].

Les résultats expérimentaux ont révélé que l'intégration de l'unité de dessiccation avec le séchage solaire continue le séchage des produits en dehors des heures d'ensoleillement et améliore la qualité du produit de séchage. Les expériences ont été menées pour différents débits d'air de  $0,005$ ,  $0,01$ ,  $0,02$ ,  $0,03$  et  $0,04 \text{ kg} / \text{m}^2$  respectivement. Le débit d'air plus élevé de  $0,04 \text{ kg} / \text{m}^2$  n'avait aucune influence sur le séchage, tandis que le débit d'air inférieur à  $0,01 \text{ kg} / \text{m}^2\text{s}$  entraînait une augmentation de la température de l'air de séchage au-dessus de  $650^\circ \text{C}$  pendant les heures de pointe d'ensoleillement, ce qui n'est pas approprié pour le séchage des pois verts. A un débit d'air donné de  $0,01$ ,  $0,02$  et  $0,03 \text{ kg} / \text{m}^2\text{s}$ , le produit sèche jusqu'à sa teneur en humidité d'équilibre à environ 22, 18 et 14 h, respectivement. Un séchage plus uniforme du produit dans tous les plateaux a été obtenu pendant le séchage par des sic cant et évite l'échange de plateaux normalement requis dans le cas d'un séchage solaire.

Environ 70% de l'élimination de l'humidité a été réalisée grâce à l'énergie solaire et le reste a été réalisé par les des si cants. Le taux d'extraction d'humidité spécifique varie de 0,55 à 0,82 kg / kW h. L'intégrité structurelle et les caractéristiques du déshydratant se sont révélées stables même après un an.

L'effet de la largeur du conduit, de la longueur du conduit, de la longueur du conduit, du débit massique d'air, de l'inclinaison de la plaque collectrice et de la profondeur du lit de grains sur la température du grain avait été étudié par Jain et Jain [14].



**Fig.I.20** Sécheur à lit compact avec aérotherme solaire multi passe avec système de stockage et réflecteur[14].

Les valeurs optimales pour ce qui précède ont été signalées comme étant de 1,5 m, 0,1 m, 4 m, 0,028 kg / s, 30 ° et 0,2 m respectivement.

**Jain** [14] avait développé un séchoir à plusieurs plateaux couplé à un réchauffeur d'air solaire. Ce dernier est parsemé de matériau de stockage thermique.

La chambre de séchage contient quatre plateaux distants d'un espacement vertical égal. Les parois est, sud et ouest de la chambre de séchage sont réalisées avec des verres afin d'augmenter les radiations reçues. Le côté nord arrière est un mur isolé.



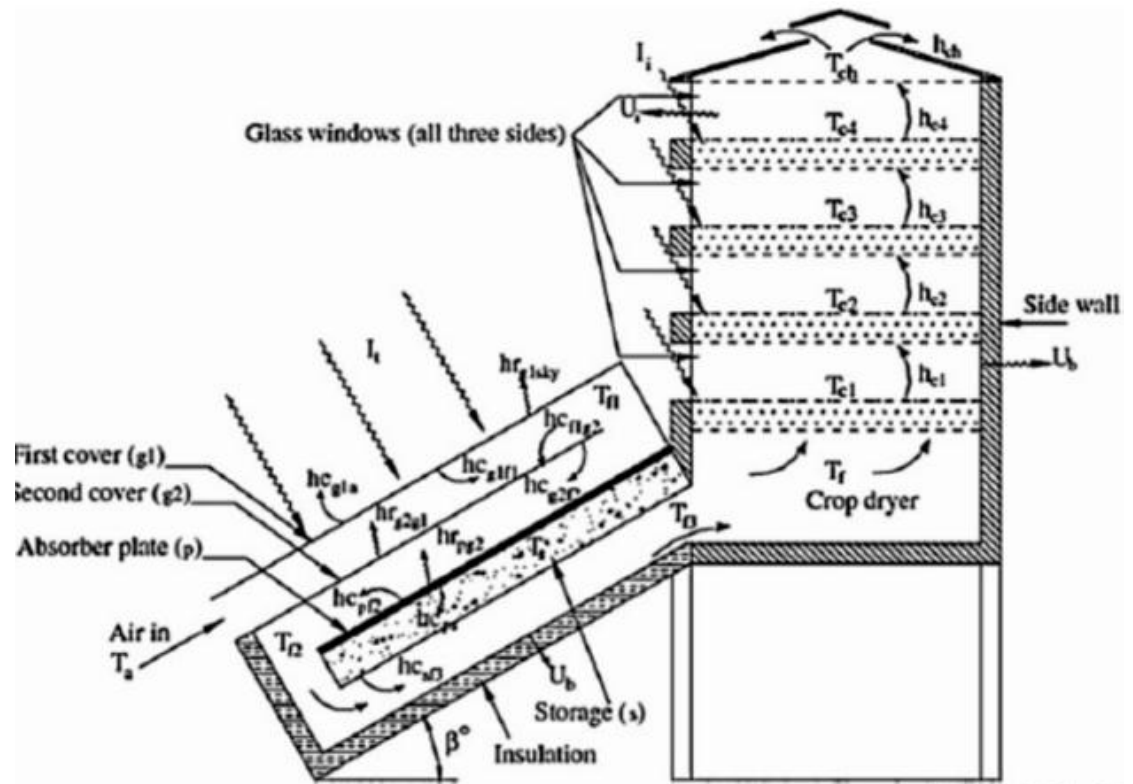


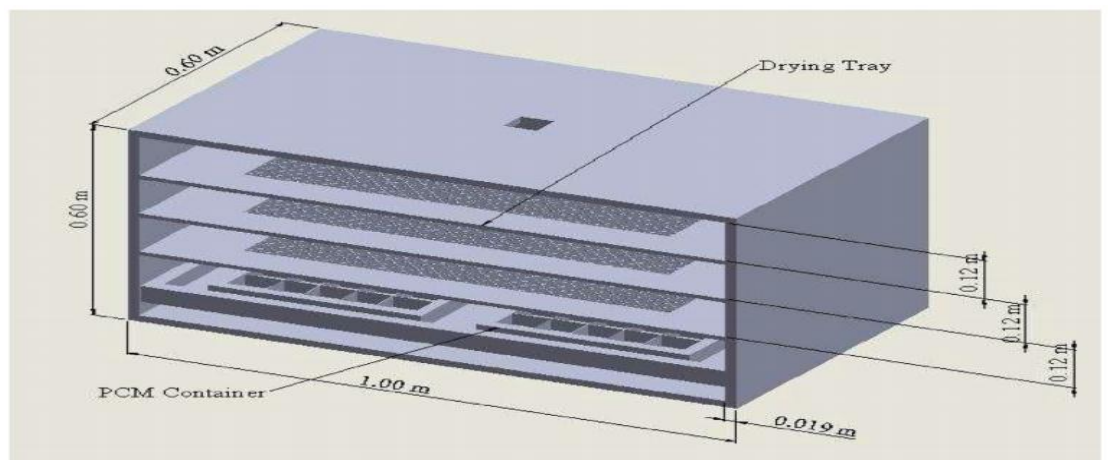
Fig.I. 21. Sécheur avec aérotherme solaire multi passe avec système de stockage[14].

Un sécheur solaire à convection forcée amélioré, incorporé avec SHS et PCM a été mis en place. Il comprend un collecteur solaire, une combinaison de matériaux de stockage de chaleur sensible, une armoire de séchage et un ventilateur comme illustré sur les **Fig. 22 (a)** et **(b)** respectivement. Le Gravier mélangé à de la ferraille posée sur la plaque absorbante et à l'huile moteur transportée dans le tube de cuivre est utilisé comme milieu SHS dans le collecteur. L'air chaud est fourni au milieu de la plaque absorbante et de l'isolant. La structure de la cornière en acier doux de  $0,038 \text{ m} \times 0,038 \text{ m} \times 0,006 \text{ m}$  est fabriquée. Le capteur solaire est positionné sur cette structure de telle sorte que la partie plane recouverte de verre transparent reste à  $30^\circ$  avec le sol. Pour collecter les radiations maximum pendant la journée, le collecteur est orienté vers le nord-sud. A une extrémité du collecteur, un dispositif de fixation de la soufflante est prévu et est relié au compartiment de séchage par un tuyau en polychlorure de vinyle (PVC) de diamètre  $0,038 \text{ m}$ . Le compartiment de séchage tel que présenté dans **Fig. 23** est en contreplaqué d'une épaisseur de  $0,019 \text{ m}$ . Trois plateaux de séchage sont fixés à l'intérieur du compartiment de séchage de telle sorte que la marge entre eux soit égale ( $0,12 \text{ m}$ ). Le corps extérieur ou le cadre des plateaux est en contreplaqué d'une épaisseur de  $0,012 \text{ m}$ . Un treillis métallique en acier inoxydable d'un diamètre de  $0,005 \text{ m}$  est

fixé à l'intérieur du cadre. Au bas de l'unité de séchage, deux conteneurs PCM sont fixés. De la cire de paraffine sous forme de PCM est utilisée dans ces récipients. La chambre entière est bien isolée tout autour, contenant une feuille de polyuréthane (PU) d'une épaisseur de 0,06 m. [16].



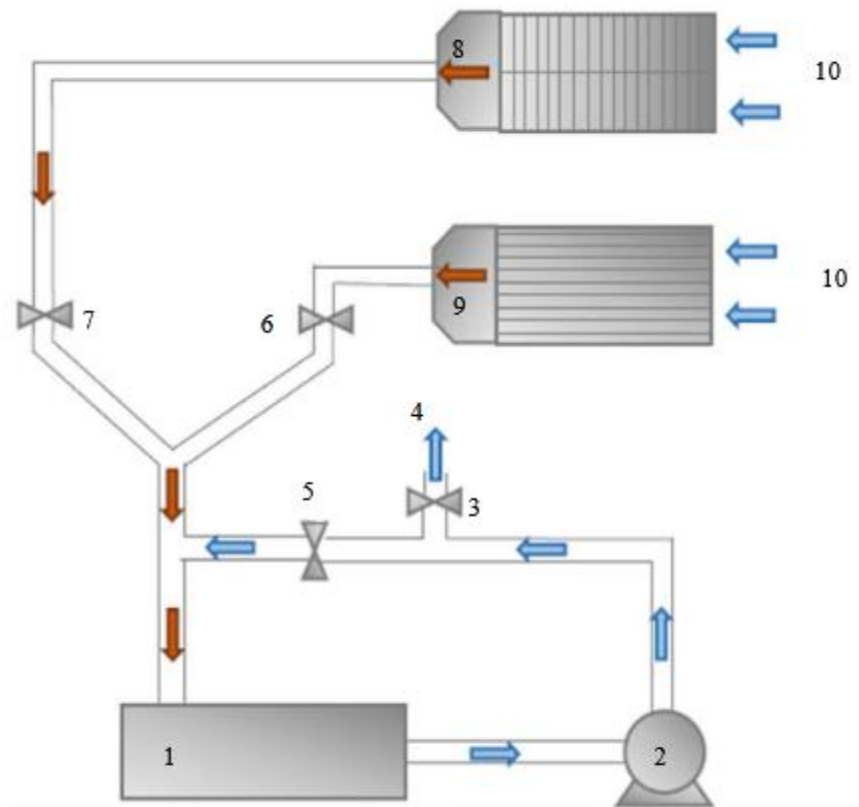
**Fig.I.22. (a)**Diagramme schématique du montage expérimental. (b): Montage expérimental.[16].



**Fig.I.23.**Schéma de principe des plateaux de la chambre de séchage et du conteneur PCM dans l'unité de séchage. [16].

Le séchoir solaire hybride (HSD) (Fig. 24) se composait d'un panneau solaire de 3 m de longueur et 1 m de largeur, composé d'une feuille de verre (2,5 mm d'épaisseur) et d'une plaque de zinc ondulée noire. Pour augmenter la surface exposée, 40 ailettes en zinc (3 cm de hauteur et 3 m de longueur) ont été introduites, puis la surface totale exposée au rayonnement solaire était de 10 m<sup>2</sup>. Au-dessous de cette plaque de zinc, il a été placé un matériau isolant thermique (50 mm d'épaisseur). L'air traverse l'espace libre (30 à 50 mm de hauteur) entre le verre et la plaque de zinc jusqu'à atteindre le point de mélange avec l'air recyclé (Fig. 25).

Après cela, l'air pénètre dans la chambre de séchage (0,5 m × 0,5 m × 1,2 m), où il se répartit pour passer sur 10 plateaux en tôle perforée en acier inoxydable (0,45 m × 0,5 m), répartis en deux sections de 5 plateaux chacune un (Fig. 26). L'accumulateur d'énergie solaire (Fig. 27), placé à côté du panneau solaire, contenait 14 (kg) de cire de paraffine (PCM) répartis dans 100 tuyaux en cuivre (diamètre intérieur de 14 mm) avec des ailettes en aluminium afin de favoriser le transfert de chaleur vers le séchage. air. La température de fusion de la cire de paraffine est de 56 ° C et une chaleur latente de 213 (kJ / kg). Ce panneau est isolé thermiquement et la face supérieure a un couvercle en verre de 7 mm d'épaisseur. La vanne (6) régule le débit d'air du panneau solaire et la vanne (7) régule le débit de l'accumulateur d'énergie solaire. Implémentation du système de contrôle OPTO22 OPTO22 permet de surveiller les données en temps réel par le PAC Display Configuration, qui développe une phase d'inter-phase graphique [17].



**Fig.I.24.** Sécheur hybride solaire. 1) Séchage en chambre; 2) ventilateur centrifuge ;3)Purgeur; 4) évent; 5) Vanne de recirculation; 6) Vanne de panneau; 7) Valve

d'accumulateur; 8) accumulateur d'énergie solaire; 9) panneau solaire; 10) Airentrée fraîche.[17].



**Fig.I.25.** Panneau solaire. [17].



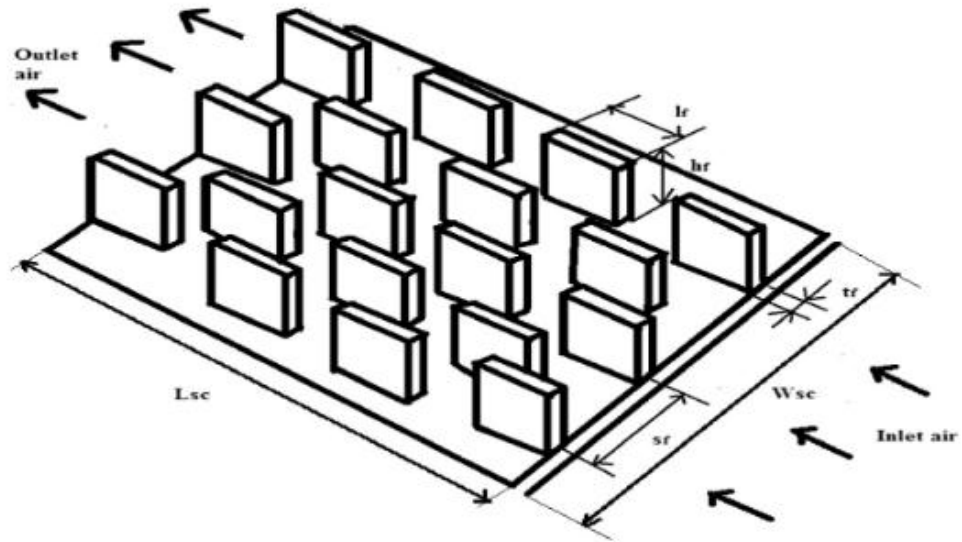
**Fig.I.26.** Chambre de séchage avec champignons.[17].



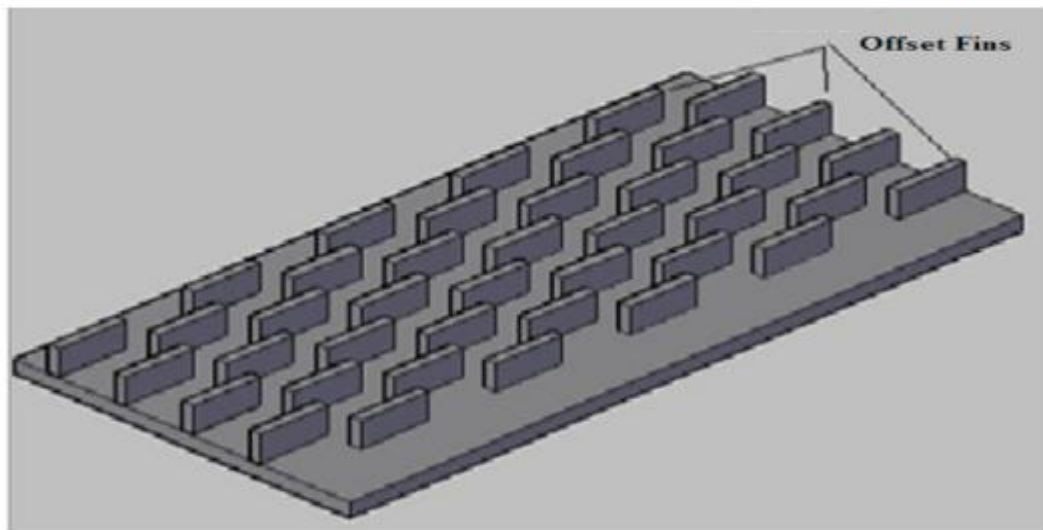
**Fig.I.27.** Accumulateur d'énergie solaire.[17].

Un aérotherme solaire ayant des ailettes décalées sous les plateaux absorbants illustrés dans les Fig. 1 et 2 a été pris en compte. Le canal de largeur « $W_{sc}$ », de hauteur de conduit « $D_h$ » et de longueur de la plaque d'air « $L_{sc}$ », comportant un couvercle en verre, est uniformément chauffé à partir du dessus par les rayonnements solaires transmis à travers le couvercle en verre. La hauteur, la longueur, l'épaisseur et l'espacement de l'aileron décalé sont respectivement « $f$ », « $lf$ », « $tf$ » et « $f$ ». Les équations du bilan énergétique sont écrites sur la base des hypothèses suivantes Ruffié et Berkman (1980) : Performance à l'état d'équilibre du capteur solaire. Il n'y a pas d'absorption d'énergie solaire par le couvercle en verre. Flux de chaleur unidimensionnel à travers le couvercle en verre et l'isolation arrière. Les couvercles sont opaques au rayonnement infrarouge.

[18].



**Fig.I.28** Vue de dessous de la plaque absorbante avec ailettes décalées.[18].



**Fig.I.29** Schéma de principe de la vue de dessous de la plaque absorbante fixée avec des ailettes décalées (Auto-CAD 2007).[18].

---

---

**Chapitre II. STOCKAGE THERMIQUE ET  
MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE**

---

---

### II.1. Le stockage thermique :

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes: -La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes -La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qu'emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.

-La chaleur des réactions : thermochimie et absorption [Adèle, 2015].[19].

### II.2. MODE DE STOCKAGE DE CHALEUR :

#### II-2.1. Stockage par chaleur sensible :

Le stockage par chaleur sensible est le plus simple et le plus ancien des modes de stockage.

Dans les systèmes de stockage par chaleur sensible, l'énergie est stockée, puis libérée par élévation ou réduction de la température du matériau de stockage solide ou liquide.

La quantité d'énergie stockée dépend de la masse du matériau de stockage ( $m$ ), de la chaleur spécifique du matériau ( $C_p$ ) et de la variation de température ( $\Delta T$ ) et est déterminée par l'Equation [Eric Kenda, 2017].[20].

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \qquad \text{Eq.II.01}$$

Avec :

$Q$  : chaleur sensible (J)

$m$  : masse du matériau (kg)

$C_p$  : chaleur massique du matériau (J/(kg K))

$\Delta T$  : la variation de température (K)

Les matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible peuvent être :

- Gazeux : vapeur d'eau surchauffée
- Liquide : eau, sels fondus, huile de synthèse ou naturelle, etc.
- Solide : roche, métal, béton, etc.



### II-2.2 Stockage par chaleur latente :

Le stockage par chaleur latente est basé sur une absorption de la chaleur par un matériau lors d'un passage de l'état solide à l'état liquide à une température plus ou moins constante (figureII-1) [Laghzaoui, 2010],[26].

Le stockage par chaleur latente nécessite moins de volume que le stockage par chaleur sensible parce que la chaleur latente d'un matériau est beaucoup plus élevée que sa capacité calorifique. La quantité de chaleur solaire par mode latent avec un matériau à changement de phase (MCP) peut être déduite de la relation suivante [Aumporn,2017],[21].

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} Q = m \cdot C_p(\text{sol}) \cdot dT + m \cdot L_f + \int_{T_m}^{T_f} Q = m \cdot C_p(\text{liq}) \cdot dT \quad \text{Eq.II.02}$$

Avec :

$m$  = masse du MCP (kg)

$C_p$  = chaleur spécifique du MCP (J/(kg .K))

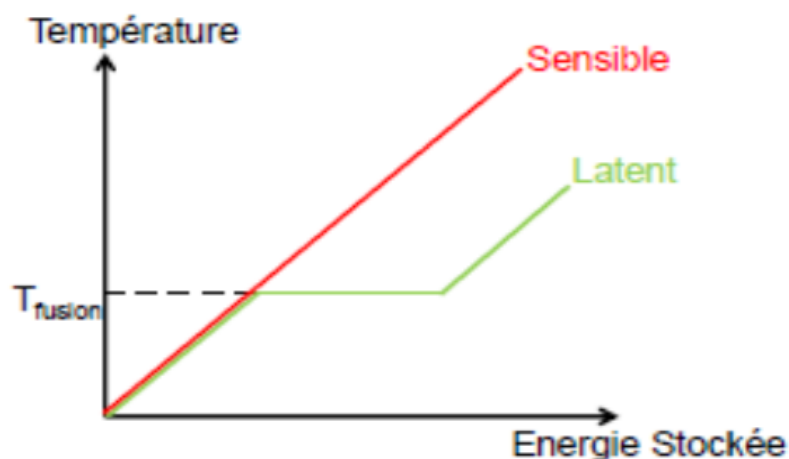
$L_f$  = enthalpie de fusion du MCP (J)

$T_i$ , = température initiale, de fusion et finale respectivement (K)

$T_m$

,  $T_f$

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température vs énergie de la Fig. II.1 [Adèle,2015],[19].



**Fig. II.1:** Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [Aumporn, 2017],[21].

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase.

A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement déphasé. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur.

Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puis que pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible.[Adèle,2015].[19].

**Tableau.II.1:** Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latente [Aumporn, 2017].[21].

	<b>Stockage par chaleur latente</b>	<b>Stockage par chaleur sensible</b>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Température du matériau reste constante dès le début de la transformation de phase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bon marché</li> <li>• Non toxicité</li> <li>• Capacité thermique plus élevée</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Coût élevé</li> <li>• Faible conductivité thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Déperditions thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du système qui requiert une bonne isolation</li> </ul>

**II-2.3 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 Le mécanisme du processus de stockage thermique par sorption ou par voie thermochimique peut être décrit par l'Equation:



**Eq.II.03**

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 [EricKenda,2017].[20].

### II.3.STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE :

#### II.3.1 Matériaux à changement de phase (MCP) :

Les matériaux à changements de phase (MCPs) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la **Fig. II.2**. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0 °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion [Stéphane, 2013][22].

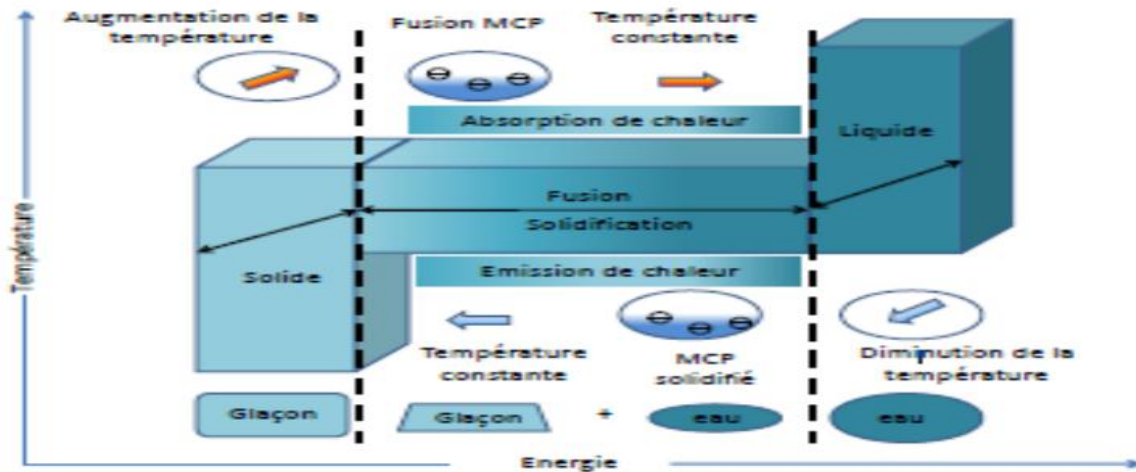


Fig.II.2.Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.

#### II-3.2 Caractéristiques d'un MCP idéal (MCP) :

Pour résumer, le MCP idéal devrait posséder les propriétés optimales suivantes [Fabien,2012]:[23].

##### II-3.2.1. Propriétés thermodynamiques et thermiques:

- ✓ Une température de fusion dans la gamme de températures désirée ;
- ✓ Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante ;

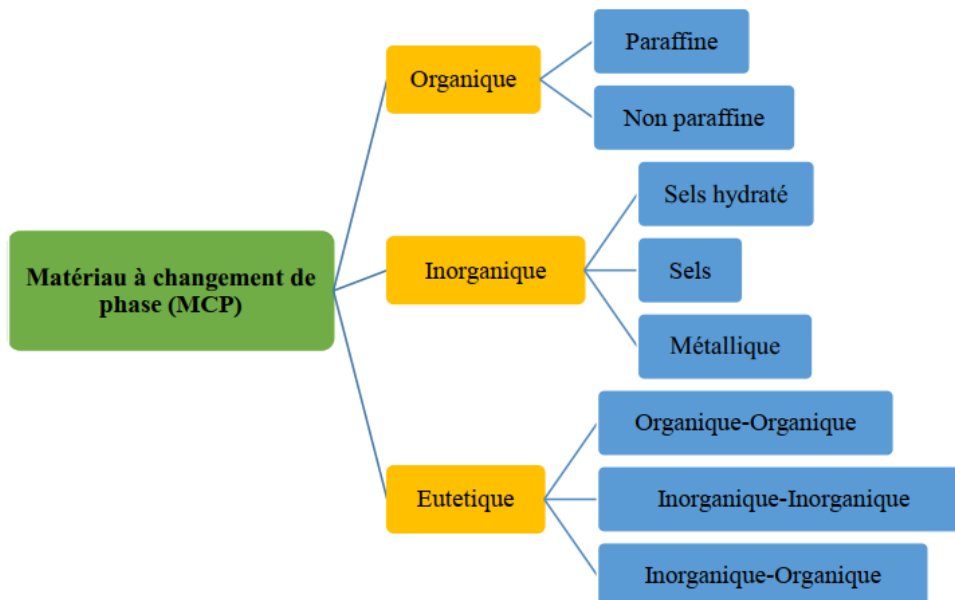
- ✓ Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage ;
- ✓ Une bonne conductivité thermique<sup>1</sup>, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge ;
- ✓ Une bonne chaleur spécifique<sup>2</sup>, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible ;
- ✓ Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeur

**II-3.2.2. Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) :**

- ✓ Être disponible en grandes quantités ;
- ✓ Être bon marché ;
- ✓ Être non toxique pour le vivant ;
- ✓ Être recyclable en fin de vie.

**II.3.3. Classification des matériaux à changement de phase :**

Température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase ainsi que leurs caractéristiques thermo-physiques. Les sels hydratés (MCP inorganique) ne sont pas tous utilisés dans l'enveloppe du bâtiment en raison de: la corrosion engendrée par leurs présences; la tenue mécanique des matériaux qui les contiennent; le vieillissement propre; l'inflammabilité ainsi que la plage de température en inadéquation avec le confort requis à l'intérieur du bâtiment La figure (II-3) représente la classification des MCP [N. Madjoudj et al,2016].[24].



**Fig.II.3.**Classification des matériaux à changement de phase

### II.3.3.1.MCPs organiques :

Les matériaux organiques ont une température de fusion comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés dans le domaine du stockage de la chaleur sont principalement à base de paraffine, d'acides gras et d'alcools. Ils présentent de nombreux avantages tels que leurs disponibilités dans une large gamme de températures et leurs stabilités chimiques. Ils ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. En outre, ils sont généralement non réactifs et recyclables. Leurs principaux inconvénients sont leurs faibles conductivités et chaleur latente de fusion et ils sont inflammables. Les MCPs organiques comportent deux types : paraffines et non-paraffines [Aumporn, 2017].[21].

#### ✓ Paraffines :

Les paraffines sont, de façon générale, des substances à l'aspect cireux, aux propriétés très similaires. D'un point de vue chimique, elles font partie de la famille des alcanes, ces molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne droite, de formule brute  $C_nH_{n+2}$  et de formule semi-développée  $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$  [Fabien, 2012][23].

#### ✓ Les non-paraffines :

Les matériaux organiques non-paraffines constituent la plus grande gamme de MCP, avec des propriétés très diverses. De nombreux auteurs tels que [LANE, 1992], [ABHAT, 1983] ou [BUDDHI et al, 1994] ont mené de vastes recherches sur les matériaux organiques et identifié[25].

Un bon nombre d'esters, d'acides gras ou carboxyliques, d'hydrocarbures aromatiques, d'oses, d'alcools ou polyols, adaptés au stockage de l'énergie thermique. Ces matériaux possèdent généralement une chaleur latente de fusion adéquate, mais sont inflammables et ont un point éclair assez bas. Ils sont généralement instables à hautes températures et présentent un niveau de toxicité variable [Fabien, 2012].[23].

**Tableau II-2:** Caractéristique de quelques MCPs organiques

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	$\Delta H$ fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )
Substance organiques	Paraffine C12-C50	66-68	66-68	0.21 sol	0.830liq.70° C 0.930sol.20° C
Substance organiques	Naphtalène	80	147.7	0.123liq.83.8° C 0.341sol.49.9° C	976 liq.84°C 1145 sol.20°C
Eutectique Organiques	67.1Naphtalène + 32.9%Acide benzique	67	123.4	0.130liq.100°C 0.282sol.38°C	n.d
Acide gras	Acide caprique	32	152.7	0.153liq.38.5° C	878liq.45°C 1004sol24°C
Acide gras	Acide stéarique	69	202.5	0.172liq.70°C	848liq.100°C 96.5sol 24°C

---

---

## **Chapitre III : MATERIELS ET METHODES**

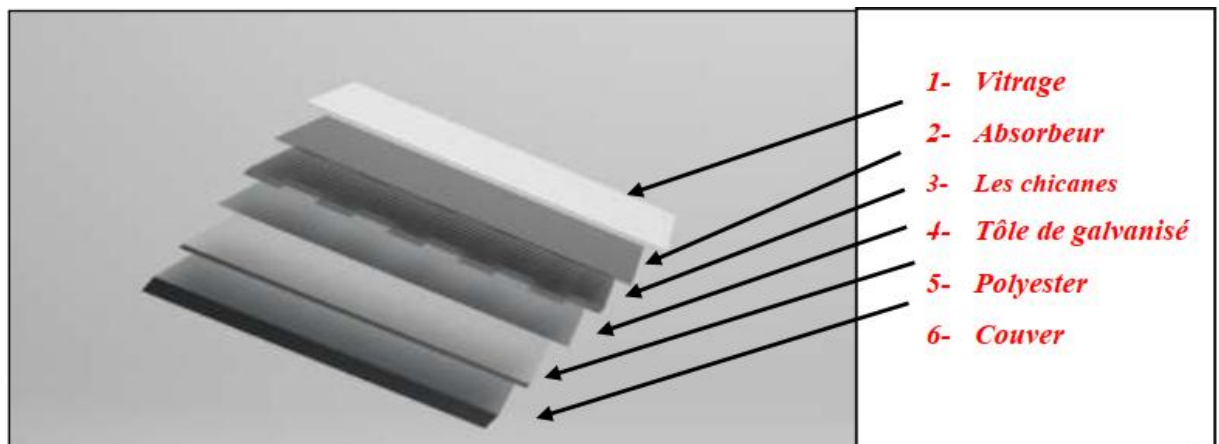
---

---

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

#### III.1.1 Description du prototype expérimental :

Dans cette partie, nous donnerons une description illustrative du prototype testé dans le cadre de la thèse de Master2 (**Fig.III. 1**). Pensez aux séchoirs solaires de type indirect, ces deux séchoirs solaires sont équipés de la possibilité d'étudier changements thermiques et cinétique de séchage. Séchoir simple unitaire indirect production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à simple circulation et une seule épaisseur de verre de 5mm, avec une surface inclinée, et adsorbée en profilé aluminium 0,8 mm peint en noir mat, dimensions 2 m x 1 m. isolation thermique Fabriqué en polystyrène, dans ce cas, utilisez du polystyrène d'une épaisseur de 4 cm au-dessus contreplaqué et parties latérales. La distance entre l'absorbeur et le vitre est de 2,5 cm.



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

#### III.1.1.1 Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins):

Ce système contient un collecteur d'air plat avec des chicanes qui permettent cette rendre l'écoulement turbulent près de la plaque absorbante et augmenter la surface Connectez-vous à celui-ci, afin d'améliorer l'efficacité thermique (**FigIII.2**).Dimensions et forme des chicanes intégrées dans le capteur solaire à air avec chicanes.

(**FigIII.2**) [Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., & Wang, P. (2014)].

$$L_{fin} = 200 \text{ mm}$$

$$H_{fin} = 50 \text{ mm}$$

$$S_{fin} = 40 \text{ mm}$$



$D_{fin}$  = 40 mm

$t_{fin}$  = 0.5 mm

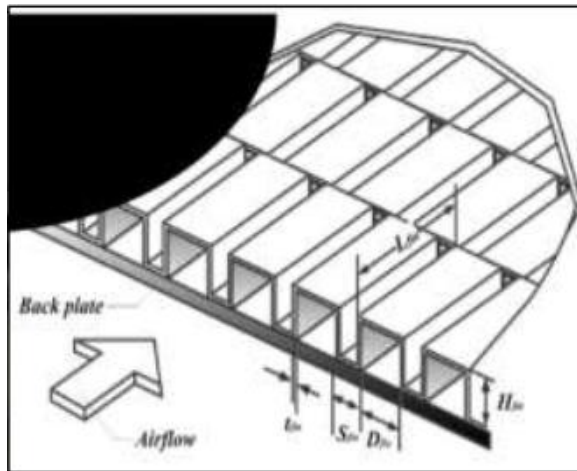


Fig.III.2 dimensionnements des chicanes



Fig.III.3. capteur solaire avec chicanes

### III.1.1.2. Capteur solaire à air avec roches:

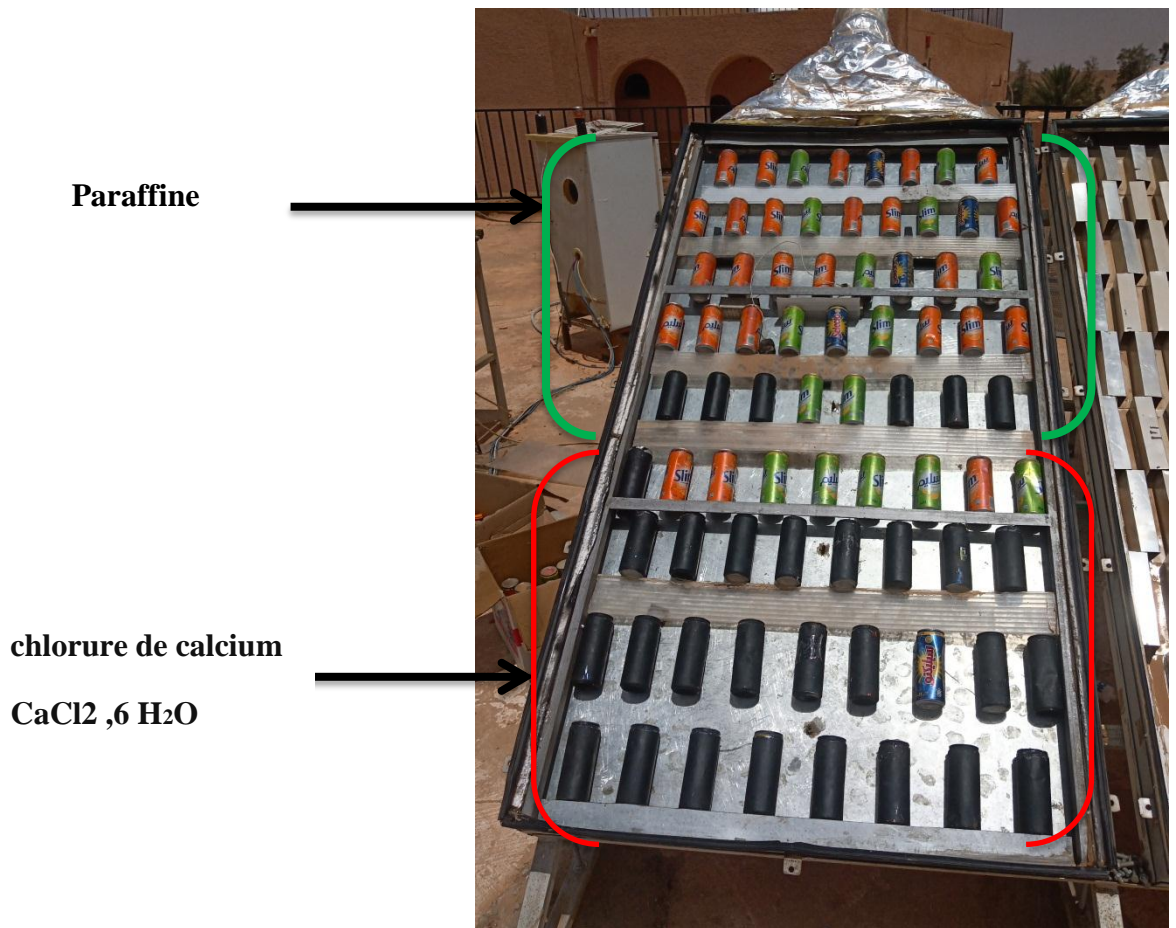
Ce système dispose d'un capteur plan à air doté de roches noir de poids de 86 Kg e, dont elles permettent déprendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et stocker l'énergie thermique, afin d'améliorer le rendement thermique (**FigIII.4**).



**FigIII.4** capteur solaire avec roches

### III.1.1.3. Capteur solaire à air avec cannettes:

Ce système dispose d'un capteur plan à air doté des cannettes de 33 cl remplis de deux matériaux défèrent, le premier matière est de Paraffine et le deuxième est de chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ , dont elles permettent de rendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et d'augmenter la surface de contact avec elle et stocker l'énergie thermique, afin d'améliorer le rendement thermique (**FigIII.5**).



FigIII.5.captteur solaire avec cannetes



FigIII.6 capteurs solaires avec cannetes et avec chicanes

**III.1.1.4.L'armoire de séchage :**

Il mesure 1,17mètre de haut, 0,55 mètre de long et 0,55 mètre de large 4clais (étagères) sur les quelles est placé le produit à sécher. L'air chaud entre par haut et traverse les racks avec un flux de chaleur forcé des ventilateurs ce qui crée un écoulement forcé (**Fig. III.7**).



FigIII. 7. Photographe d'une armoire de séchage (frigo)



FigIII. 8. les séchoirs solaires de type indirect expérimentés

### III.1.2. Modification du séchoirs solaires et de la salle de séchage :

L'image (A) nous montre l'état initial du séchoir solaire et de la salle de séchage où nous avons remarqué que le canal de transfert de chaleur vers la salle de séchage est un peu long, ce qui a conduit à la perte de température, et nous avons également remarqué que la porte à la salle de séchage s'ouvre vers l'intérieur, ce que nous avons dû y installer comme le montre la photo (B), où nous réduisons la distance du canal de transfert de chaleur à la chambre de séchage, et faisons également pivoter la chambre de séchage pour que la porte s'ouvre vers l'extérieur.



FigIII.9.(A).état initial



FigIII.10.(B).état final

### III.1.3. Instrumentation des prototypes :

#### III. 1.3.1. Mesure des températures :

-Les thermocouples nickel-chrome-nickel-aluminium sont utilisés pour mesurer la température.

Type K. Ces thermocouples, d'un diamètre de 0,05 mm, peuvent atteindre des températures de 1370 K

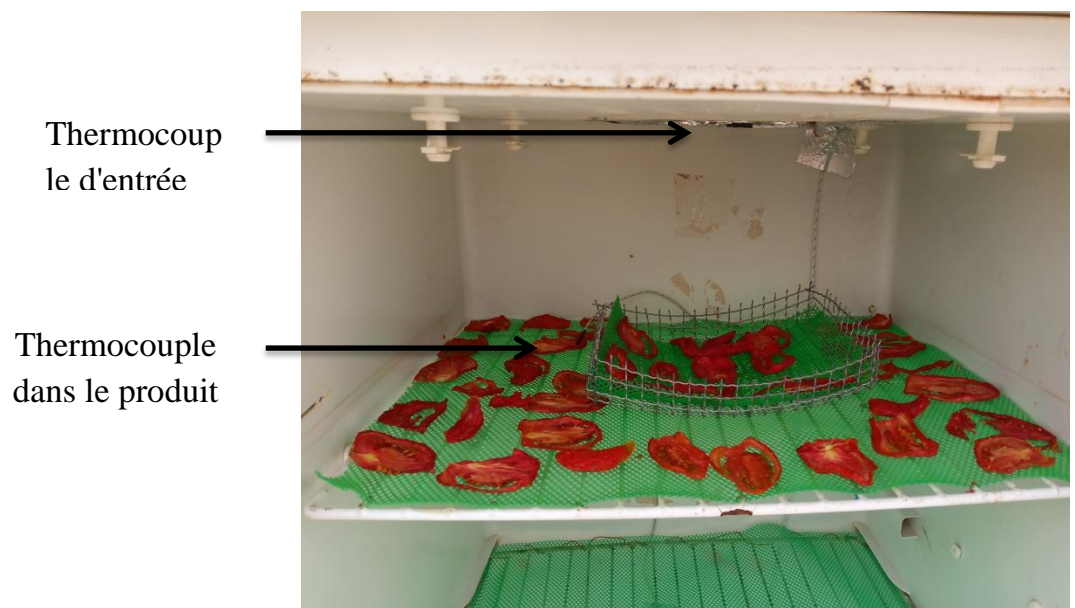
et permettent une précision de 0,1°C.

Chaque prototype de séchoir solaire indirect a été développé avec 6 thermocouples :

-Il est utilisé pour surveiller la température à l'intérieur du séchoir solaire circulant dans le flux d'air en mouvement, tandis que les thermocouples restants sont placés à l'intérieur du matériau de conservation de la chaleur

-L'un des thermocouples est placé à l'intérieur du conduit de transfert de chaleur après la position du ventilateur utilisé pour aspirer l'air du séchoir solaire. leur emplacement est montré sur la (**FigIII.11**)

Deux thermocouples sont installés au niveau de l'entrée et l'autre dans le produit à sécher de la armoire de séchage (Frigo), pour indiquer la température de l'air acheminé vers la chambre de séchage des échantillons (**FigIII.12**)



**FigIII.11** Position des thermocouples dans l'armoire de séchage (Frigo)



FigIII.12.Position des thermocouples dans les séchoirs solaires

**(T.C)** → thermocouples

**(T.C1 ,T.C3 ,T.C4 ,T.C5 ,T.C7)** → pour mesurer la température d'air l'intérieur du capteur solaire avec MCP

**(T.C14 , T.C13 T.C11 , T.C10 , T.C09 , T.C12)** → pour mesurer la température d'air l'intérieur du capteur solaire (chicanes)

**T.C2, T.C6** → pour mesurer la température à l'intérieur du matériau qui conserve la chaleur

**(T.C8 ,T.C15)** → pour mesurer la température entre le capteur solaire et la chambre de séchage

### III.1.3.2.Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :

La station radiométrique se compose de deux parties :une partie fixe constituée d'un Pyromètre de type EKO, pour mesurer le rayonnement global sur un plan horizontal et d'un Pyromètre différentiel de type EPPLEY pour la radiométrie à plan incliné 32° et plein sud. Partie mobile (système de suivi solaire) équipée de Le thermomètre se réfère au disque du soleil, afin de mesurer le rayonnement direct, et Pyromètre de type EKO, avec pare-soleil pour mesurer l'éclairage diffuse sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une "sonde thermo-igrométrique T echoel" avec un étalonnage précis égal à ± 1,5%, sensibilité à température ambiante est de 0,1 (°C / mV) et la plage La mesure s'étend de 0 à 100 % HR, de -40 à +60°C. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont connectés pour la marque

CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x (**FigIII.13**). celui-ci est en ligne Via l'interface RS232 vers un PC. Par conséquent, ces données sont collectées quotidiennement 24 heures sur 24 en cinq minutes.



**FigIII.13.** Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, température et d'humidité relative de l'air ambiant

### III.1.3.3. Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage :

- ✓ La vitesse de l'air de séchage est mesurée à la sortie du séchoir solaire de type indirect.
- ✓ Les mesures sont effectuées avec un anémomètre Testo 440.
- ✓ Humidité relative Également mesuré avec une sonde thermomètre testo 610.



**FigIII.14.** Anemometer Test o 440 + thermo-hygromètre T esto 610

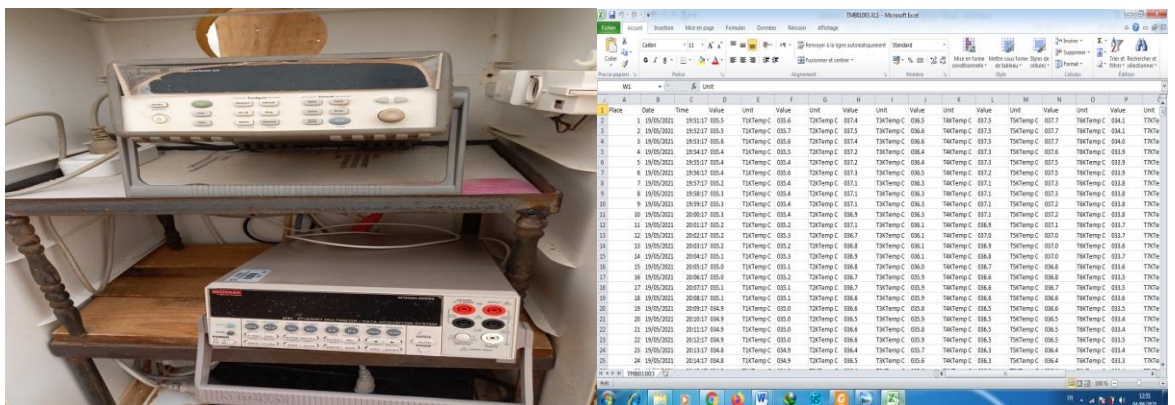




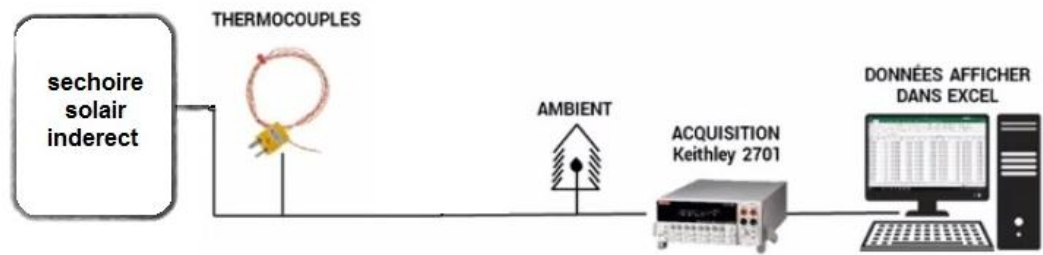
FigIII.15.ventilateur utilisé pour aspirer l'air du capteur solaire vers chambre de séchage

### III.1.3.4 Acquisition et traitement des données :

Keithley 2701 Data Acquisition combine un multimètre de résolution 6,5 digits (22bit) un système de commutation à 40 canaux Contrôlé par un ordinateur et équipé d'un Logiciel d'acquisition de données Excellant.



FigIII.16. Photographie de systèmed'acquisition et de traitement des données



**FigIII.17.** le système d'acquisition et de traitement des données par keithley 2701

### III.1.3.5. Channel Température Recorder PCE-T 1200 Caractéristiques :

- Contrôle : commutateur LSI à microprocesseur mono puce
- Écran : Écran LC 82 x 61 mm avec rétro éclairage
- Type de capteur : Type K, type J, type t, type E, type R, type S
- Résolution : 0,1 °C / 1 °C- Part de perte de données : 0,1 %
- Intervalle d'enregistrement des données : Automatique : 1 ... 3600 secondes,
- Manuellement : mesure en appuyant sur le bouton d'enregistrement
- Carte mémoire : carte mémoire SD (1 ... 16 Go)- 12 connexions pour T 1 à T 12
- Autres spécifications : Régler l'heure (année/mois/date/heure/minute/seconde)

Unité de température °C ou F

- Compensation de température : Compensation de température automatique pour tous les types de capteurs
  - Compensation linéaire : Compensation linéaire sur toute la plage
  - Connexion du capteur : connexion à 2 broches pour élément thermique
  - Fonction de maintien des données : gèle les valeurs de mesure sur l'écran
  - Fonction Max / Min : Enregistre la valeur maximale et minimale
  - Taux d'échantillonnage : environ 1 seconde- Température de fonctionnement : 0 ... 50 °C
  - Transfert de données : câble RS 232 / USB- Humidité de l'air : Max. 85 % HR
  - Dimensions : 225 x 125 x 64 mm- Equipement standard : 2 x capteur de type K
- Carte mémoire de 2 Go - câble USB -Câble RS232Logiciel - Adaptateur 9V
- Fonction d'arrêt : arrêt automatique pour prolonger la durée de vie de la batterie (Ajustable)

- Équipement en option : Connecteur miniature pour entrée analogique TF-550

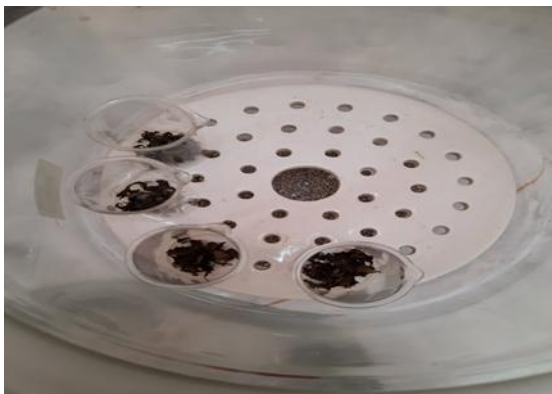


**FigIII.18.** Acquisition et de traitement des données-Recorder PCE-T 1200-

### III.1.4.MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER :

#### III.1.4.1.Dessiccateur :

C'est un équipement de laboratoire en verre qui aide à protéger les substances contre humidité. Il se compose d'un réservoir circulaire surmonté d'un couvercle. Cet ensemble est muni d'un disque perforé et d'une quantité suffisante de desséchant (**gel de silice**) **FigIII.19.**



**FigIII.19.** Photographies de dessiccateur utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale

**III.1.4.2. Etuve :**

C'est un appareil de chauffage, qui fonctionne sous pression atmosphérique et permet Pour effectuer divers traitements thermiques. Dans notre travail, nous l'avons fixé à 105°C pendant 24 Une heure pour déterminer la teneur en matière sèche des échantillons préparés.



**FigIII.20** Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche

**III.1.4.3. Balance :**

C'est un instrument de mesure utilisé pour suivre la masse pendant le séchage. Le suivies réalisée par pesées rune balance de précision (Type KERN PCB 3500-2 Balance de Précision à500g).



**Fig.III.21.**Balance KERNABT 220-4M: 20g/0,1m



**FigIII.22**Balance KERN PCB 3500-2: 3500g/

**III.1.4.4. Agitateur Magnétique Chauffant :**

L'agitateur est un équipement de laboratoire visant à assurer l'homogénéité d'un courtier. Il existe différents types d'agitateurs selon le milieu et la composition unité et de l'effet désiré



**FigIII.23** Agitateur Magnétique Chauffant utilisé au laboratoire

**III.1.4.5. Bêchers :**

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



**FigIII.24.**Becher utilisé au laboratoire

**III.5.MATERIEL VEGETAL :****III.5.1.Le basilic :**

Le basilic commun, *Ocimum basilicum*, appartient à la famille des Lamiacées. C'est une plante annuelle aromatique, d'environ 50 cm de hauteur, a des feuilles ovales vert vif, une tige anguleuse et de petites fleurs coniques blanches. Il existe plus de 150 espèces de basilic dans le monde, et il a de nombreuses utilisations différentes.

Son apport énergétique est de 34.8 kilocalories par 100g. Elle contient environ 91.7% d'eau, 3.35% de protéine, 0.47% de lipides et 2.55% de glucides.

**FigIII.25.Le basilic****III.5.2.Le Persil :**

Le persil c'est un plante herbacée bisannuelle de la famille des Apiécées. Sa hauteur varie entre 6 et 20 cm. Il a de nombreuses tiges, qui poussent toutes à partir d'une seule racine, et les tiges sont dressées, arrondies et ramifiées. ... Les fleurs sont en groupes composés de couleur blanche et les inflorescences sont une tente composée. Le persil se distingue par son odeur piquante aromatique et ses feuilles vert vif. Parmi ses types figurant la syphilis municipale lisse et la syphilis frisée

**FigIII.26.Le Persil**

**III.5.3.La coriandre :**

La coriandre c'est une plante herbacée annuelle à forte odeur aromatique, atteignant 50 cm de haut. Elle a des feuilles supérieures finement découpées et de petites fleurs blanches ou roses. Elle donne de petits fruits circulaires de couleur jaune à brune .La coriandre est une épice réputée.

apport énergétique est de 23 kilocalories par 100g. Elle contient environ 92.21% d'eau, 2.13% de protéine, 0.52% de lipides et 3.67% de glucides.



**FigIII.27.**La coriandre

**III.5.4.La tomate :**

La tomate c'est une plante cultivée dans les régions tempérées et chaudes, originaire d'Amérique du Sud du Pérou puis s'étendant à la plupart des pays du monde. Les feuilles du plant de tomate ont une merveilleuse propriété de repousser les moustiques et le reste des insectes, car elles extraient de ses feuilles et de ses tiges un antifongique, anti-inflammatoire et insecticide.

Apport énergétique est de 17 kilocalories par 100g. Elle contient environ 94.1% d'eau, 0.9% de protéine, 0.2% de lipides et 3.03% de glucides.



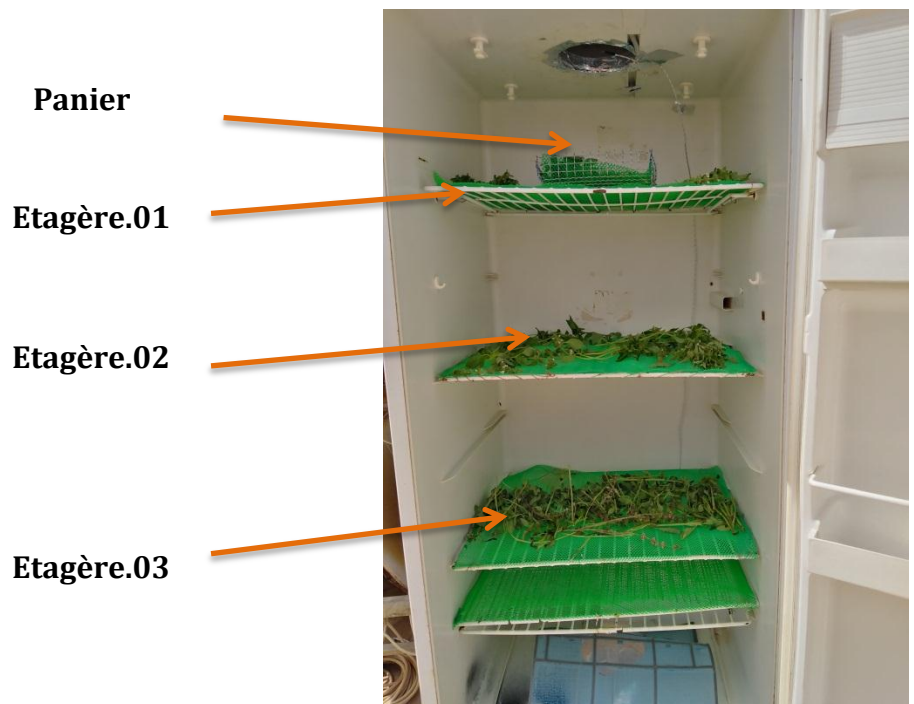
**FigIII.28.**La tomate

### III.6. Protocole de séchage :

#### III.6.1. Préparation de l'échantillon de basilic :

Nous trions et lavons le basilic à l'eau froide du robinet, puis secouons les branches coupées pour éliminer les petits insectes qui pourraient se trouver à l'intérieur, elles sont réparties uniformément sur les étagères de l'armoire de séchage (réfrigérateur) pour chaque séchoir et en mettons une quantité dans les trois paniers afin que nous puissions les peser à différentes périodes de temps de séchage pour obtenir des courbes de séchage cinétiques. Pour extraire les résultats et comparer les deux séchoirs solaires et à ciel ouvert, nous calculons la teneur en eau sur base sèche et humide, et enfin nous dessinons les courbes de teneur en eau en fonction du temps.

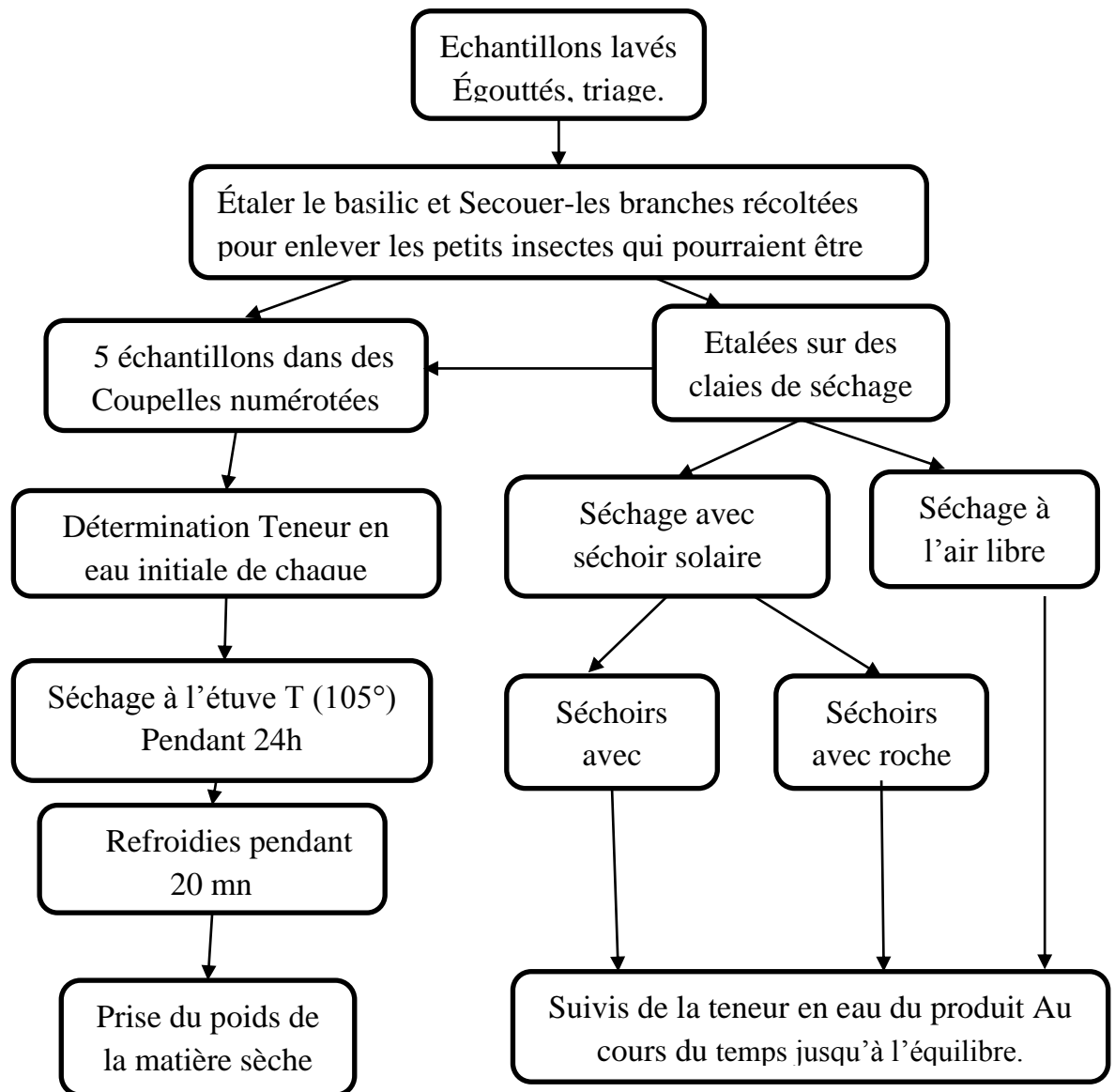
Prélever un petit échantillon du basilic préparé, puis couper ces branches en fines lamelles de 1 à 2 mm d'épaisseur, ces dernières ont été mise à l'étuve pour déterminer la teneur en eau initiale. pour déterminer la cinétique de séchage, nous avons procédé avec le protocole suivant



**FigIII.29.**quantités de basilic à séchée dans l'armoire de séchage (Frigo)



Pour déterminer la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole suivant (FigIII.30) :



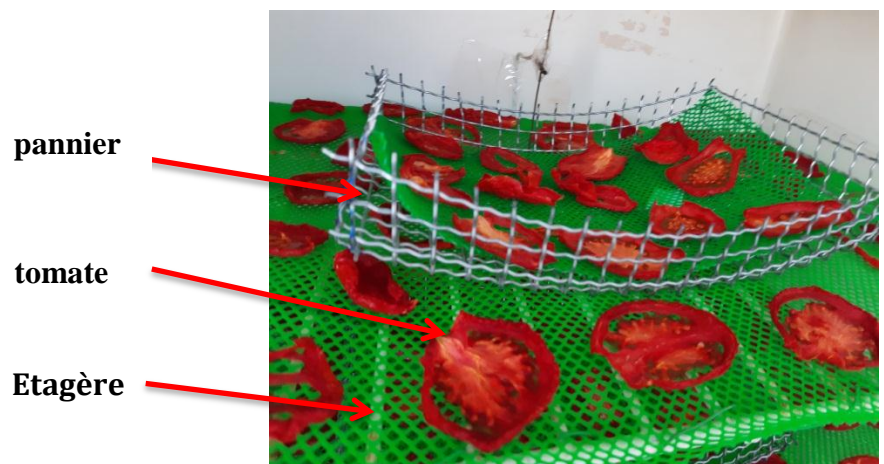
FigIII.30.Schéma représentant le protocole de séchage de le basilic

### III.6.2.Préparation de l'échantillon de la tomate :

Pour sécher une substance dans des séchoirs solaires, nous trions la matière à sécher, enlevons les graines, les brindilles et les feuilles de la plante herbacée pourrie, la lavons à l'eau et la laissons égoutter un peu. Dans notre cas, les tomates, nous avons préparé environ 3 kg Nous coupons le produit en petites tranches d'une épaisseur de 1 cm et d'un diamètre moyen de 3 ou 5 cm selon la taille du produit, les étagères de la salle de séchage (réfrigérateur)

et mettons un quantité dans les trois paniers afin que nous puissions le peser à différentes périodes du temps de séchage pour obtenir les courbes cinétiques de séchage pour extraire les résultats et comparer entre les séchoirs solaires et à ciel ouvert, puis nous calculons la teneur en eau sur humide et sec base, et à la fin nous avons tracé les courbes de teneur en eau en fonction du temps.

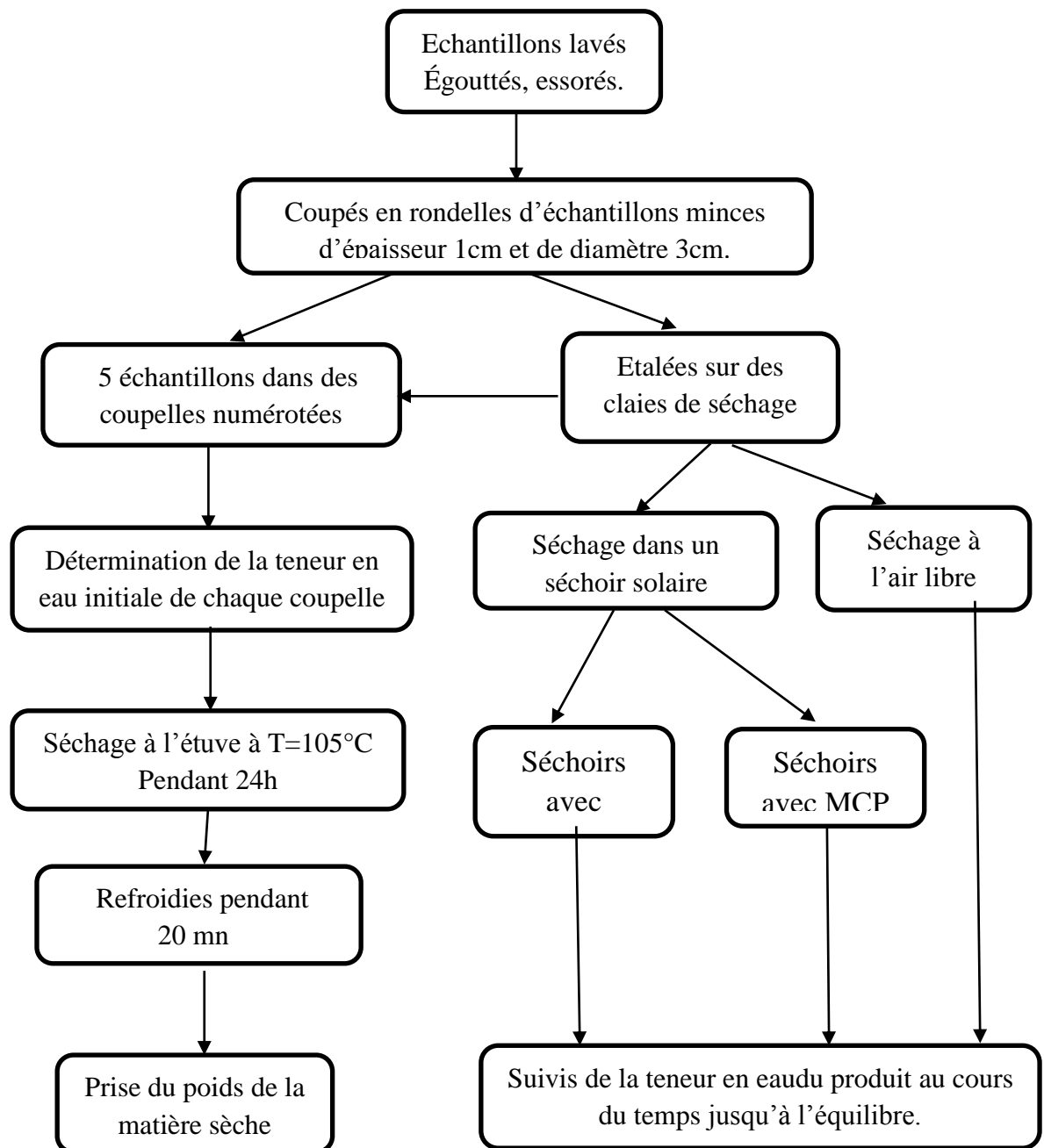
Prélever un petit échantillon de la tomate préparée, puis couper ces branches en fines lamelles de 0.5 à 1 cm d'épaisseur, ces dernière sont émétise à l'étuve pour déterminer la teneur en eau initiale. pour déterminer la cinétique de séchage, nous avons procédé avec le protocole suivant



**FigIII.31.**quantités de tomate à séchée dans l'armoire de séchage (Frigo)

Pour déterminer la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole suivant

(FigIII.32) :



FigIII.32. Schéma représentant le protocole de séchage de la tomate

**III.6.3. 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. A 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 :

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

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

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

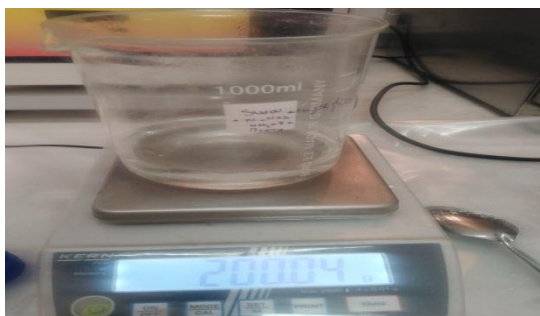
$m(\text{finale})$  : Masse de l'échantillon après mise à l'étuve en gramme.

**III.7. Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) pauvre en ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) :**

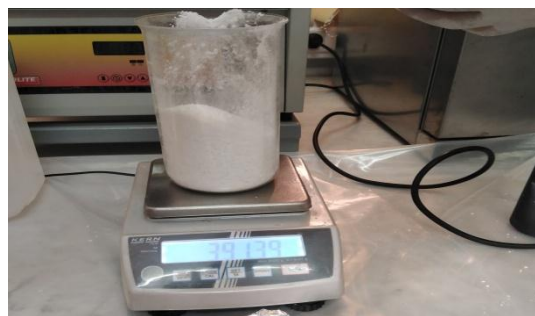
Le chlorure de calcium, de formule  $\text{CaCl}_2$  (masse molaire  $M = 111 \text{ g/mol}$ ), se présente dans les conditions thermodynamiques classiques sous la forme d'un solide blanc ( $\text{NaCl}$  fondu ou anhydre). Il est également présent sous forme de chlorure de calcium cristallisé ou hydraté  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (masse molaire  $M = 219 \text{ g/mol}$ ), . Facilement soluble dans l'eau et l'alcool. C'est un composé hygroscopique puissant, ce qui signifie qu'en présence d'eau, il réagit pour donner un hydrate en libérant de la chaleur. réaction du chlorure de calcium hydraté avec de l'eau; En pratique, On met 392 g de chlorure de calcium avec 200 g d'eau, puis on mélange le chlorure de calcium hydraté avec de l'eau dans un ballon fermé, ce qui assure une homogénéité et une agitation continue à une température de  $120^\circ\text{C}$ .

(Fig.III. 33, 34, 35).

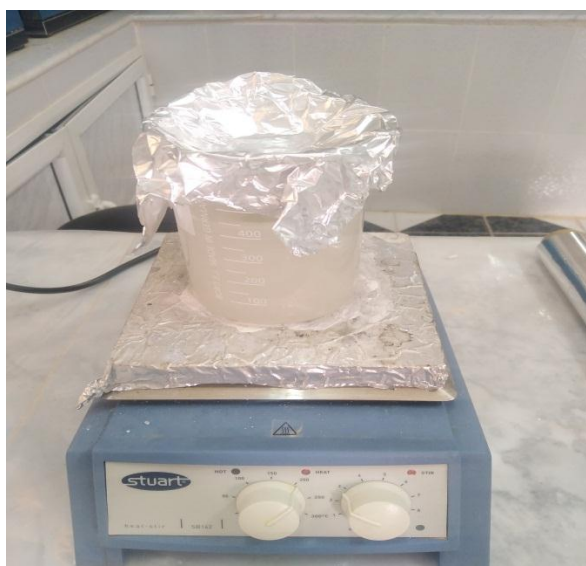
En fin de réaction, le produit préparé est versé dans des cannettes de 33 cl (Fig. III 36).



**FigIII.33.** pesé de l'eau (200g)



**FigIII.34.** pesé de  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (392g)



**FigIII.35.** mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau

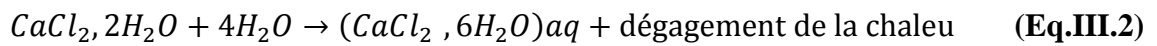


**FigIII.36 :** Matériau préparé pour le stockage de l'énergie thermique remplissage des cannettes par chlorure de calcium( $\text{CaCl}_2,6\text{H}_2\text{O}$ )

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

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

Ces expériences sont traduites selon les réactions suivantes :



### III.8. Préparation de matériaux à changement de phase paraffine :

On fait fondre une quantité importante de paraffine dans un bol en fer, puis on la verse dans des cannetes d'une contenance de 33 cl, moyens, pesant environ 240 g, et on les ferme hermétiquement (à l'aide de colle et de silicone).

La quantité utilisée dans le capteur solaire est d'environ 11014,80 g



**Fig.III.37.**paraffinesoide



**Fig.III 38.**dégivrer paraffine Verser dans les cannetes



FigIII.39: Outillages de travail



FigIII.40: Etat final

### III.9. Modélisation des cinétiques de séchage :

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

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{Eq.III.3})$$

Avec  $M_t$ ,  $M_e$  et  $M_0$  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 :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (\text{Eq.III.4})$$

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] :



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	HerdersonandPabis (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-TermsExponential Model	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kAt)$	[Corzo, et al., 2011]

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

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \tag{Eq. III.5.}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \tag{Eq. III.6.}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \tag{Eq. III.7.}$$

$$\overline{MR_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad (\text{Eq. III.8.})$$

**Avec :**

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.

---

---

## **Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION**

---

---

### IV.1 RESULTATS ET DISCUSSION :

Les expériences ont été menées pendant la période du 12 mai au 08 Juin 2021 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 de type indirect. Les expériences ont été réalisées tous les jours dans des conditions de fonctionnement réelles de la région de Ghardaïa. Les caractéristiques de séchage de coriandre, du basilic, du persil et de la tomate ont été étudiées. La performance thermique des prototypes de séchoir solaire de type indirect est mesurée en termes des températures dans différentes positions des prototypes. Le débit massique d'air est fixé à 70 kg/h pour chaque cas.

#### IV.1.2. Performance thermique de prototype de séchoir solaire indirect sans produits :

Les différentes expériences qui ont été faites sont les suivantes :

- ✓ **Test N°01** : Tester l'adjonction des chicane dans la veine d'air mobile par rapport à un fonctionnement de prototype sans adjonction des chicane (*Figure IV.1*).
- ✓ **Test N°02** : Tester les matériaux de stockage thermique par chaleur sensible par rapport à un fonctionnement de prototype avec adjonction des chicane dans la veine d'air mobile (*Figure IV.2*).
- ✓ **Test N°03** : Tester les matériaux de stockage thermique par chaleur latente par rapport à un fonctionnement de prototype avec adjonction des chicane dans la veine d'air mobile (*Figure IV.3*).

##### IV.1.2.1. Test N°01 : du 26 au 27-05-2021

Nous commençons nos essais expérimentaux dans un premier temps, dans l'un des séchoirs solaires de type indirect, nous avons intégré des chicane dans la veine d'air mobile (FigIV.1). La (FigIV.2) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes indiqué dans le schéma (Fig IV.3).

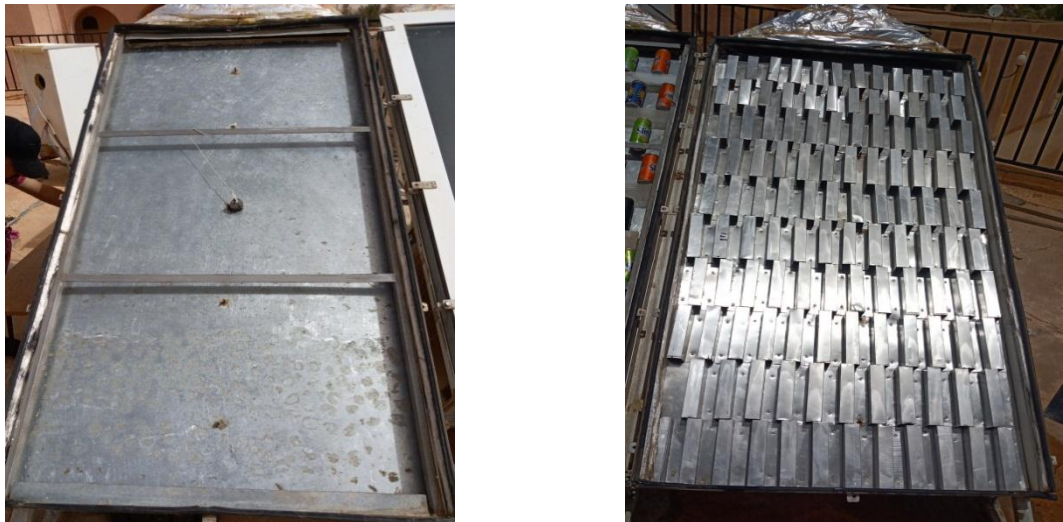
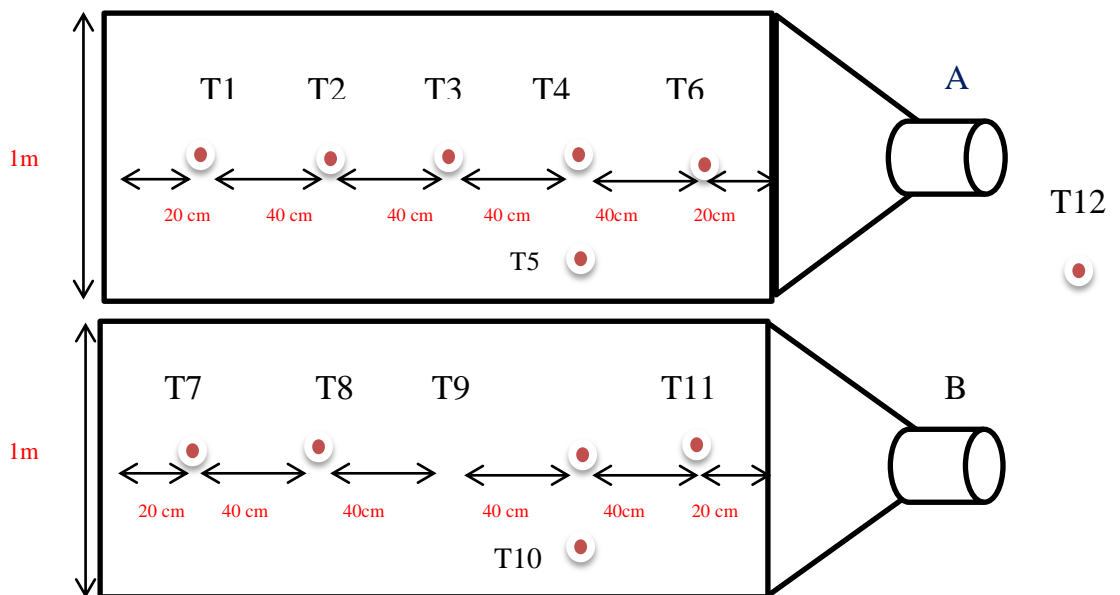
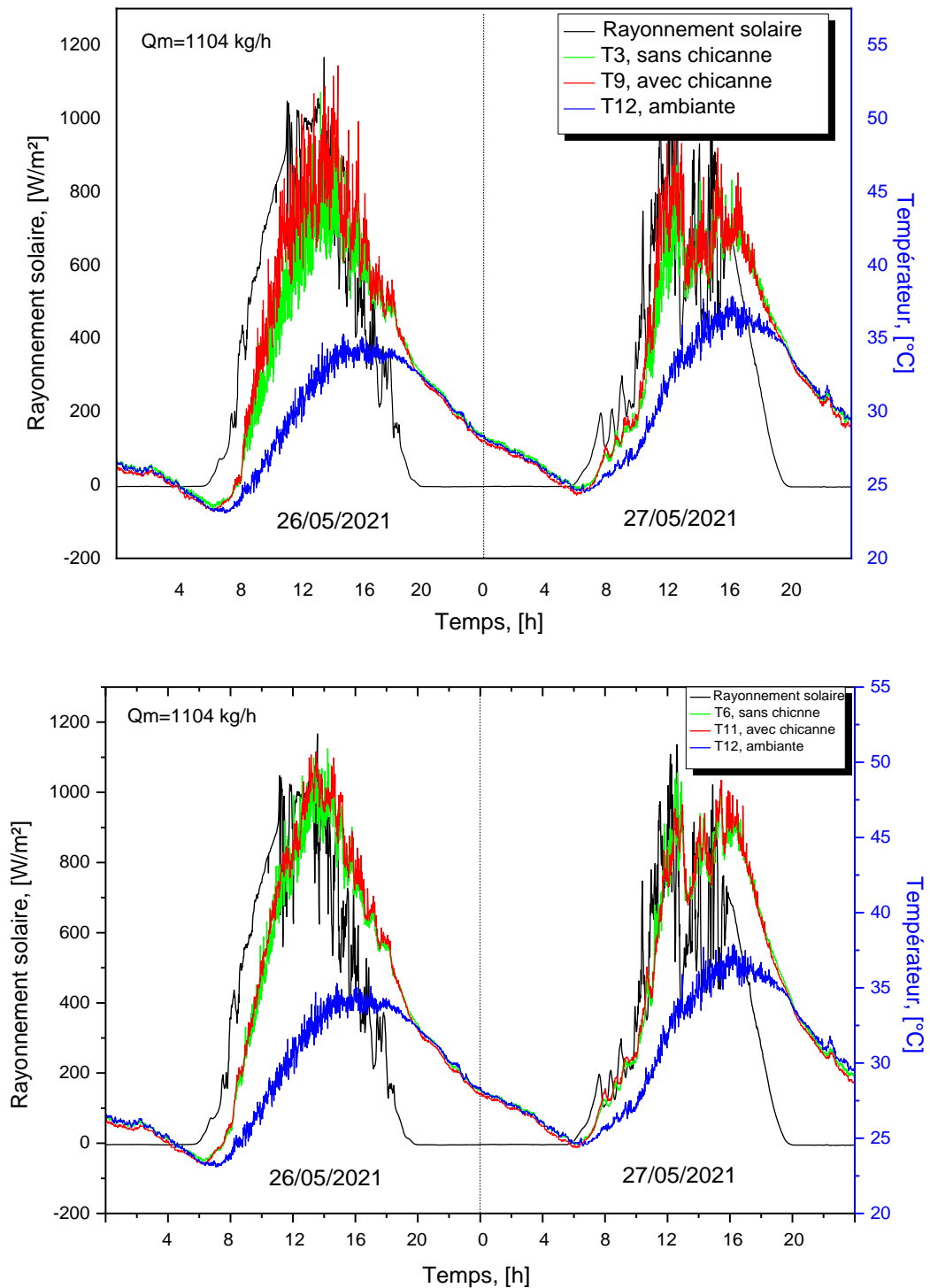


Fig IV.1 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).



FigIV.2 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B).

Pour le débit maximum ( $Q_m = 2.28\text{Kg/h}$ ) :



**Fig IV.3:** Evolution des températures T3, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.2) pour les journées du 26 au 27 Mai 2021

**IV.1.2.2. Test N°02 : du 12 au 13-05-2021**

Dans un deuxième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type indirect, nous avons intégré des chicanes dans la veine d'air mobile et dans le deuxième, nous avons fixé sur la plaque d'aluminium, un lit de roche rempli de 86 kg de roche (Fig IV.4). La (Fig IV.5) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes indiqué dans le schéma (Figure IV.6).



Fig IV.4 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).

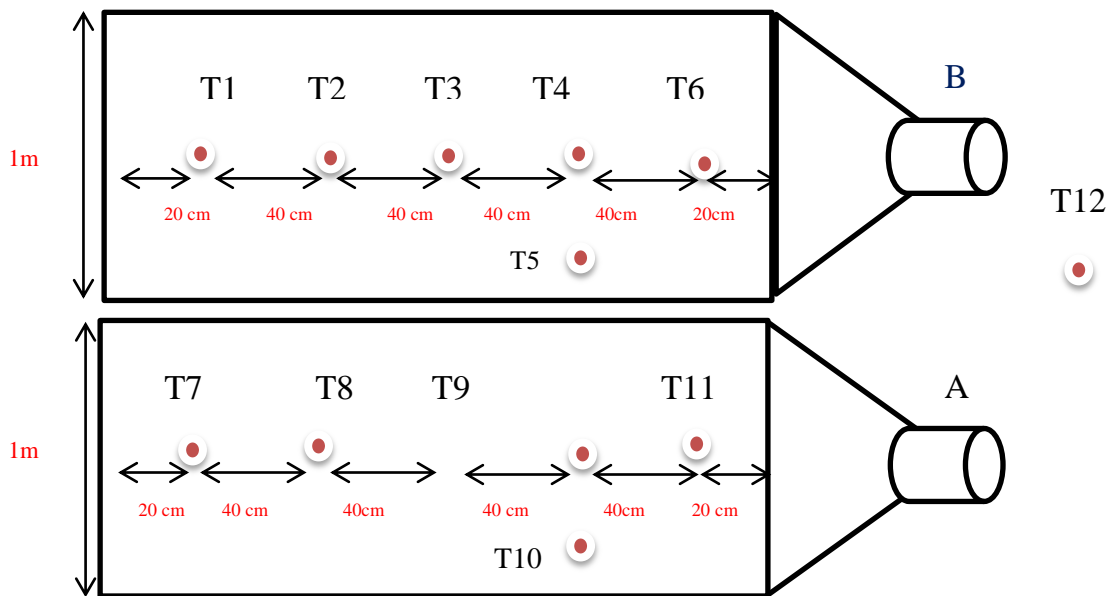


Fig IV.6 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B).

Pour le débit minimum ( $Q_m=2.28 \text{ kg/h}$ ) :

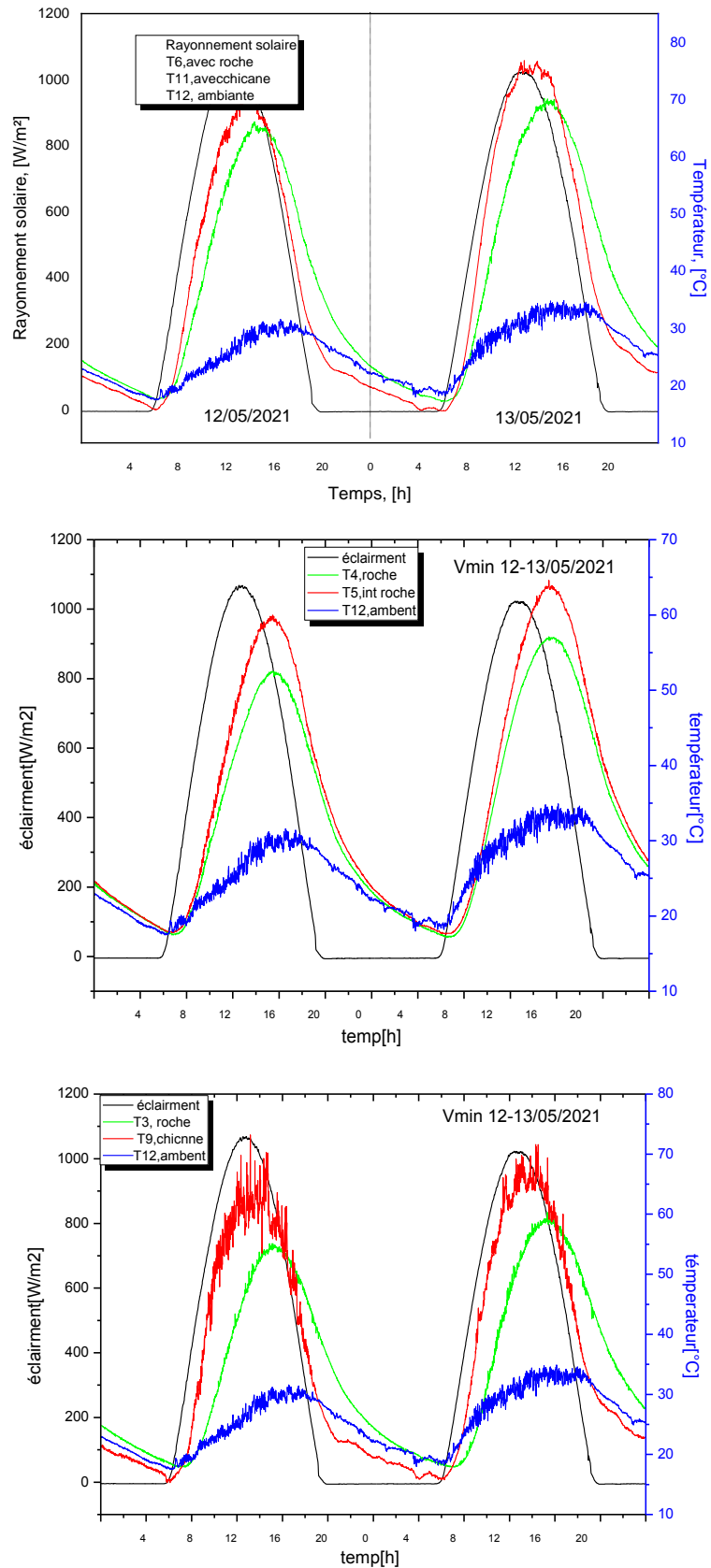


Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV6) pour les journées du 12 au 13 Mai 2021



Pour le débit moyen ( $Q_m=276.12 \text{ kg/h}$ ) :

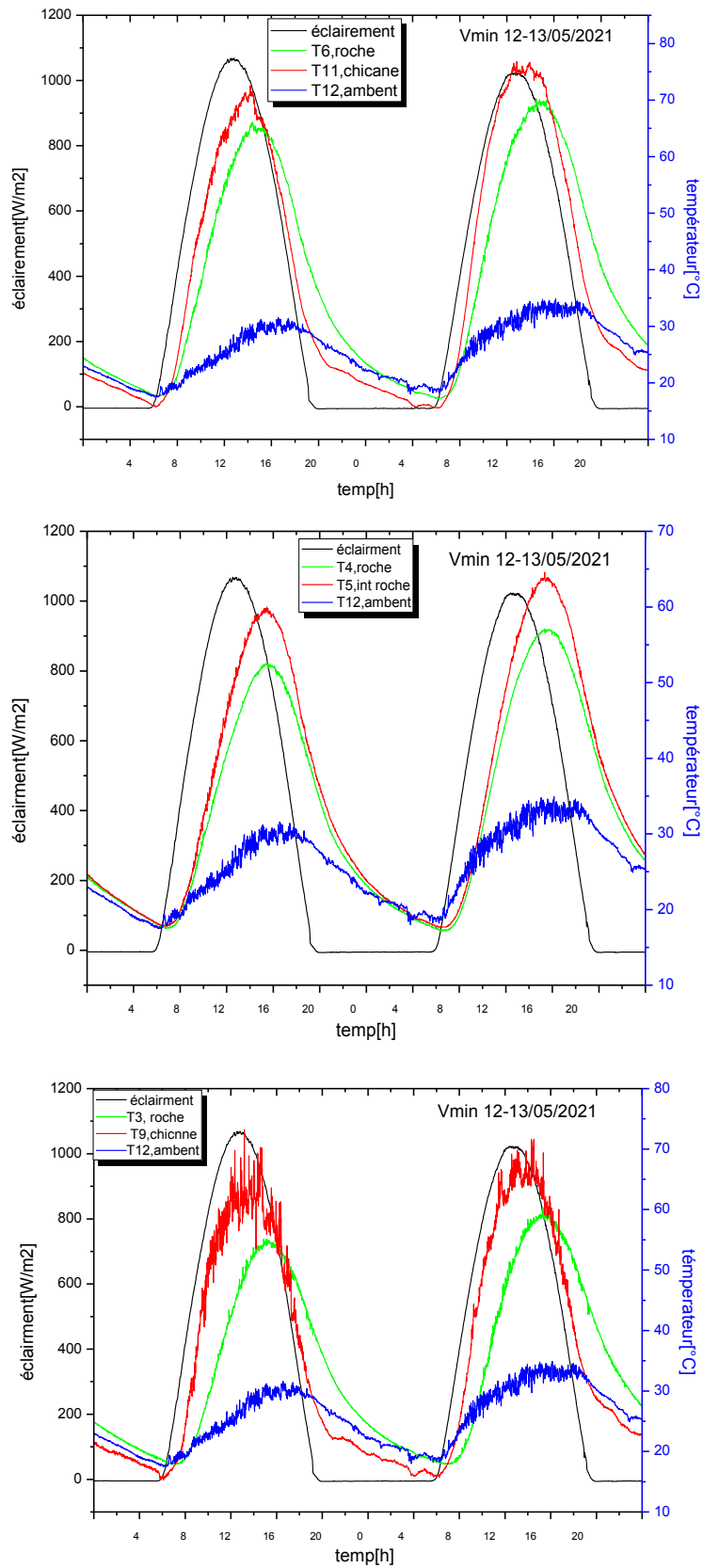


Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.6) pour les journées du 26 au 27 Mai 2021

Pour le débit maximum ( $Q_m=1104.48$  kg/h) :

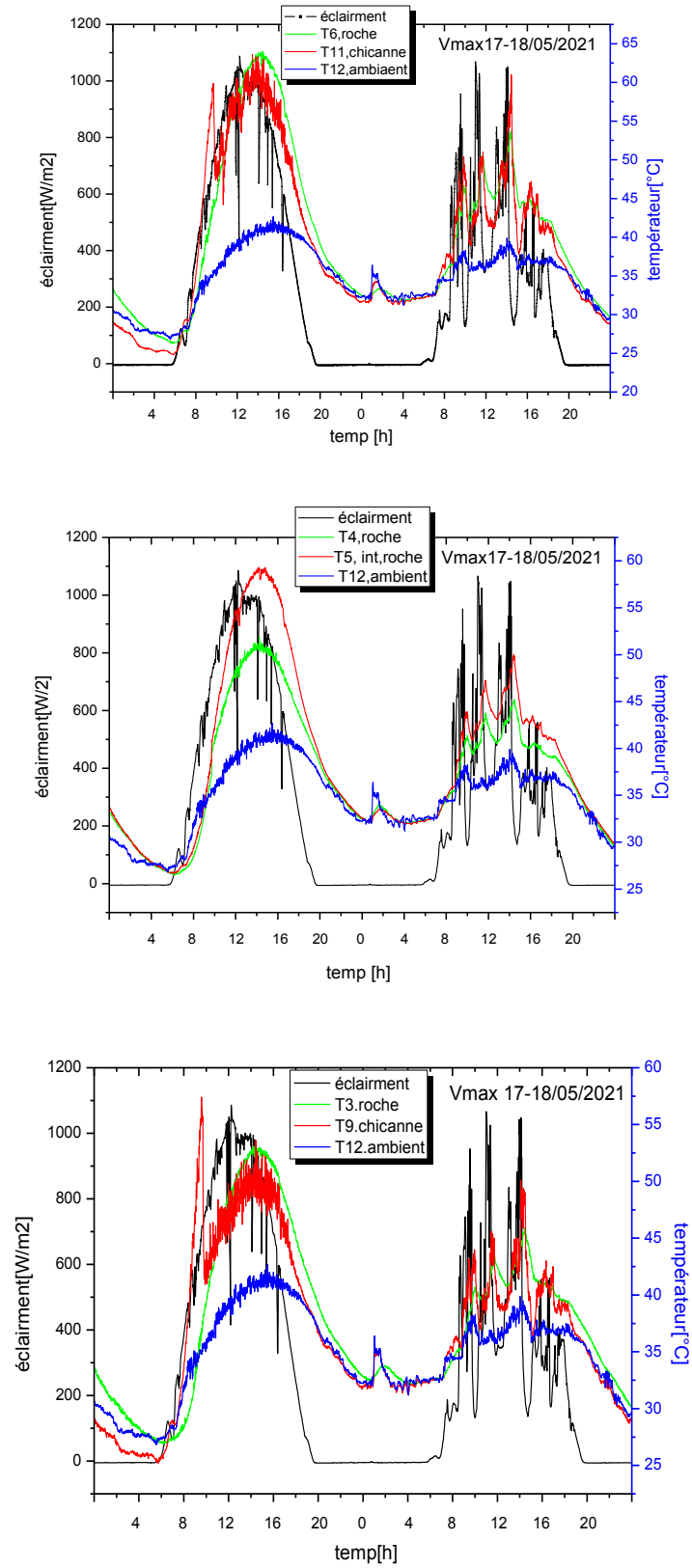


Fig IV.5 : Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.6) pour les journées du 17 au 18 Mai 2021

IV.1.2.3. Test N°03 : du 07 au 08-06-2021

Dans un troisième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type indirect, nous avons intégré des chicanes dans la veine d'air mobile et dans le deuxième, nous avons fixé sur la plaque d'aluminium, des canettes en aluminium rempli de 20 kg de chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (les trois premières lignes des canette) et de 11 kg de paraffine (les autres lignes des canette) et (Fig IV.7). La (Fig IV.9) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes indiqué dans le schéma (FigIV.8).



Fig IV.7 : prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (gauche) et avec chicanes (droite).

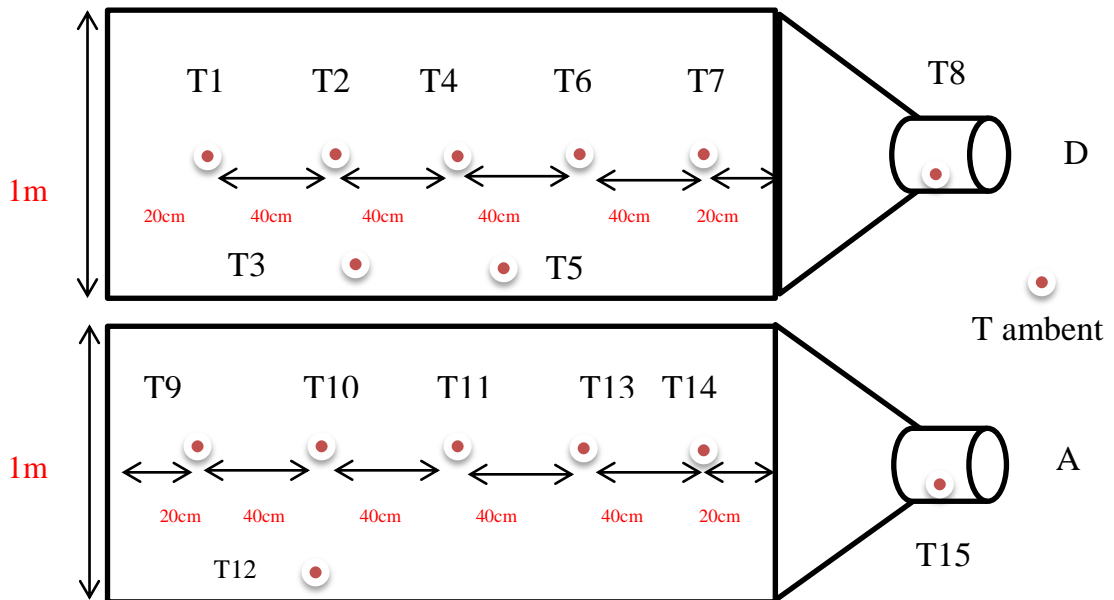


Fig IV.8 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect sans chicanes (A) et avec chicanes (B).

Pour le débit minimum ( $q_m=2.28\text{Kg/h}$ ) :

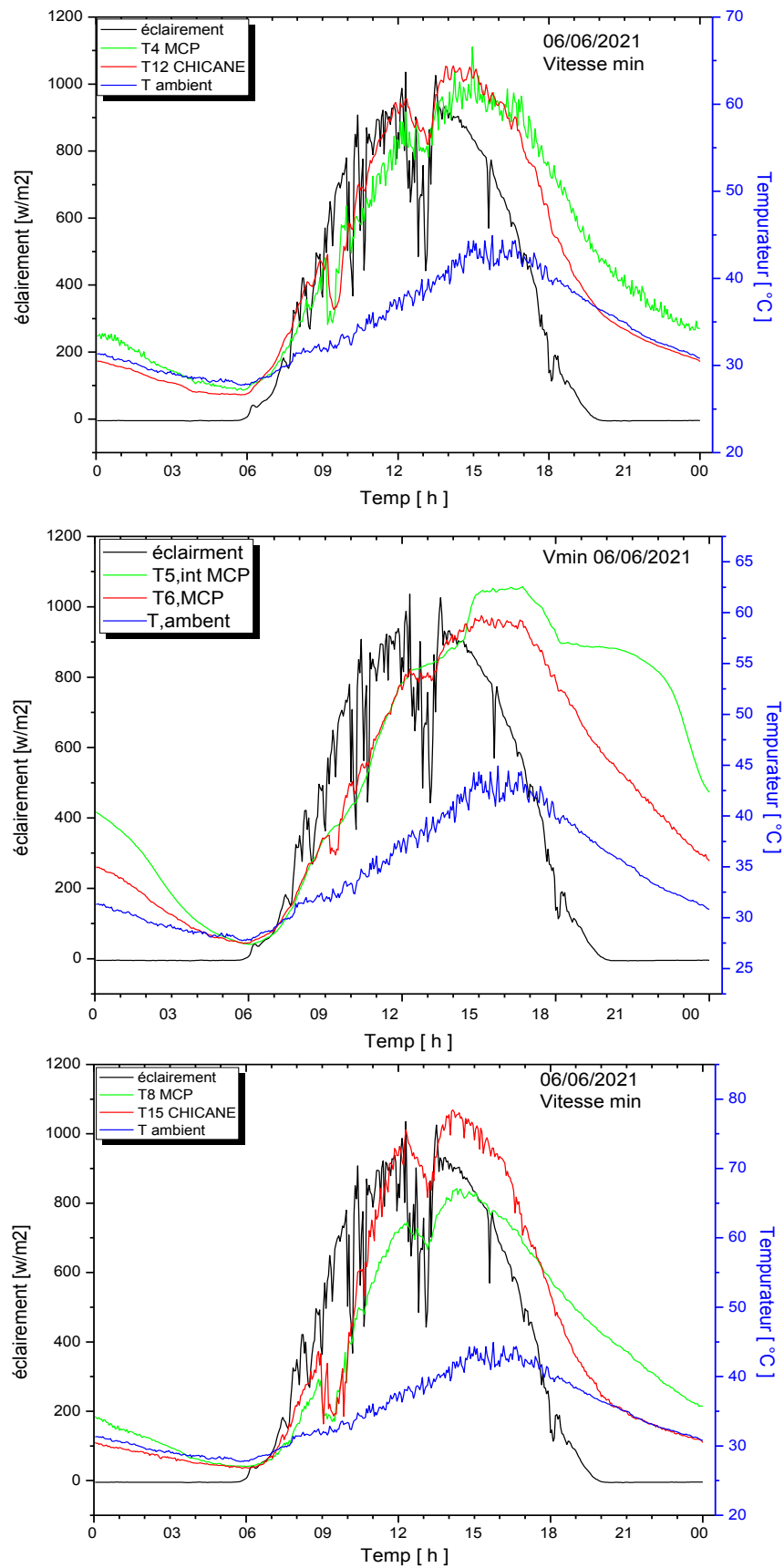
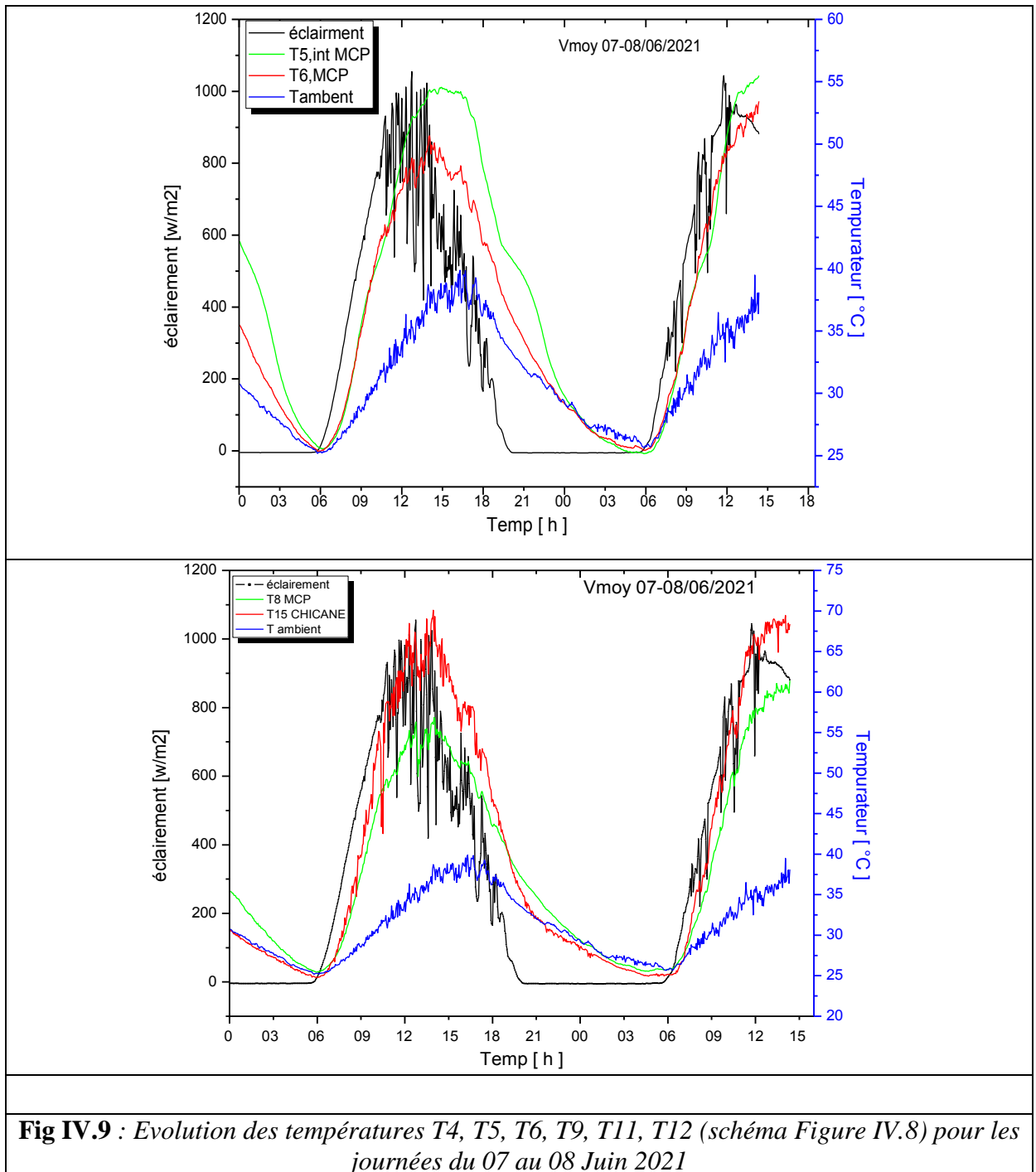


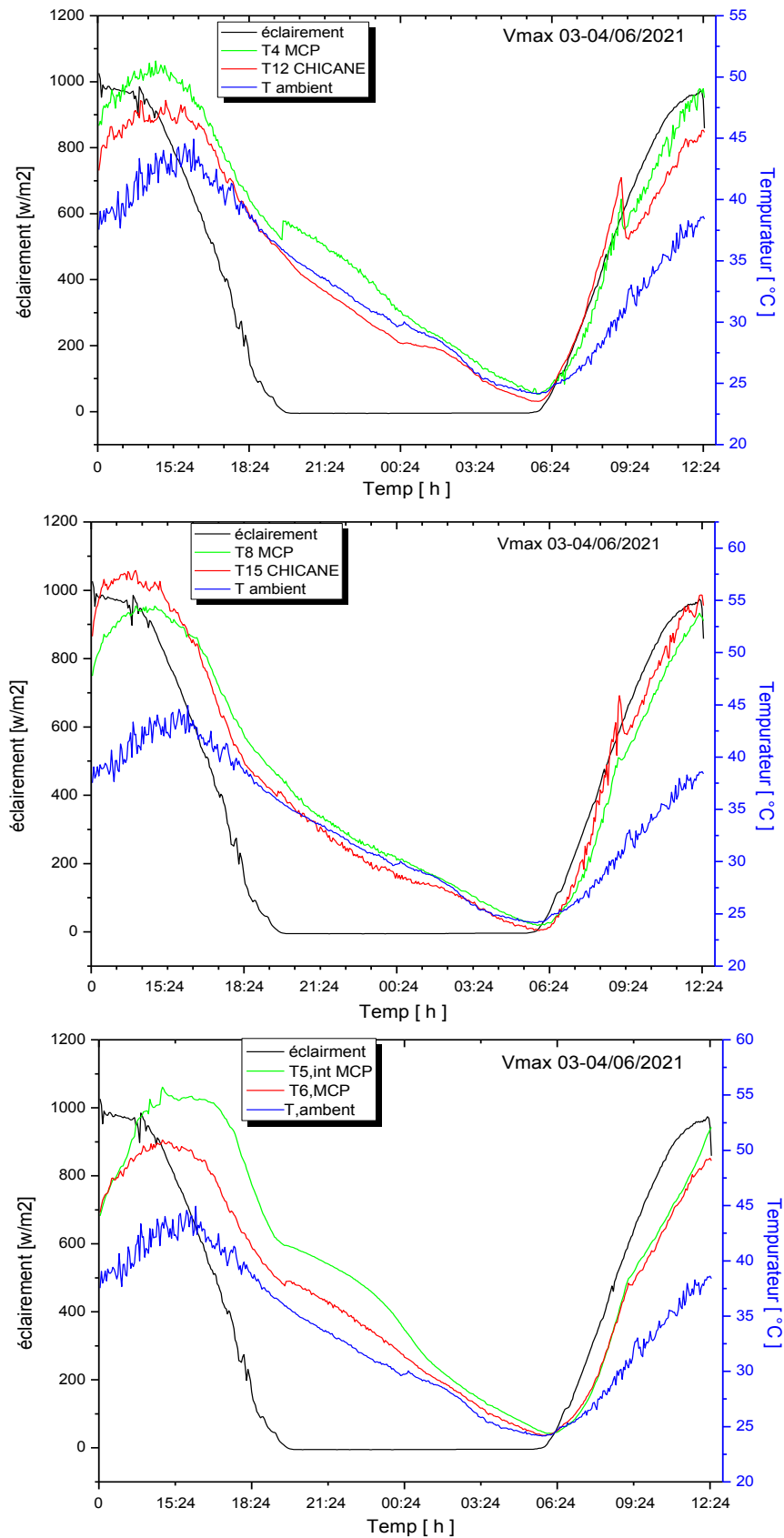
Fig IV.9: Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.8) pour les journées du 06 au 06 Juin 2021

Pour le débit moyen ( $q_m=276.12\text{Kg/h}$ ) :



**Fig IV.9** : Evolution des températures  $T4$ ,  $T5$ ,  $T6$ ,  $T9$ ,  $T11$ ,  $T12$  (schéma Figure IV.8) pour les journées du 07 au 08 Juin 2021

Pour le débit maximum ( $q_m=1104.28\text{Kg/h}$ ) :



**FigIV.9 :** Evolution des températures T4, T5, T6, T9, T11, T12 (schéma Figure IV.8) pour les journées du 03 au 04 Juin 2021

Au cours de la journée, la température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire de type serre atteint une valeur comprise entre 60°C et 70°C pour une température ambiante comprise entre 30°C et 35°C (figure). La température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire de type indirect, équipée avec des systèmes de stockage par chaleur sensible (roche), et MCP et chlorure de calcium (figure 2, 3) et sans des systèmes de stockage (chicane) (figure 4, 5), est inférieure à celle de séchoir solaire de type indirect sans système de stockage de chaleur. Cette différence est due au fait que l'énergie solaire absorbée par le matériau de stockage. En l'absence du système de stockage, l'énergie solaire absorbée par le matériau de stockage engendre une élévation de son température et par conséquent une augmentation des transferts thermiques convectifs entre le matériau de stockage et l'air, par rayonnement entre la plaque et les autres composants de séchoir solaire de type indirect.

Lorsque le rayonnement solaire est de faible intensité (à la fin de la journée), la température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire de type indirect sans matériau de stockage baisse rapidement jusqu'à atteindre la température ambiante. Dans le séchoir solaire de type indirect avec le système de stockage de chaleur, la température de l'air baisse au cours du temps de façon lente. Il est à noter qu'en absence de rayonnement solaire, la température de l'air dans le séchoir solaire de type indirect avec le matériau de stockage est supérieure à celle de séchoir solaire de type indirect sans le matériau de stockage.

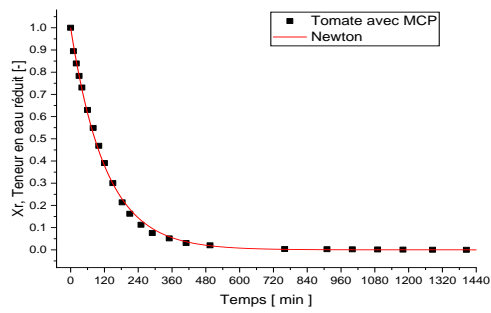
Ce résultat montre qu'un séchoir solaire de type indirect équipée d'un matériau de stockage peut être utilisée comme séchoir de type indirect pour accroître la durée journalière de séchage.

La présence d'un système de stockage thermique dans un MCP réduit donc la température de l'air de séchoir solaire de type indirect à des valeurs utilisées pour le séchage des denrées agro-alimentaires.

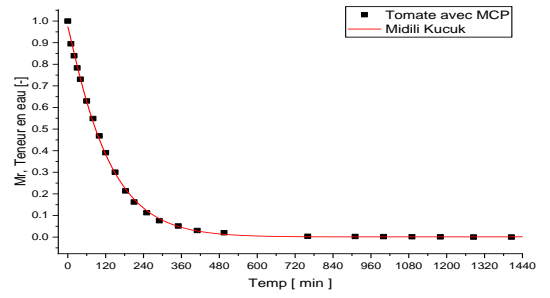
### **IV.1.3 SECHAGE DE LE BASILIC, LA TOMATE**

#### **IV.1.3.1 Courbes de séchage**

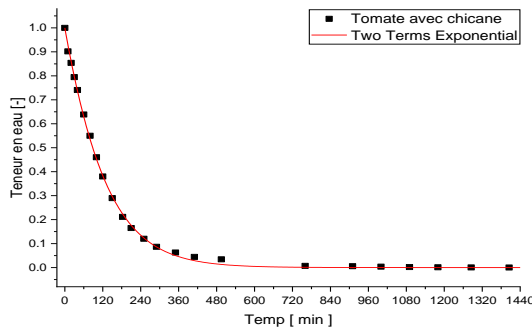
Les données expérimentales en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues dans les conditions météorologiques de la zone semi-aride du Ghardaïa ont été converties en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). La variation de la teneur en eau avec le temps pour différentes conditions météorologiques sont présentées aux Figures VI.1 (a, b, c, d, e, f, g et h).



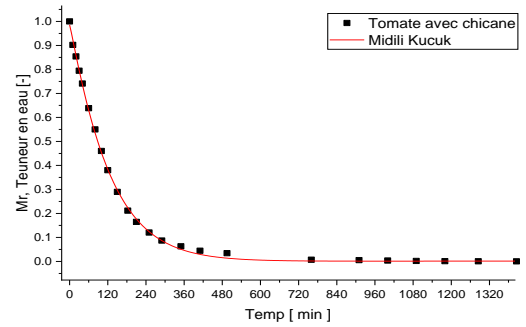
(a)



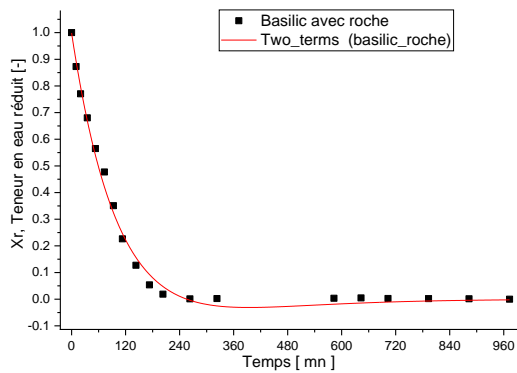
(b)



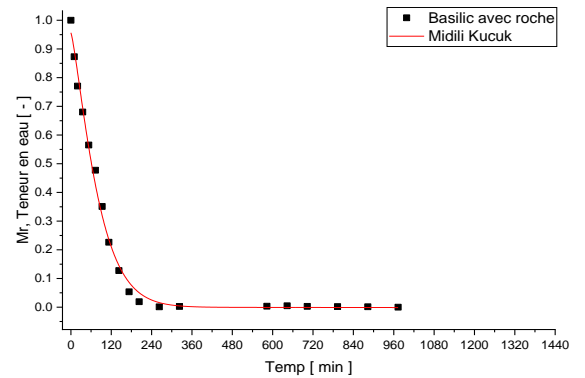
(c)



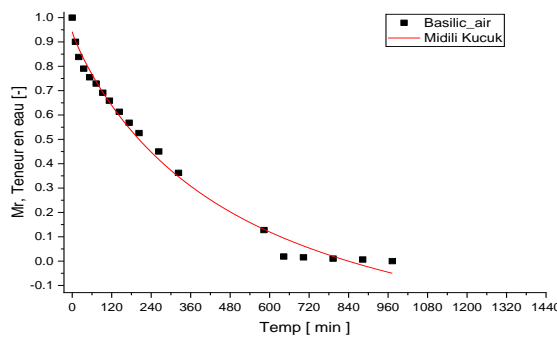
(d)



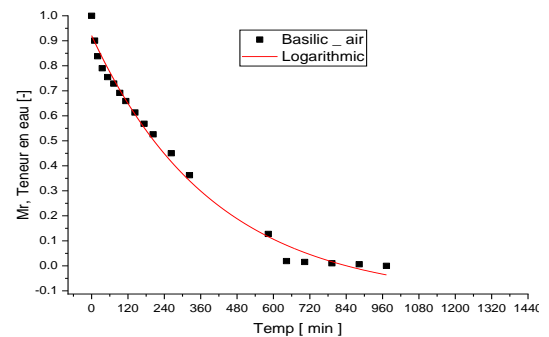
(e)



(f)



(g)



(h)

Figure VI.10 Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits



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

système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	
			K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	n	A	b				C
Sans stockage	01	Newton	0.0080						0.99888	0.01113	1.239E-4
	02	Page	0.0065		1.0443				0.99915	0.00985	9.701E-4
	03	Henderson and Pabis	0,0081						0.99890	0.01121	1.256E-4
	04	Modied Page	0.0080		1.0438				0.99915	0.00985	9.700E-4
	05	Logarithmic	0.0081			1.004		0.0012	0.99891	0.0114	1.299E-4
	06	Midilli-Kucuk	0,0055		1.0737	0.986	1.07E-6		0.99926	0.00957	9.167E-5
	07	Diffusion Approximation	0,0080		1,0479	1	1		0.99888	0.01155	1.334E-4
	08	Verma et al	0.0081	7.506		1.008			0.99892	0.00113	1.290E-4
	09	Two-Terms	0.0081			1.004	8.90E-4		0.99891	0.0116	1.351E-4
	10	Two-Terms Exponential	0.0946						0.99922	0.00946	8.941E-5
	N°	Modèles	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	n	A	b	C	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
Avec stockage MCP	01	Newton	0.0081						0.99872	0.01186	1.41E-4
	02	Page	0.0069		1.032				0.99889	0.01123	1.26E-4
	03	Henderson and Pabis	0.0080			0.997			0.99872	0.01204	1.45E-4
	04	Modied Page	0.0081		1.034				0.99889	0.01123	1.26E-4
	05	Logarithmic	0.008			0.9982		- 0.0015	0.99874	0.01222	1.49E-4
	06	Midilli-Kucuk	0.0052		1.084	0.975	7.46E-7		0.99922	0.00981	9.63E-5
	07	Diffusion Approximation	0.0107			8.6E12	1		0.99913	0.01017	1.034E-4
	08	Verma et al	0.0089			1.162			0.99903	0.01051	1.104E-4
	09	Two-Terms	0.0080	0.0080					0.99873	0.01251	1.565E-4
	10	Two-Terms Exponential	0.0094			1.452			0.99908	0.01027	1.054E-4

**Tableau VI.5.** Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de basilic en couche mince.

système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>	
			K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	n	A	b				C
Sans stockage	01	Newton	0.0148						0.98999	0.03635	0.00132
	02	Page	0.0096		1.102				0.99163	0.03358	0.00113
	03	Henderson and Pabis	0.0150			1.0072			0.98918	0.03817	0.00146
	04	Modied Page	0.0147		1.104				0.99163	0.03357	0.00113
	05	Logarithmic	0.0113			1.111		-0.13	0.99723	0.02048	4.187E-4
	06	Midilli-Kucuk	0.0141		0.972	0.989	-5.2E-4		0.99706	0.02255	5.052E-5
	07	Diffusion Approximation	0.0148			1	1		0.98909	0.04064	0.00165
	08	Verma et al	0.0151	4.47		1.015			0.98927	0.04032	0.00163
	09	Two-Terms	0.0151	6.663		1.015	-4.015		0.98927	0.04031	0.00186
	10	Two-Terms Exponential	0.0185			1.583			0.99240	0.03198	0.00102
Avec stockage ( roche )	N°	Modèles	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	n	A	b	C	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
	01	Newton	0.0081						0.99857	0.0347	0.0012
	02	Page	0.0060		1.162				0.99352	0.0287	8.215E-4
	03	Henderson and Pabis	0.0125			1.015			0.99352	0.0352	0.00124
	04	Modied Page	0.0122		1.163				0.99352	0.0287	8.215E-4
	05	Logarithmic	0.0121			1.026		0.0143	0.99095	0.0349	0.00122
	06	Midilli-Kucuk	0.0036		1.263	0.956	-1.33E-6		0.99482	0.0273	7.449E-4
	07	Diffusion Approximation	0.0123			1	1		0.98997	0.0367	0.00135
	08	Verma et al	0.0127	7.017		1.0277			0.99041	0.0359	0.00129
	09	Two-Terms	0.0073	0.007					0.99478	0.0274	7.507E-4
10	Two-Terms Exponential	162.33			7.57E-5			0.98997	0.03566	0.00127	

### Conclusion générale et perspectives

L'intégration des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible (roche) et latente (paraffine wax et chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) dans la veine d'air mobile de prototype de séchage solaire indirect est réalisable. Le stockage d'énergie a réduit la fluctuation de la température de l'air pendant la période nuageuse.

L'étude expérimentale a été réalisée selon trois volets.

Le premier est relatif à l'utilisation de deux prototypes de séchoirs solaires de type indirect identique avec différents systèmes de stockage, afin de tester l'influence des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible (roche) et latente (paraffine wax et chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) et toute modification rapportée.

Le deuxième volet porte sur l'étude de la cinétique de séchage des échantillons de basilic, de persil et de la tomate dans des conditions météorologiques variables de la région de Ghardaïa.

Le troisième volet traite l'influence du matériau de stockage thermique par chaleur sensible et latente sur le comportement thermique des prototypes de séchoir solaire de type indirect.

L'étude de comportement thermique des prototypes de séchoir solaire de type indirect à convection forcée a mis en évidence l'effet positif du stockage thermique. Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire de Master ne traitent qu'une première étape dans l'étude des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible et latente dans la veine d'air mobile de prototype de séchage solaire indirect à convection forcée pour le séchage solaire des produits agroalimentaires. D'autres travaux de recherche expérimentaux ou théoriques méritent donc d'être réalisés au futur dans le but d'augmenter la durée de stockage thermique et d'améliorer les performances du procédé de séchage solaire. Enfin, une étude expérimentale combinée à la simulation numérique s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation du procédé de séchage solaire de type indirect et de nous permet de mieux comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent au cours du séchage.

**Bibliographie :**

- [1]. **Boussalia Amar ; 27/06/2010** contribution a l'etude de sechage solaire de produits agricoles locaux. universite mentouri – constantine
- [2] . **Amel 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)
- [3]**G. Youcef** ‘‘Séchage solaire du raisin, variété sultanine’’ thèse de magister 2005. Institut National Agronomique Alger. Algérie
- [4] **B. Abdellouahab**, 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
- [5] **Warda Belachi** , Application du Séchage Solaire pour la Conservation des Produits Agroalimentaires ,Université Kasdi Merbah Ouargla 15 / 02 / 2009
- [6] **A. Slimane** ‘‘Etude et Optimisation du Séchage Solaire des Produits Agro-Alimentaires dans les Zones Arides et Désertiques’’ thèse de doctorat le 13/07/2010, Université Hadj Lakhdar Batna Algérie.
- [7] **A. Mouafki**, Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [8] **B. Amar** ‘Contribution a l'Etude de Séchage Solaire de Produits Agricoles Locaux’’ thèse de magister le 27/06/2010. Université Mentouri– Constantine Algérie
- [9] **Jacques Bernard**, (2004) Energie solaire calcul et optimisation Berneoud, France 106 (17) D.K. Edwards (Traduit par Marlot), (1979) Capteurs solaires
- [10] **D.K. Edwards** (Traduit par Marlot), (1979) Capteurs solaires
- [11] **M.K. Krokida, V..T Kararhanos, Z.B. Maroulis Kouris.**, (2003) Drying kinetics of some vegetables Journal of Food Engineering 59, 391-403
- [12] **Dilip Jain**, (2007) Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer Journal of Food Engineering 78, 637-647
- [13] **Dilip R. Pangavhane, R.I.Sawhney, P.N.Sarsavadia.**, (2002) Design, development and performance testing of new natural convection solar dryeer Enrgy 27, 579-590
- [14] **Yagnesh B. Chauhan & Pravin P. Rathod (2018):** A Comprehensive Review on Solar Dryer, International Journal of Ambient Energy, DOI: 0.1080/01430750.2018.1456960
- [15] **O. Adelaja, B. I. Babatope (2013)** Analysis and Testing of a Natural Convection Solar Dryer for the Tropics, Journal of Energy, Article ID 479894, 8 pages, doi:10.1155/2013/479894

- [16]. **A.K. Bhardwaj, Raj Kumar , Ranchan Chauhan, Sushil Kumar** ,experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of shs and pcm for drying chilli in the himalayan region , thermal science and engineering progress20-2020-100713
- [17]. **Alejandro Reyes, Francisco Cubillos, Andrea Mahn, José Vásquez**  
dehydration of agro products in a hybrid solar dryer controlled through a fuzzy logic system, International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application, 2014, 3, 66-76  
Published Online July 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/ijmnta>  
<http://dx.doi.org/10.4236/ijmnta.2014.33009>
- [18]. **shalini rai, prabha chand, s.p. sharma** ,an analytical investigations on thermal and thermohydraulic performance of offset finned absorber solar air heater, Solar Energy153 (2017)-25-40 , journal homepage: [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)
- [19]. **Adèle Soupart-caron.2015**, stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. génie des procédés. université grenoble alpes,
- [20]. **Eric Kenda Nitedem**. stockage thermique à base d'éco-matériaux locaux pour centrale solaire à concentration : cas du pilote csp4africa. génie des procédés. université de Perpignan ,2017.(L)
- [21]. **Aumporn Orawan**. contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. universite de perpignan via domitia. 7 décembre 2017 (e) (K1)
- [22]. **Stéphane Guichard**. contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase : modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance énergétique globale. matériaux composites et construction. université de la réunion, ,2013. (.)
- [23]. **Fabien Roget**. défiition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. autre [cond-mat.other]. université de toulon, 2012. (f)
- [24]. **N. Madjoudj \* et K. Imessad** . matériau à changement de phase au service de la bioclimatique .centre de développement des energies renouvelables, cder b.p. 62, route de l'observatoire, bouzaréah, 16340 algiers, algeria,2016 (a)
- [25]. **LANE G.A**. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. Solar Energy Materials and Solar Cells 27: 135-160. 1992
- [26]. **Laghzaoui A. et Peerhossaini D.**, heat storage: solar energy and other applications, Ecole des mines de douai, (2010) (G)
- [27] **Bahnasawy, A.H., Shenana, M.E.**, 2004. A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kishk). J. Food Eng. 61, 309–319.

- Akpinar, E.K.**, 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *J. Food Eng.* 77, 864–870.
- Agrawal, A., Sarviya, R.M.**, 2016a. A review of research and development work on solar dryers with heat storage. *Int. J. Sustain. Energy* 35, 583–605.
- Leon, M.A., Kumar, S.**, 2008. Design and performance evaluation of a solar - assisted biomass drying system with thermal storage. *Drying Technol.* 26, 936–947.
- Madhlopa, A., Ngwalo, G.**, 2007. Solar dryer with thermal storage and biomassbackup heater. *Sol. Energy* 81, 449–462.
- Aguilar-Castro, K.M., Flores-Prieto, J.J., Baltazar-Lopez, M.E., Macias-Melo, E.V.**, 2012. Design and experimental evaluation of a mixed-mode continuous solar dryer for plaster molds. *J. Mech. Sci. Technol.* 26, 2969–2976.
- Esakkimuthu, S., Hassabou, A.H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., Velraj, R.**, 2013. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Sol. Energy* 88, 144–153.
- Cakmak, G., Yildiz, C.**, 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food Bioprod. Process.* 89, 103–108.