



**MINISTÈRE DES ÉTUDES SUPÉRIEURES
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA**



Mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme
MASTER ACADÉMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Présenté et soutenu par:

Naiti Yasser et Melouah Khaled imad eddine

Thème :

Conception, fabrication et investigation expérimentale d'un
dispositif de stockage d'énergie thermique par matériau à
changement de phase couplé avec un séchoir solaire de type serre

Devant le jury composé de :

ZIANI Lotfi	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Président
ACHOURI El Hadj	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Examineur
BENSEDDIK Abdelouahab	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Encadreur
BOUBEKRI Abdelghani	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021/2022.



Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, Nous tenons tout d'abord à remercier très vivement monsieur **Dr. BENSEDDIK Abdelouahab** et monsieur le professeur **BOUBEKRI Abdelghani** pour avoir assuré la direction de ce travail, pour sa disponibilité tout au long de nos avancements et aussi pour leurs multiples aides et conseils. Nous lui exprimons nos profondes gratitudee et nos sincère reconnaissance.*

*Nous remercions monsieur **Dr. ZIANI Lotfi**, docteur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir consacré du temps à la lecture de nos manuscrits et d'avoir accepté la présidence du jury.*

*Nous tenons à remercier monsieur **Dr. ACHOURI El Hadj** Maître de conférences à l'université Kasdi Merbah Ouargla, de nous avoir fait l'honneur de participer à ce jury.*

*Nos remerciements sont aussi particulièrement adressés à messieurs le directeur de l'unité de **Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER (Ghardaïa)**.*

*Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin, principalement à tous l'effectif du **LABO 30**, Sans oublier **Mr. BENABDERRAHMANE Mahfoud** pour l'assistance technique lors des travaux en atelier.*

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

N.Yasser et M.Khaled Imad Eddine.

Dédicaces

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers.

Mes parents

Grâce à leur tendresse, encouragement et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront fiers de moi.

A Mes frères

A la famille Naiti et Hizi

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs.

A chers frères Dr. Ahmed Badji, Dr. Hasrane issam et mon binôme Khaled imad eddine.

Et tous mes amis.

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

A LA MEMOIRE DE Mon GRAND-PERE

J'aurais tant aimé que vous soyez présents.

Que Dieu lui fasse miséricorde et le place dans ses paradis

A tous ceux qui étudié contribuer à notre travail éducation,

A tous ceux qui, m'ont donné la force de continuer

Yasser.

Dédicaces

*Grâce à Dieu tout puissant, 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 master plus*

Particulièrement :

*A mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé durant tout
mon parcours d'étude,*

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

A mes très chers frères, mes sœurs.

A mes meilleurs amis Dr.Badji Ahmed, Dr.Hasrane Issam

A toute ma famille. Et a tous mes amis.

A tout mes enseignants.

*A tous à ceux qui ont contribué à
ma Formation et A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin afin
d'achevé ce modeste travail.*

KhaledImadeddine .

Résumé :

Le stockage d'énergie thermique dans les séchoirs solaires a récemment suscité un intérêt croissant car la disponibilité de l'énergie solaire est intermittente. L'étude a principalement tenté de résoudre le problème selon lequel les séchoirs solaires ne fonctionnent efficacement que lorsqu'il y a suffisamment d'énergie solaire. Par conséquent, un moyen supplémentaire de fournir de la chaleur a été inclus afin que le séchage puisse être rendu continu pendant la nuit. Dans ce projet de master, nous proposons un nouveau système de stockage d'énergie thermiques, basés sur le stockage de la chaleur latente intégré au séchoir solaire de type serre trapézoïdal. La cire de paraffine wax a été utilisée comme Matériaux à Changement de Phase (MCP). Dans ce contexte, un dispositif de stockage thermique MCP a été conçu, construit et intégré dans le séchoir solaire direct de type serre trapézoïdal. L'étude expérimentale a été menée, conçue et réalisée au Centre de Développement des Energies Renouvelables / Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables, Ghardaïa. Une quantité de 10 kg de paraffine wax (MCP) a été utilisée pour le stockage d'énergie thermique. Cette dernière a été remplie dans 40 canettes en aluminium de 60 mm de diamètre ayant une longueur de 120 mm d'une capacité de 330 ml (à l'exclusion de l'espace pour le changement de phase). Les températures à différents endroits ont été enregistrées instantanément durant le mois de mars, d'avril et de mai 2022. Le débit massique d'air pendant l'expérimentation est fixé à 70 kg /h. Différents tests ont été effectués pour évaluer les performances de nouveau prototype de séchoir solaire direct de type serre trapézoïdal avec le dispositif de stockage thermique MCP intégré. Les résultats obtenus expérimentalement ont été analysés en se basant sur la variation des températures à différents endroits du prototype en fonction de temps. La température de centre de nouveau prototype est restée supérieure de 10 à 30°C à celle de l'atmosphère pendant la mi-journée. Les performances du séchoir ont également été évaluées en utilisant de la menthe pouliot et de Moringa. Pour les différents essais réalisés, les paramètres de performance retenus pour l'évaluation incluaient la teneur en eau, la cinétique de séchage et la diffusivité effective. Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage de la menthe pouliot et de moringa. Les résultats ont montré que les modèles de *Midilli-Kucuket Two-Terms* étaient les plus adaptés pour décrire la cinétique de séchage solaire de la menthe pouliot et de moringa dans les deux prototypes de séchoir solaire direct de types serre et trapézoïdal avec dispositif MCP intégré ainsi que pour le séchage solaire à air libre.

Mots-clefs : séchage de produits alimentaires, séchoir solaire de type direct ; comportement thermique ; cinétique de séchage ; modèles empiriques ; diffusivité effective ; moringa ; menthe pouliot.

ملخص

جذب تخزين الطاقة الحرارية في المجففات الشمسية مؤخرًا اهتمامًا متزايدًا لأن توفر الطاقة الشمسية متقطع. حاولت الدراسة بشكل أساسي حل مشكلة أن المجففات الشمسية تعمل بكفاءة فقط عندما يكون هناك طاقة شمسية كافية. لذلك، تم تضمين وسيلة إضافية لتوفير الحرارة بحيث يمكن أن يكون التجفيف مستمرًا طوال الليل. في هذا المشروع الرئيسي، نقترح نظامًا جديدًا لتخزين الطاقة الحرارية، يعتمد على تخزين الحرارة الكامنة المدمجة في المجفف الشمسي شبه المنحرف من في هذا السياق، تم تصميم وبناء ودمج جهاز التخزين (PCM) نوع الدفينة. تم استخدام شمع البارافين كمادة لتغيير الطور في المجفف الشمسي المباشر من نوع الدفينة شبه المنحرف. أجريت الدراسة التجريبية وتصميمها MCP الحراري وتنفيذها في مركز تنمية الطاقات المتجددة / وحدة البحوث التطبيقية للطاقات المتجددة بغرداية. تم استخدام كمية 10 كجم لتخزين الطاقة الحرارية. تمت تعبئة الأخير في 40 علبة ألومنيوم بقطر 60 مم وبطول 120 مم (MCP) من شمع البارافين بسعة 330 مل (باستثناء مساحة تغيير الطور). تم تسجيل درجات الحرارة في مواقع مختلفة على الفور خلال أشهر مارس وأبريل ومايو 2022. تم ضبط تدفق كتلة الهواء أثناء التجربة على 70 كجم / ساعة تم إجراء اختبارات مختلفة لتقييم أداء MCP. النموذج الأولي الجديد لنوع الدفينة شبه المنحرف المباشر. مجفف شمسي مع جهاز تخزين حراري متكامل تحليل النتائج التي تم الحصول عليها تجريبياً بناءً على اختلاف درجات الحرارة في مواقع مختلفة من النموذج الأولي كدالة للوقت. ظلت درجة الحرارة الأساسية للنموذج الأولي الجديد أعلى من درجة حرارة الغلاف الجوي خلال منتصف النهار بالنسبة للاختبارات المختلفة Moringa. من 10 إلى 30 درجة مئوية. تم أيضاً تقييم أداء المجفف باستخدام نبات عشبي و التي تم إجراؤها ، تضمنت معايير الأداء التي تم الاحتفاظ بها للتقييم محتوى الماء وحركية التجفيف والانتشار الفعال. تم Midilli- استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية التجفيف للنباتة الوردية والمورينجا. أظهرت النتائج أن نماذج ذات المصطلحين هي الأنسب لوصف حركيات التجفيف الشمسي للبيتيرويال والمورينغا في نموذجين أوليين Kucuket متكامل وكذلك للتجفيف الشمسي في MCP من الصوبة الزجاجية والمجففات الشمسية المباشرة شبه المنحرفة مع جهاز الهواء الطلق.

الكلمات الرئيسية: تجفيف المنتجات الغذائية ، مجفف شمسي من النوع المباشر ؛ السلوك الحراري حركية التجفيف نماذج تجريبية انتشار فعال المورينغا. النعناع بينيرويال

Sommaire

Remerciements.....	2
Dédicaces.....	3
Résumé	4
Liste des matières :	5
Liste des Figures.....	8
Liste des tableaux	11
Alphabet Latin	12
Alphabet grec	13
Indices	14

Liste des matières

Chapitre I : Etat de l'art sur Le Séchage Solaire

Introduction :.....	5
Définition du séchage :	5
III- Mécanisme de séchage :	6
Séchoirs solaires :	7
III-1 Principe des séchoirs solaires :	7
III-2 Composants des séchoirs solaires :	8
III-3 Facteurs principaux de séchage solaire :	8
Avantages du séchoir solaire :	9
III-4 Classification des séchoirs solaires :	9
III-4.1 Séchoirs solaires passifs :	10
III-4.2 Séchoirs solaires actifs :	10
III-4.3 Séchage au soleil ouvert (l'air libre) :	10
III-4.4 Séchoirs solaires directs :	11
III-4.5 Séchoirs solaires indirects :	12

III-4.6 Séchoirs solaires de type mixte :	13
Revue de la littérature :	14

Chapitre II : Généralités sur le Stockage de l'énergie Thermique

Introduction :	24
Stockage de la chaleur :	25
II.1. Stockage par chaleur sensible :	25
II.2. stockage par chaleur latente :	26
II.3. Stockage par chaleur thermochimique (TCS) :	28
Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase :	28
III.1. Matériaux à changement de phase (MCP) :	28
III.2. Caractéristiques d'un MCP idéal (MCP) :	29
III.2.1. Propriétés thermodynamiques et thermiques :	29
III.2.2. Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) :	29
III.3. Classification des matériaux a changement de phase MCP :	29
III.3.1. MCPs organiques :	30
a) Paraffines :	30
b) Non paraffine :	30
c) Acide gras et Alcools :	30
III.3.2. MCP inorganiques :	31
Sels hydrates :	31
III.3.3. MCPs eutectiques :	33
III.2.4 MCPs organiques et inorganiques :	34
III.4. Amélioration de la conductivité des matériaux a changement de phase MCPs :	34

CHAPITRE III : Matériels et Méthodes

III.1 Description des prototypes :	36
III.2 Instrumentation des prototypes :	37
III.2.1 Mesure des Températures :	37

III.2.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air :.....	38
III.2.3 Mesure du rayonnement solaire, de la vitesse et d'humidité relative de l'air :.....	38
III.2.4 Balance KERN PCB 3500-2: 3500g:	39
III.2.5 Acquisition et traitement des données :	39
III. 3 Matériels de Laboratoire :	40
III. 3.1 Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g :	40
III. 3.2 Dessiccateur :	41
III. 3.3 Etuve MEMMERT UNB 100 :	41
III. 4 Matières premières :	42
III.4.1. La Menthe pouliot :	43
III.4.2. Feuilles de Moringa :	45
III.5 Protocole de séchage :	44
III.5.1. Préparation des échantillons de la Menthe pouliot :	44
III.5.2. Préparation de l'échantillon des feuilles de Moringa :	46
III.6 Conception et fabrication de dispositif de stockage d'énergie thermique par matériau à changement de phase :	47
III.7 Cinétique de séchage :	50
III.7 1 Détermination de la teneur en eau initiale.....	51
III.7 2 Modélisation des cinétiques de séchage :.....	51
III.7 3 Détermination expérimentale de la diffusivité effective de l'eau dans le produit	52

CHAPITRE IV : Résultats et Discussions

IV.1 RESULTATS ET DISCUSSION :	57
IV.2 Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire direct de type serre (tunnel et trapézoïdal) sans produits	57
IV.2.1. Test N°01 : du 09 au 11-03_2022.	58
IV.2.2. Test N°02 : du 21 au 27-4-2022 59.....	60

IV.3 Effet d'intégration des obstacles dans le prototype de séchoir solaire de type serre

trapézoïdal	65
IV.4 Courbes de séchage	72

IV.5 Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince :.....	73
--	----

IV.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la Menthe pouliot et de Moringa.....	75
---	----

IV.7 Conclusion générale et perspectives.....	79
---	----

Résumé.....	85
-------------	----

Liste des figures :

Figure I.1 : Présentation schématique d'un produit humide.....	6
--	---

Figure I.2 : Le Principe de séchoir solaire.....	8
--	---

Figure I.3: classification des séchoirs solaires.....	10
---	----

Figure I.4 : Séchage au soleil ouvert (l'air libre)	11
---	----

Figure I.5 : Séchoir solaire direct.....	11
--	----

Figure I.6 : Séchoir solaire indirect.	13
---	----

Figure I.7 : Séchoir solaire mixte.....	14
---	----

Figure I.8: (a)Vue de face schématique, et (b) photo de la vue est du PVT-GHD.....	15
--	----

Figure I.9 : photo de la configuration expérimentale du GHD avec un capteur solaire intégré [2018]; (a) mode naturel, (b) mode forcé.	16
---	----

Figure I.10 : (a) expérimental du GHD intégré à un capteur solaire thermique, sous convection forcée, et (b) séchage au soleil ouvert, adapté avec autorisation à partir de 2018	17
---	----

Figure I.11 : Configuration expérimentale du GHD développé dans la réf avec un capteur Solaire intégré.....	17
--	----

Figure I.12: Vue en coupe du séchoir solaire indirect à convection naturelle (modified from El-Sebaai et al.)	18
--	----

Figure I.13 : séchoirs solaires de type serre.	19
---	----

Figure I .14 : (a) Vue extérieure et (b) intérieure du séchoir à effet de serre avec (c) mur nord réfléchissant incliné.	19
--	----

Figure I.15 : Séchoir solaire direct.	20
Figure I. 16 : Différentes vues du séchoir solaire de type serre : (a) CAO du cadre structurel ; (b) Structure développée ; (c) Montage expérimental et (d) Expérimentation sous le séchoir.....	21
Figure II .1 : Différents types de stockage de chaleur.	24
Figure II .2 : Augmentation de la température pendant le stockage de chaleur sensible [Jouhara et al. 2020].	25
Figure II .3 : Stockage de chaleur comme chaleur latente pour un cas du changement de phase solide-liquide [Jouhara et al. 2020].]	27
Figure II .4 :Classification des MCP.	30
Figure III 1 : Les deux prototypes utilisés pour les expériences.	36
Figure III 2 – Thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium.....	37
Figure III 3 : Emplacement des thermocouples.	37
Figure III 4: anémomètreTesto 440 + thermo-hygromètretesto 610.....	38
Figure III. 5 : Station Radiométrique.....	39
Figure III. 6: Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g.....	39
Figure III 7 : Photographie de la centrale de mesure 12 cannelles température recorder et keithley 2701.....	40
Figure III 8 : Schéma de principe de fonctionnement de système d’acquisition	40
Figure III 9: Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g.....	41
Figure III 10 : Photographies de dessiccateur utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale....	41
Figure III 11 : Photographies Etuve MEMMERT UNB 100 utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche.	42
Figure III 12 : MATERIEL VEGETAL.....	42
Figure III. 13 : Etapes de détermination de la teneur en eau initiale de la menthe pouliot.....	44
Figure III.14 : Schéma représentant le protocole de séchage de la menthe pouliot.....	45
Figure III 15 : Etapes de séchage des feuilles de Moringa	46
Figure III.16 : Schéma représentant le protocole de séchage des feuilles de Moringa.....	47
Figure III.17 : Photographie de prototype de séchoir solaire de type serre (trapézoïdale) avec le dispositif de stockage (PCM).....	48
Figure III .18 : Préparation des ailettes en aluminium et son intégration dans les canettes.....	49

Figure III .19 : Matériau de stockage de l'énergie thermique (paraffine wax) et sont remplissage dans les cannettes.....	49
Figure IV.1 – Photographie de la plate-forme d'expérience de séchage dans URAER.....	55
Figure IV.2 : Séchoirs solaires de la serre trapézoïdale et la serre tunnel avec le stockage thermique sensible (Lit de roches).....	56
Figure IV.3 : Evolution de la température T2 T5 T9 à l'air intérieur de la serre du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de (roche) et MCP (Figure IV.5) pour les journées du 09 au 11/03/2022.....	57
Figure IV.4 : Prototypes de séchoirs solaires de type direct tunnel (gauche) et trapézoïdal (droite) avec MCP	57
Figure IV.5 : Différentes positions des thermocouples dans les prototypes de deux séchoirs solaires différents de type direct.	58
Figure IV.6 : Evolution de la température T1 T5 T12 dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et MCP (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 27/04/2022..	59
Figure IV.7 : Evolution de la température T4 T5 T8 à la haute de la serre du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de (roche) + MCP pour les journées du 21 au 27/04/2022.....	60
Figure IV.8 : Evolution de la température T2 T5 T9 à l'air intérieur de la serre du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de MCP (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 27/04/2022.....	61
Figure IV.9 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie pour les journées du 17 au 18/05/2022.....	63
Figure IV.10 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 19 au 20/05/2022.....	64
Figure IV.11 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 22/05/2022.....	66
Figure IV.12 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) à l'air intérieur de la serre et (b) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 11 au 12/05/2022.....	68
Figure IV.13 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 13 au 14-5-2022.....	69

Figure IV.14 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 15 a16/05/2022.....	71
Figure IV.15 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la Menthe pouliot	72
Figure IV.16 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la Moringa.....	72
Figure IV.17 : Évolutions de la teneur en eau base sèche de la Menthe pouliot en fonction du temps (modèles empiriques et résultats obtenus expérimentalement).....	75
Figure IV.18 : Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de la menthe pouliot et de moringa	77

Liste des tables

Tableau II .1 : Exemples de matériaux solide/liquide pour le stockage par chaleur sensible.....	26
Tableau II .2 : Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latente [Aumporn , 2017].....	28
Tableau II .3 : Caractéristique de quelques MCPs organiques.....	31
Tableau II - 4 : Propriété thermique de certains MCPs.....	32
Tableau II - 5: Caractéristique de quelques MCPs inorganiques.	32
Tableau II - 6: Caractéristique de quelques MCPs organiques.....	33
Tableau II - 7: Caractéristique de quelques MCPs commerciaux.	33
Tableau II - 8: Comparaison des avantages et inconvénients des MCPs organiques.....	36
Le Tableau III. 1 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces.....	51
Tableau IV.1 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la Menthe Pouliot.	73
Tableau IV.2 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince de Moringa.....	74
Tableau VI.3 Résultats statistiques de la diffusivité effective déterminées par la méthode graphique lors du séchage des échantillons de la menthe pouliot	77
Tableau VI.4. Résultats statistiques de la diffusivité effective déterminées par la méthode graphique lors du séchage des échantillons de moringa.....	77

Nomenclature

Alphabet Latin

m	Masse	Kg
C_p	Chaleur spécifique	J .Kg⁻¹ .K⁻¹
T	Température	K
L_f	Chaleur latente de fusion du MCP	J.kg⁻¹
Q	Chaleur Sensible	J
<i>ṁ</i>	Débit Massique	kg.s⁻¹
MR	Teneur en eau réduite	KgH₂O/Kg.MS
MR₀	Teneur en eau initiale	KgH₂O/Kg.MS
MR_{éq}	Teneur en eau d'équilibre	KgH₂O/Kg.MS
MR_{pre'}	Teneur en eau issu de prédite	KgH₂O/Kg.MS
MR_{exp}	Teneur en eau issu de l'expérience	KgH₂O/Kg.MS
Q_u	Energie Utile	W
W	Humidité Absolue de l'air	Kg d'eau/Kg de l'air sec
P_v	Pression Partielle de vapeur d'eau	Pa
P	Pression Partielle de l'air	Pa
RMSE	Racine carre de l'erreur quadratique moyenne	-
N	Nombre d'observations	-
n	Nombre de constantes du modèle	-
t	Temps	s
D_{eff}	Diffusivité effective	m²/s
L	Demi-épaisseur de la tranche	m
A	Aire	m²
I	Intensité de Rayonnement Solaire	W/m²

Alphabet grec

Δ	Variation
η	Rendement thermique
τ	Transmis sivaïte de la couverture
χ²	Ki-carré réduite minimale

Indices

MCP	Matériau à Changement de Phase
PC	Polycarbonate
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables



Introduction générale

Introduction générale

La consommation d'énergie augmente de façon exponentielle en raison de la croissance économique et de la demande énergétique croissante de nombreux pays. L'apport énergétique mondial double tous les 20 ans selon des études et des chercheurs. En raison de l'augmentation de la consommation d'énergie, les combustibles fossiles ont causé de nombreux problèmes environnementaux et de la pollution. Les ressources en combustibles fossiles diminuent continuellement en raison de l'augmentation correspondante de l'utilisation de l'électricité, du chauffage, de la réfrigération et de la climatisation. La réduction des ressources en combustibles fossiles et leurs effets néfastes sur l'environnement ont suscité l'intérêt des chercheurs pour les sources d'énergie renouvelables, telles que les sources d'énergie solaire, éolienne, océanique et géothermique. Pendant ce temps, l'utilisation des énergies renouvelables est toujours inférieure à celle des combustibles fossiles[1]. Cependant, au cours des dernières décennies, la volonté d'utiliser les énergies renouvelables et nouvelles, notamment l'énergie solaire, s'est accrue. L'énergie solaire est utilisée dans les applications de refroidissement et de chauffage. Ceci est bien connu car il peut être utilisé directement, et il est continu, sûr, gratuit et respectueux de l'environnement. La chaleur solaire a été utilisée à de nombreuses fins pendant de nombreuses années, y compris le séchage des vêtements, du poisson et d'autres produits agricoles. Cependant, 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 température élevée et à faible humidité relative dans le séchoir solaire par rapport au séchage

Introduction générale

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. 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 sable, le béton, les cailloux et l'eau 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 et le chlorure de calcium hexahydrate 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.

De nombreux chercheurs ont travaillé sur le séchoir solaire de type serre tunnel et/ou trapézoïdal, mais aucun d'entre eux n'a travaillé sur un séchoir solaire de type serre trapézoïdal avec un dispositif de stockage thermique intégrée. Dans le présent travail, une étude expérimentale d'un séchoir solaire de type serre tunnel et/ou trapézoïdal avec un dispositif de stockage thermique MCP intégré est présentée. Le montage expérimental est installé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, situé à une latitude de 32,37° Nord et une longitude de 3,77 Ouest.

Objectifs de recherche :

L'objectif général de la présente étude était de produire de l'air chaud à différents débits dans des conditions de rayonnement solaire incident faible et non incident. Un travail de dimensionnement, de réalisation, et d'examen expérimental a été effectué à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, situé à une latitude de 32,37° Nord et une longitude de 3,77 Ouest.

Introduction générale

Objectifs spécifiques :

Les objectifs spécifiques de la recherche étaient :

1. Développer les séchoirs solaires de type serre par l'intégration d'un dispositif de stockage d'énergie thermique à changement de phase ;
2. Évaluer les performances des prototypes de séchoir solaire de type direct à l'aide de différents paramètres tels que la température et la teneur en humidité du produit ;
3. Comparer les performances des prototypes de séchoir solaire de type direct avec différents améliorations apportées ;
4. Ajuster les courbes de séchage à dix modèles mathématiques.

Les résultats de cette étude pourront servir de référence pour de futurs travaux de recherche sur l'adaptation du séchoir solaire hybride. Le chapitre 1 et 2 traitent la revue de la littérature à travers laquelle nous explorerons la littérature scientifique en rapport avec les concepts abordés. Le chapitre 3 traite la démarche méthodologique utilisée dans cette étude et illustre la conception du dispositif de stockage intégré dans le prototype de séchoir solaire de type serre, et l'évaluation effectuée. Le chapitre 4 discute des résultats de l'expérience.



Chapitre I :

Etat de l'art sur le séchage solaire

I.1 Introduction :

Le séchage est le processus d'élimination de l'humidité des produits. C'est un processus très important applicable aux produits agricoles et industriels. Le séchage réduit la croissance bactérienne dans les produits. Il sera utile pour conserver les produits pendant longtemps.

Le séchage est généralement considéré comme la technique la plus ancienne et la plus couramment utilisée pour conserver les aliments. Le séchage est le processus d'élimination de l'humidité des produits. C'est un processus très important applicable aux produits agricoles et industriels. Le séchage au soleil à ciel ouvert est une méthode de conservation traditionnelle et bon marché, mais l'inconvénient de cette méthode est la détérioration de la récolte par les rayons ultraviolets, les particules de poussière et les facteurs abiotiques tels que les insectes, les animaux, les micro-organismes qui ne répondent pas les normes internationales. Bien que le séchage au soleil soit une méthode populaire de séchage des cultures, il s'agit d'un processus de séchage lent avec des risques de croissance de moisissures provoquant la détérioration des produits séchés dépendant des conditions météorologiques, de la main-d'œuvre demandée et fortement exposé à d'éventuelles contaminations environnementales.

Par conséquent, pour éviter les inconvénients, il est nécessaire d'utiliser les autres méthodes de séchage solaire. Les différentes méthodes de séchage solaire sont le séchage solaire direct, le séchage solaire indirect et le séchage solaire en mode mixte. L'appareil utilisé pour le processus de séchage avec application d'énergie solaire s'appelle le séchoir solaire. Les séchoirs solaires sont également classés avec le mode de circulation d'air. Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents modes de séchage solaire et la classification des techniques de séchage solaire [2].

I.2 Définition du séchage :

Le séchage est un processus très important applicable aux produits agricoles et industriels. Le séchage est le processus d'élimination de l'humidité des produits. Le séchage réduit la croissance bactérienne dans les produits. Il sera utile pour conserver les produits pendant longtemps. Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé à la fois dans le monde rural à travers le séchage des produits agricoles, viandes ... et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire, le textile, etc. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité de la nourriture entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés. La saveur et la majeure partie de la valeur nutritive est conservée et concentrée. Les produits séchés peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter.

I.3 Mécanisme de séchage :

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage :

- 1/Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire ;
- 2/ Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur **la figure I.1**. Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles.

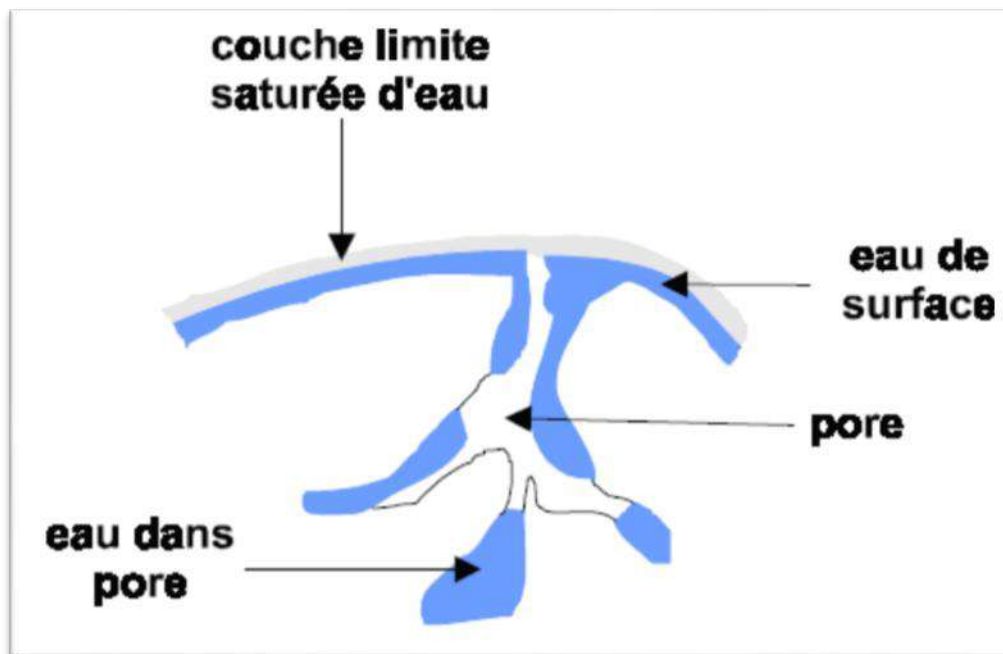


Figure I.1 : Présentation schématique d'un produit humide [khaldi 2018]

Au contact de l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit va être évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le produit. L'eau osmotique va migrer à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cette périphérie séchée par différence de pression osmotique. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers.

L'eau liquide sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le produit rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage.

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux :

- ✓ L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau ;
- ✓ La capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté ;
- ✓ La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir sécher suffisamment rapidement (pour éviter le pourrissement du produit) mais pas trop vite (une croûte risque alors de se former en surface) à trop haute température (le produit se dénature, noircit) [3].

I.4 Séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires sont des appareils simples qui accumulent le rayonnement solaire et le convergent sous forme d'énergie thermique. Cette énergie thermique est ensuite transportée au produit pour la déshydratation. Les séchoirs solaires peuvent augmenter la température de déshydratation et réduire l'humidité relative, abaissant ainsi la teneur en humidité des produits séchés. Contrairement à la déshydratation au soleil à l'air libre, les séchoirs solaires ont une structure dédiée qui régule le processus de déshydratation et protège le produit des dommages causés par la poussière, la pluie et les insectes [4,5]. Etant donné que les produits sont protégés et que la durée de déshydratation est considérablement diminuée, la qualité des produits séchés par des séchoirs solaires est meilleure que celle des produits déshydratés au soleil [6-8]. Les séchoirs solaires peuvent être classés en fonction de leurs méthodes de chauffage ou de leurs systèmes de fonctionnement. Les catégories de séchoirs solaires sont les séchoirs directs, les séchoirs indirects, les séchoirs de type mixte, les séchoirs solaires à effet de serre, les séchoirs solaires hybrides et les séchoirs solaires avec systèmes de stockage d'énergie

I.5 Principe des séchoirs solaires :

Le séchoir solaire est un appareil qui transmet la chaleur d'une source de chaleur à un produit et transfère la masse (humidité) de la surface du produit à l'air ambiant [9]. La fonction de base d'un séchoir solaire est d'augmenter la pression de vapeur de l'humidité présente à l'intérieur du produit et d'augmenter la capacité de transport d'humidité de l'air de séchage en diminuant son humidité relative [10]. Lors du séchage solaire, l'air chaud capte l'humidité du produit séché [11]. La quantité d'humidité éliminée dépend de la température de l'air chaud (a la capacité de capter l'humidité plus que l'air froid). **La Figure I.2** montre un schéma qui explique en général le principe de séchoir solaire [12].

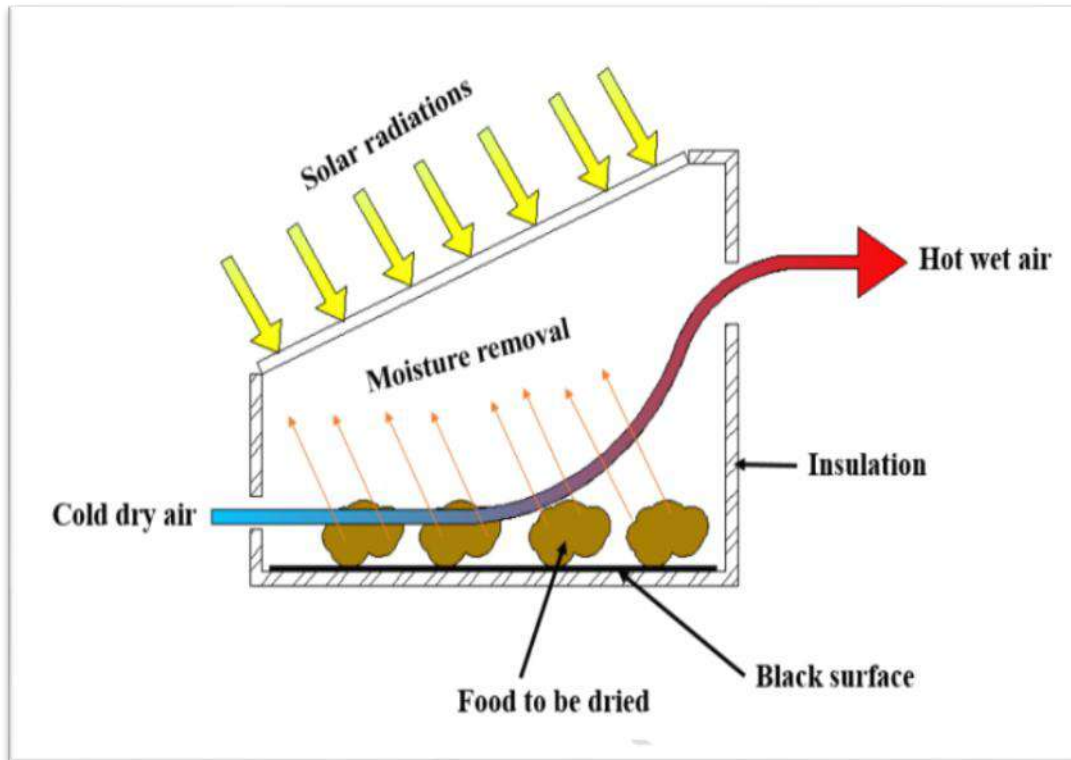


Figure I.2 : Le Principe de séchoir solaire [4]

I.6 Composants des séchoirs solaires :

En général, le séchoir solaire est composé de trois composants principaux qui sont la chambre de séchage, le réchauffeur d'air et le système de circulation d'air. La chambre de séchage est l'endroit où les aliments séchés sont placés. Il protège les aliments de la poussière et de la saleté. Dans la plupart des cas, il est isolé pour augmenter l'efficacité du séchage. Le capteur solaire à air est une boîte de couleur foncée avec un couvercle transparent. Il chauffe l'air de séchage en augmentant la température ambiante de 10 à 30 °C. Alors que le système de circulation d'air évacue l'air humide vers l'environnement [12].

I.7 Facteurs principaux de séchage solaire :

Les systèmes de séchage solaire se divisent en deux modèles, de type directs et indirects. Aussi, ces systèmes peuvent être actifs ou passifs. Il y a trois facteurs principaux qui affectent le séchage de la nourriture : la température, le débit et l'humidité de l'air et ils sont dépendants. Il y a une diversité d'opinion sur les températures idéales de séchage, mais tous les avis examinés s'accordent sur des températures de séchage entre 35 et 82 °C et de 43.5 à 60 °C sont les plus communes.

1/Le débit de l'air :

En convection naturelle, est proportionnelle à la surface de l'ouverture d'échappement, à la taille du capteur (de l'entrée de l'air à la sortie de l'air) et à la température de la plaque absorbante. Cependant le débit de l'air est également inversement proportionnel à la

température dans un séchoir solaire. Dans le meilleur des cas, le but recherché est d'avoir les deux à la fois : la température et le débit de l'air élevés. Ceci peut être difficile à réaliser dans un séchoir solaire.

2/La vitesse de l'air :

Dans un capteur à convection naturelle est affectée par la distance entre l'entrée et la sortie de l'air, la température à l'intérieur du séchoir et la section d'échappement de l'air. Plus la longueur, la température et la section d'échappement sont grandes, plus la vitesse est grande.

3/L'humidité relative :

C'est le troisième facteur affectant le séchage solaire de la nourriture. Plus l'humidité relative est haute, plus le séchage est lent. Chaque augmentation de 15 °C de la température double la capacité de l'air à absorber de l'humidité. Dans les régions humides, le séchage prend plus de temps que dans les régions sèches. La température obtenue dans un séchoir sera affectée par plusieurs facteurs : la surface de la couverture transparente orientée vers le soleil, l'isolation, l'étanchéité à l'air, la surface du passage d'échappement, et de la température ambiante. La surface de la couverture transparente orientée vers le soleil est une décision importante de conception.

I.7.1 Avantages du séchoir solaire :

- ✓ La température, le mouvement de l'air plus élevée et une humidité plus faible augmentent le taux de séchage.
- ✓ Les aliments sont enfermés dans le séchoir et donc protégés de la poussière, des insectes, des oiseaux et des animaux.
- ✓ La température plus élevée dissuade les insectes et le taux de séchage plus rapide réduit le risque de détérioration par les micro-organismes.
- ✓ Le taux de séchage plus élevé donne également un débit d'aliments plus élevé et une zone de séchage plus petite (environ un tiers).
- ✓ Les séchoirs sont étanches, par conséquent, les aliments n'ont pas besoin d'être déplacés lorsqu'il pleut.
- ✓ Les séchoirs peuvent être construits à partir de matériaux disponibles localement et sont relativement peu coûteux [13].

I.8 Classification des séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : les séchoirs passifs (convection naturelle) et les séchoirs actifs (convection forcée). Sous chaque catégorie, trois familles de séchoirs solaires sont efficaces en fonction de la façon dont l'énergie du rayonnement solaire arrive au produit à sécher, à savoir, les séchoirs solaires directs, indirects naturels hybrides et mixtes [14].

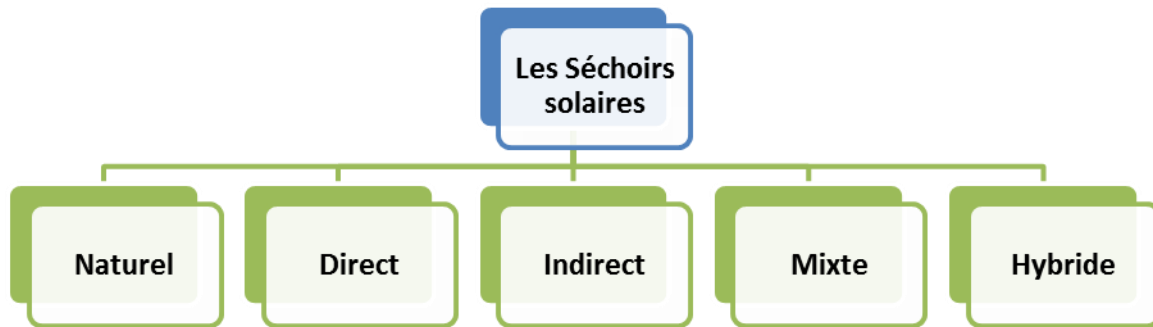


Figure I.3: Classification des séchoirs solaires.

I.8.1 Séchoirs solaires passifs :

Les séchoirs solaires passifs dépendent du mouvement naturel de l'air dû à la force de flottabilité, à la différence de pression du vent ou à une combinaison de ceux-ci. Par conséquent, ce type de séchoirs est connu sous le nom de séchoirs solaires à convection naturelle. Ces séchoirs solaires ont un taux de séchage lent en raison du mouvement lent de l'air [15].

I.8.2 Séchoirs solaires actifs :

Les séchoirs solaires actifs nécessitent des ventilateurs pour canaliser l'air à travers les composants du séchoir qui peuvent être montés à l'entrée ou à la sortie. Il a un taux de séchage plus élevé par rapport au mode passif, mais il a besoin d'énergie électrique pour entraîner le ventilateur [16].

I.8.3 Séchage au soleil ouvert (l'air libre) :

La **Figure I.4** illustre le fonctionnement de la méthode de séchage en plein soleil dans laquelle le rayonnement solaire est directement incident sur la surface de la culture. Une partie du rayonnement solaire reçu est absorbée par le produit de séchage en fonction de la structure de surface et de la couleur de la récolte, tandis que la partie restante est réfléchiée dans l'environnement. Le rayonnement solaire est absorbé et converti en chaleur et provoque une augmentation de la température de la culture. De plus, en raison de la température élevée de la culture, le rayonnement à ondes longues est perdu de la surface de la culture vers l'air ambiant, tandis que la perte de chaleur par convection à ondes longues se produit en raison de la convection naturelle et du vent soufflant via l'air humide sur la surface de la culture. L'évaporation de l'humidité de la culture entraîne des pertes par évaporation. Le séchage des produits dépend de certains paramètres externes, notamment l'intensité du rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative, ainsi que des paramètres internes tels que le taux de transfert d'humidité à l'intérieur et à la surface du produit par le processus de diffusion qui dépend du type de produit de séchage.

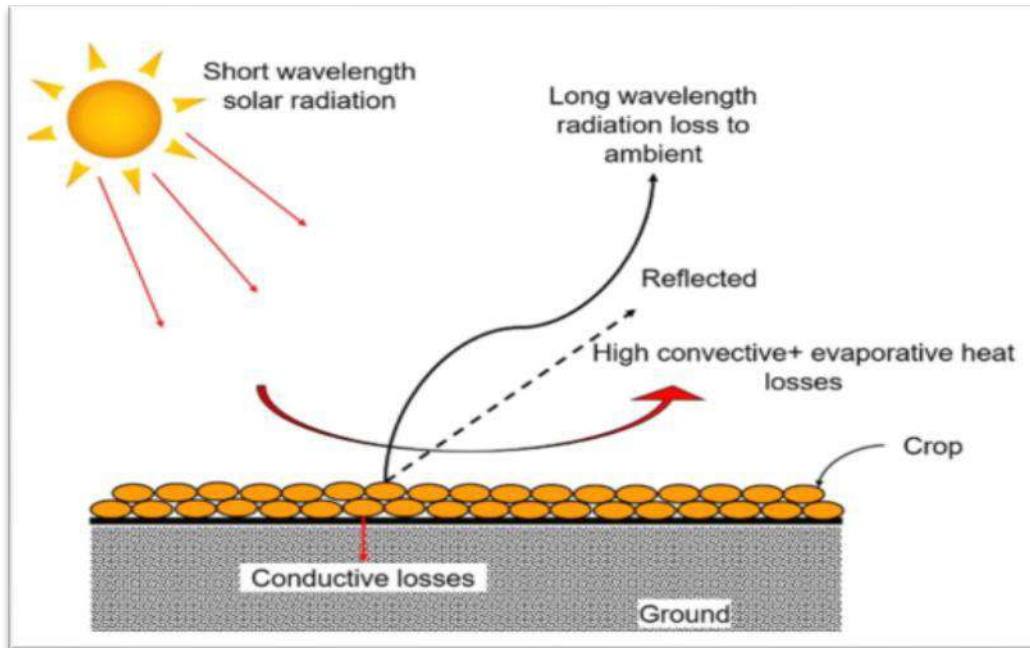


Figure I.4 : Séchage au soleil ouvert (l'air libre)

I.8.4 Séchoirs solaires directs :

La déshydratation solaire directe est la procédure classique de déshydratation des produits agricoles et alimentaires. Dans cette technique de séchage solaire, une couverture transparente est utilisée pour réduire les pertes de chaleur et protéger la matière alimentaire des poussières de la pluie [17 ,18].

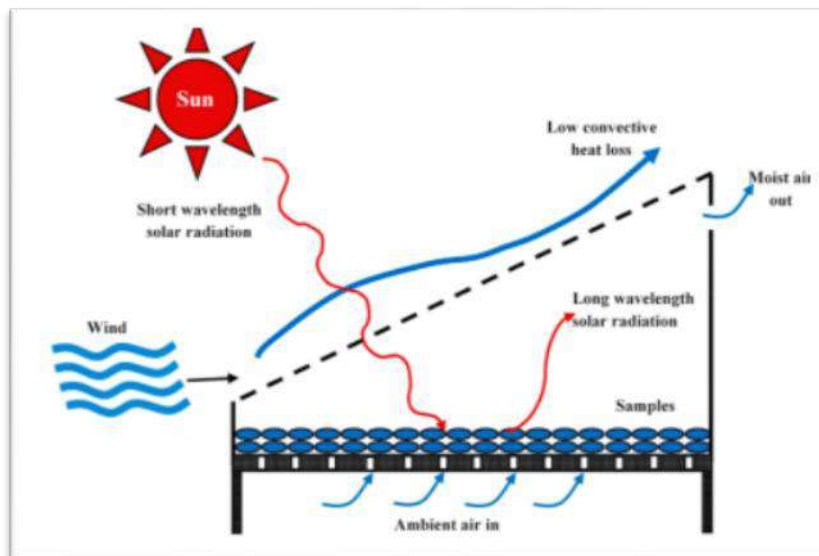


Figure I.5 : Séchoir solaire direct

I.8.4 .1 Avantage :

- ✓ Faible contamination du produit grâce à l'enceinte fournie par un couvercle transparent.
- ✓ Protection contre la pluie, la rosée, etc.
- ✓ Meilleure qualité du produit que dans le séchage au soleil ouvert (l'air libre).
- ✓ Simple et moins coûteux à fabriquer qu'un séchoir indirect pour la même capacité.

I.8.4 .2 Inconvénients :

- ✓ Elle dépend des conditions climatiques et nécessite une grande surface et une longue durée d'exposition au soleil.
- ✓ L'état du produit final est basé sur des observations d'êtres humains non qualifiés.
- ✓ L'état final du produit séché ne sera jamais contrôlé scientifiquement.
- ✓ Le produit peut perdre de la quantité en cas d'attaque d'oiseaux, d'animaux et de rongeurs.
- ✓ Le produit peut être exposé à toutes sortes de changements climatiques.
- ✓ Le taux de séchage est très faible pour le séchage solaire direct.
- ✓ L'exposition directe au soleil peut considérablement réduire le niveau de nutriments tels que les vitamines dans le produit séché.
- ✓ La qualité et la couleur du produit se détériorent lorsque le produit est directement exposé au soleil.
- ✓ Une mauvaise élimination de l'humidité de la vapeur entraîne des taux de séchage plus lents.
- ✓ Plus petite capacité et donc utile uniquement pour des applications à petite échelle.
- ✓ La transmission de la lumière à travers le couvercle en verre diminue après un certain temps car une condensation d'humidité se produit à l'intérieur du couvercle en verre.

I.8.5 Séchoirs solaires indirects :

L'approche de déshydratation solaire indirecte est plus efficace que la méthode directe de déshydratation solaire. Dans cette approche, l'air ambiant est chauffé par un capteur à plaques planes par déshydratation solaire indirecte. Les séchoirs solaires indirects sont classés en deux systèmes, à savoir les systèmes à convection naturelle et forcée, selon l'approche appliquée pour faire passer l'air sur les denrées alimentaires. Les séchoirs solaires indirects séchent les aliments de manière à éviter le rayonnement solaire direct. Les basses températures sont essentielles pour la qualité des produits finis. L'utilisation d'un système de déshydratation solaire indirecte réduit les inconvénients de la déshydratation solaire directe [19,20].

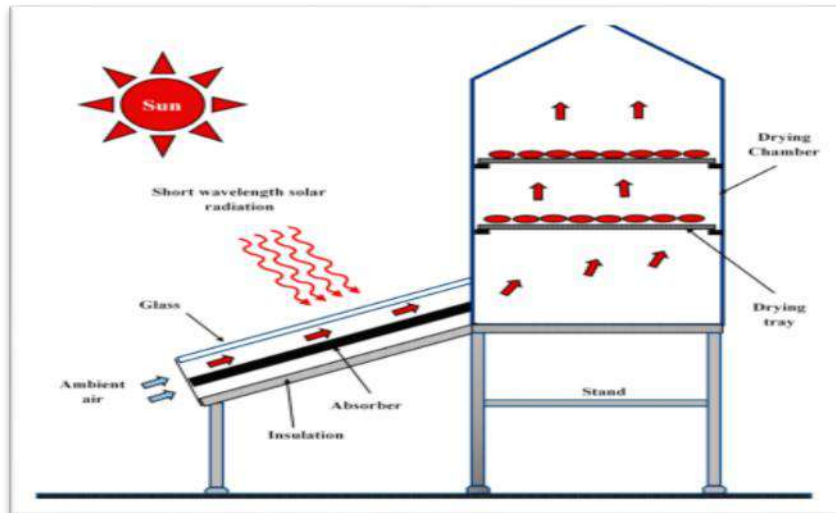


Figure I.6 : Séchoir solaire indirect.

I.8.5.1 Avantage :

- ✓ Meilleure qualité du produit car il obtient les températures requises.
- ✓ Meilleur contrôle du séchage et meilleure qualité du produit que le séchage au soleil.
- ✓ Absorption d'humidité plus élevée par kg d'air sec.
- ✓ Rétention de la couleur du produit car il n'est pas exposé aux rayons ultraviolets.
- ✓ Meilleures performances que les autres types de séchoirs conventionnels.
- ✓ Absence de dommages causés par la chaleur aux cultures.
- ✓ Particulièrement recommandé pour les matériaux photosensibles tel quelle citron, concombre, papaye, etc.
- ✓ Plus grande efficacité que le séchage solaire direct

I.8.5.2 Inconvénients:

- ✓ L'intensité du rayonnement solaire varie dans le temps ; un stockage thermique est nécessaire ainsi qu'une source d'énergie auxiliaire pendant les jours nuageux et le soir.
- ✓ Le rayonnement solaire a une faible densité d'énergie et, par conséquent, une grande surface est nécessaire pour le collecteur.
- ✓ Investissement initial et coûts énergétiques élevés [21].

I.8.6 Séchoirs solaires de type mixte :

L'application de la déshydratation solaire en mode mixte est un mélange de deux méthodes (déshydratation solaire directe et indirecte). Dans la déshydratation solaire en mode mixte, les aliments peuvent être séchés à la fois avec de l'énergie solaire directe et de l'air chaud fourni par un séchoir [22].

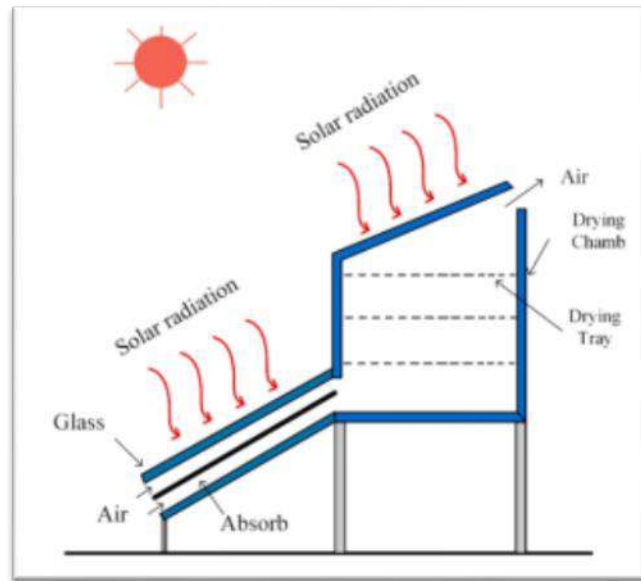


Figure I.7 : Séchoir solaire mixte.

I.9 Revue de la littérature :

Dans cette section, nous présentons un aperçu sur quelques travaux réalisés sur les séchoirs solaires directs.

[Tiwari et al., 2015] ont développé un séchoir de serre solaire - photovoltaïque thermique (PVT-GHD) et évalué ses performances en mode de fonctionnement mixte. Ils ont utilisé le logiciel MATLAB pour modéliser le système et calculer les valeurs de température de produit, de la serre et des cellules solaires, où les données expérimentales ont été utilisées pour valider les données calculées théoriquement. Les résultats ont indiqué une décoloration négligeable du produit séché avec une qualité globale supérieure. À partir des résultats, les valeurs théoriques de l'énergie thermique globale et de l'exergue ont été calculées à 1,92 kWh et 2,03 kWh, respectivement, tandis que les valeurs expérimentales ont été obtenues à 0,532 kWh et 0,535 kWh. Ils ont rapporté qu'une augmentation de la température des cellules photovoltaïques au cours des expériences entraîne une diminution immédiate de l'efficacité thermique. Dans une étude de Shyam et al. Une toiture mono pente de type PVT-GHD a été conçue, et ses performances ont été évaluées par un modèle thermique validé par des données expérimentales (Figure I.8) Ils ont signalé que travailler avec trois ventilateurs est une option optimale dans des conditions sans charge. D'après les résultats, l'énergie thermique globale quotidienne a été calculée à 20,5 kWh, ce qui était supérieur aux valeurs obtenues dans les cas fonctionnant avec un, deux et quatre ventilateurs.

Compte tenu des travaux plus récents sur les GHD intégrés aux modules PVT, des valeurs de performance thermique plus élevées ont été rapportées par les chercheurs. Cependant, la diminution de l'efficacité électrique des modules PV intégrés en raison de l'augmentation de leur température pendant le processus de séchage est un effet indésirable qui peut être atténué en fournissant des débits d'air plus élevés. Impliquant des débits d'air de séchage variables, le GHD deviendra applicable pour sécher différents matériaux.

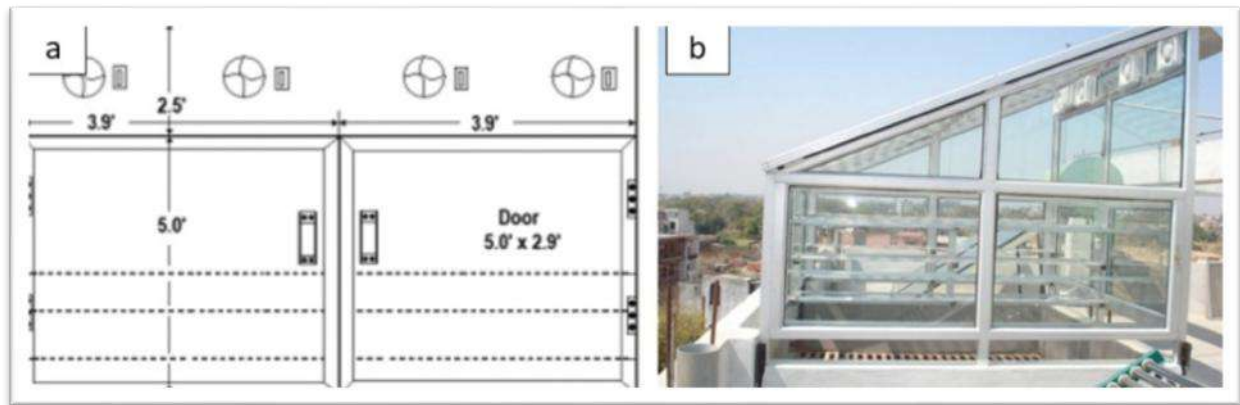


Figure I.8:(a)Vue de face schématique, et (b) photo de la vue est du PVT-GHD

[Tiwari et al., 2015]

[Chauhan et al. 2018] ont développé un séchoir de solaire de type serre (SGHD) composé d'un mur nord opaque et isolé avec un capteur de chauffage solaire à air intégré au fond a été étudié pour le séchage des flocons de courge amère comme le montre **la figure I.8**. Dans cette étude, des modèles thermiques ont été développés pour l'étude théorique des performances de séchage par convection naturelle et forcée. Parallèlement à cela, des tests expérimentaux ont été effectués pour le séchage en plein soleil, à la fois dans les modes de convection naturelle et forcée. Les résultats théoriques et expérimentaux se sont avérés en bonne harmonie. Un écart quadratique moyen (RMSD) compris entre 3,25 et 5,82 % pour la température de produit (flocons de courge amère) et de l'air intérieur a également été observé, tandis qu'un écart de 2,83 à 5,26 % a été enregistré pour le taux d'évaporation de l'humidité. Les valeurs de coefficient de corrélation entre 0,98 et 0,99 en mode naturel et 0,99 à 1 en mode forcé ont également été rapportées. Les résultats expérimentaux ont indiqué que le taux d'humidité final de 0,12 peut être atteint en 15 h pour le séchage par convection forcée, alors qu'il faut 16 h pour atteindre le taux d'humidité final de 0,14 lors du séchage par convection naturelle. De plus, il a été démontré qu'il faut 21 h pour obtenir le taux d'humidité final de 0,25 pour un séchage en plein soleil. Pour le séchage des flocons de courge amère, des atténuations nettes de CO₂ de 33,04 et 36,34 tonnes en modes naturel et forcé ont été signalées, respectivement.

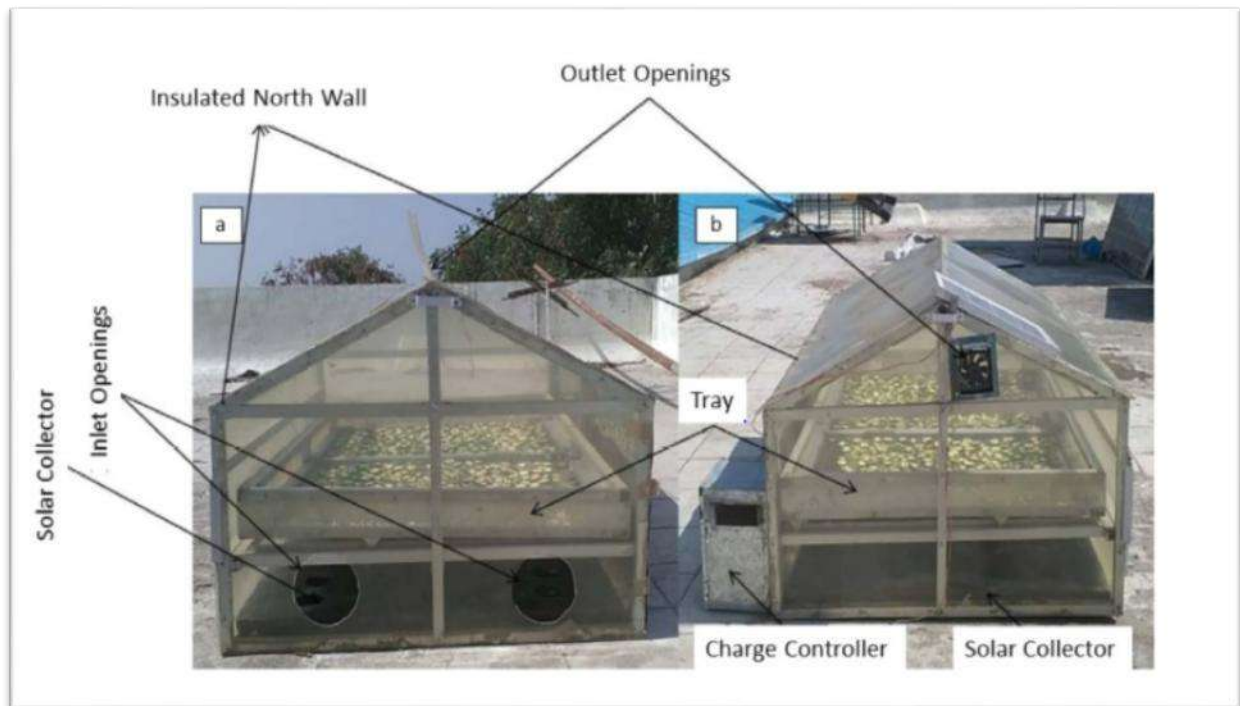


Figure I.9 : Photo de la configuration expérimentale du GHD avec un capteur solaire intégré (a) mode naturel, (b) mode forcé [Chauhan et al. 2018]

[Chauhan et al. 2018] ont développé un séchoir de serre (GHD) intégré à un capteur solaire et un ventilateur d'extraction à vitesse variable pour sécher les flocons de courge amère, comme illustré à la figure I.9 les expériences ont été menées sous trois débits massiques d'air de séchage de 0,0275, 0,0551, et 0,0826 kg/s pour diminuer la teneur en humidité des flocons broyés amers de 96,8 % à 12,2 %. Les résultats ont indiqué que le processus de séchage prend 17 h avec un débit d'air optimal de 0,0551 kg/s, alors qu'il prend 26 h pour la méthode de séchage à l'air libre. L'efficacité moyenne du GHD était de 19,7 % lorsque le débit d'air était de 0,0551 kg/s. De plus, la dureté la plus élevée de 365 g pour les flocons de courge amère séchés a été signalée au débit massique d'air de 0,0275 kg/s, principalement en raison de la température plus élevée à l'intérieur et du taux d'échange d'air plus faible.

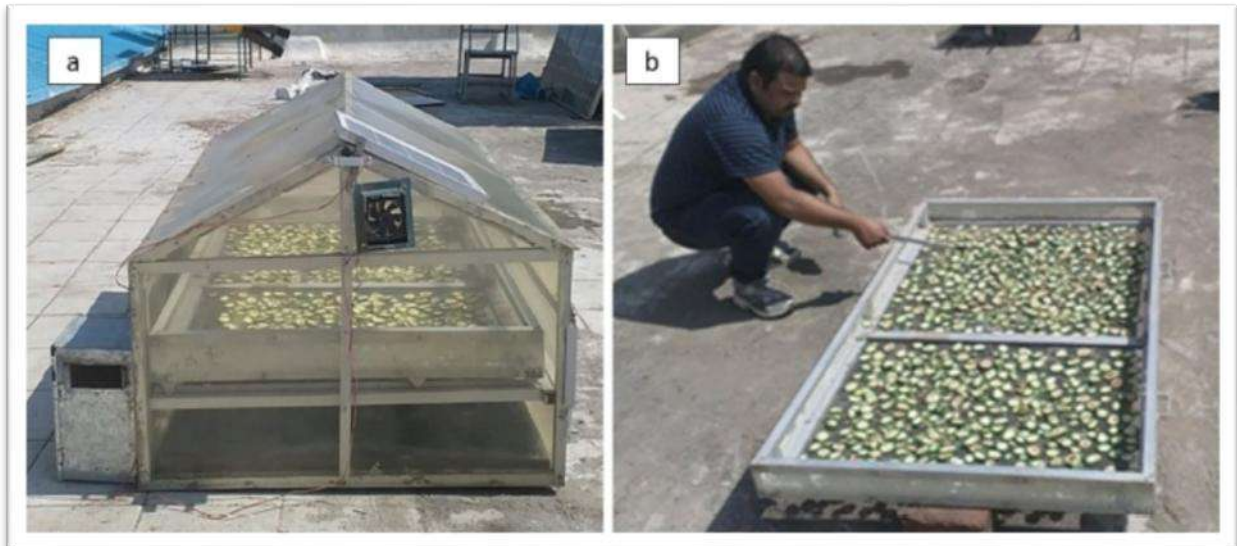


Figure I.10 :(a) GHD intégré à un capteur solaire thermique et (b) séchage au soleil ouvert, (avec autorisation) [Chauhan et al. 2018]

[Chauhan et al., 2018] ont conçu un GHD avec un capteur solaire unique composé de deux couches de matériaux différents intégrés à un module PV. Le séchoir a été testé en mode convection forcée et à vide avec et sans capteur solaire. Ils ont rapporté le coefficient de transfert de chaleur convectif du GHD utilisant le capteur solaire à 150 %, ce qui était plus élevé que dans le cas sans le capteur. Dans cette étude, l'exergie, l'énergie et l'efficacité électrique ont également été analysées pour le ventilateur d'extraction du système PV installé. Ils ont rapporté que le GHD fabriqué avec le capteur solaire a les meilleures performances dans la plage de température de 40 à 70 C pour le séchage des récoltes (**La figure I.11**).

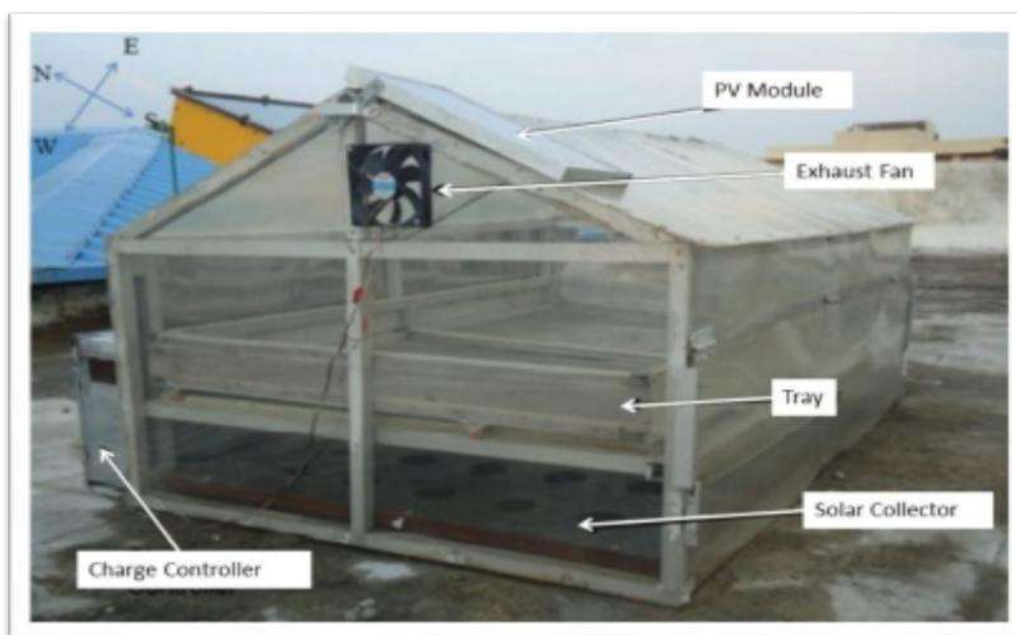


Figure I.11 : Configuration expérimentale du GHD développé dans la réf avec une capture solaire intégrée [Chauhan et al. 2018]

[El-Sebail et al] ont construit un séchoir solaire indirect à convection naturelle de l'air. Le sécheur contient un collecteur relié à une chambre de déshydratation, comme illustré à la **figure I.12** le capteur solaire est destiné à incorporer plusieurs matériaux de stockage, tels que du sable situé sous la plaque absorbante, pour augmenter l'efficacité de déshydratation. Les matériaux de stockage sont utilisés comme fournisseur de chauffage de la déshydratation de l'air pour divers fruits et légumes, tels que les raisins sans pépins, les figes, les pommes, les pois verts, les tomates et les oignons. Les chercheurs ont également évalué l'effet de la technique de prétraitement sur le processus de déshydratation. Les données ont révélé que la période de déshydratation a été réduite de 12 h lorsque les matériaux de stockage ont été adoptés. De plus, la chaleur de stockage des matériaux et le prétraitement ont diminué la période de déshydratation pour tous les fruits et légumes étudiés.

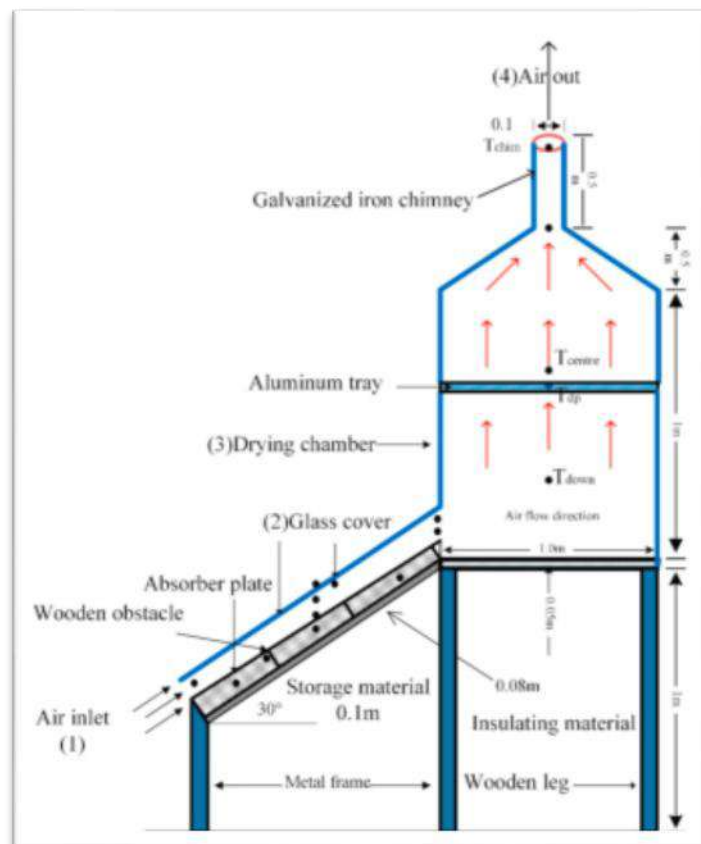


Figure I.12: Vue en coupe du séchoir solaire indirect à convection naturelle [El-Sebail et al]

[Janjai et al] ont développé un séchoir solaire de type serre ventilée PV de forme parabolique avec un sol en béton noir. Le sécheur a été installé au laboratoire de recherche sur l'énergie solaire de l'Université Silpakorn à NakhonPathom, en Thaïlande la **figure I.13** montre le séchoir à effet de serre développé. La surface au sol du séchoir était de 44 m² et était recouverte de feuilles de polycarbonate. Un panneau solaire de 53 W a été fourni pour faire fonctionner les 3 ventilateurs CC. Le séchoir a été chargé de 150 kg de piments frais pour étudier ses performances. Le résultat montre que les piments ont été séchés d'une teneur en humidité de 80 % à 10 % (base humide). La période de séchage varie de 2 à 3^{1/2} jours alors qu'en plein soleil il faut 6 jours.



Figure I.13 : Séchoirs solaires de type serre [Janjai et al]

[Sethi et Arora] ont modifié le séchoir solaire conventionnel à effet de serre de type à portée égale en utilisant un mur nord réfléchissant incliné. L'angle d'inclinaison du mur nord a été optimisé pour des plateaux de largeur différente. En mode de séchage naturel et forcé, les performances expérimentales du séchoir à effet de serre ont été testées avec et sans mur incliné nord en séchant des tranches de courge amère. Le séchoir était situé à Ludhiana, Punjab Inde. **La figure I.14** montre une vue illustrée de l'extérieur et de l'intérieur du séchoir à effet de serre amélioré ainsi que du mur nord réfléchissant incliné. La surface au sol du séchoir était de $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ et enveloppée d'une feuille de polyéthylène stabilisée aux UV. Le mur nord en contreplaqué de bois de 12 mm a été équipé d'une feuille de polyester aluminisé. Les résultats ont montré qu'en utilisant le mur nord incliné en mode convection naturelle et forcée, 13,13 % et 16,67 % du temps de séchage total ont été économisés respectivement.

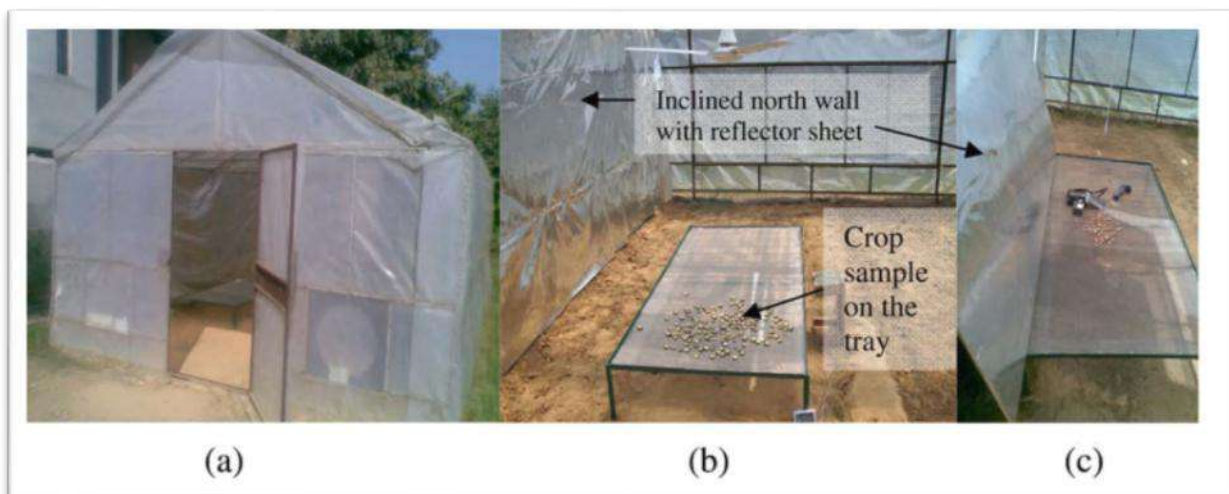


Figure I.14:(a) Vue extérieure et **(b)** intérieure du séchoir à effet de serre avec **(c)** mur nord réfléchissant incliné [Sethi et Arora]

[Sallam et al] ont installé deux prototypes de séchoirs solaires directs et indirects de même dimension dans le Bâtiment du Département des sciences et technologies alimentaires, Faculté d'agriculture, Université du Caire, Gizeh. La menthe a été séchée en mode convection

forcée et naturelle. La photographie du séchoir solaire direct est illustrée à **La figure I.15**. Le film de polyéthylène transparent a été utilisé pour recouvrir le séchoir solaire prototype direct tandis qu'un film de polyéthylène noir a été utilisé pour recouvrir le prototype de séchoir solaire indirect. Six plateaux perforés en acier galvanisé de dimension 1 m × 0,9 m × 0,04 m ont été utilisés dans chaque séchoir. La convection forcée donne un taux de séchage de la menthe plus élevé que la convection naturelle. En cas de convection forcée, la vitesse de séchage a été observée à la fois dans le séchage direct et indirect. Les coefficients de diffusion effectifs pour le séchage de la menthe variaient entre $1,2 \times 10^{-11}$ et $1,33 \times 10^{-11}$ m²/s.



Figure I.15 : Séchoir solaire direct. [Sallam et al]

[**Singh et al., 2021**] ont développé et évalué un séchoir solaire de type serre rentable pour améliorer la stabilité de conservation des feuilles de coriandre. Un séchoir solaire de type serre (5 m x 3 m x 2,3 m) a été développé avec un cadre rigide, un matériau de vitrage LDPE stabilisé aux UV de 200 μ , un capteur solaire avec chambre de séchage, des ouvertures d'entrée et de sortie d'air. Le séchoir a été évalué pour ses performances, les caractéristiques de séchage des feuilles de coriandre et l'évaluation qualitative du produit séché par rapport au séchage à l'air libre. Le séchoir solaire de type serre a bien fonctionné pour le séchage de la coriandre avec une augmentation du niveau de température à l'intérieur du séchoir (42oC) et une réduction de 24% du temps de séchage par rapport au séchage au soleil (29oC). La capacité de chargement, l'efficacité, la période de récupération et le rapport B:C de la sécheuse pesait 100 kg, 70,47 %, 1,26 an et 1,79, respectivement. Le séchage des feuilles de coriandre s'est produit principalement en période de taux de chute. Les feuilles de coriandre séchées sous le séchoir possédaient des valeurs plus élevées de teneur en chlorophylle (1,356 mg g⁻¹ de tissu), de teneur en acide ascorbique (111,257 mg 100g⁻¹), de taux de réhydratation (5,302) et de coefficient de réhydratation (0,762) que les feuilles de coriandre séchées au soleil les valeurs respectives de ces paramètres de qualité étant respectivement de 1,097 mg g⁻¹ de tissu, 62,37 mg 100g⁻¹, 4,715 et 0,6891[10].

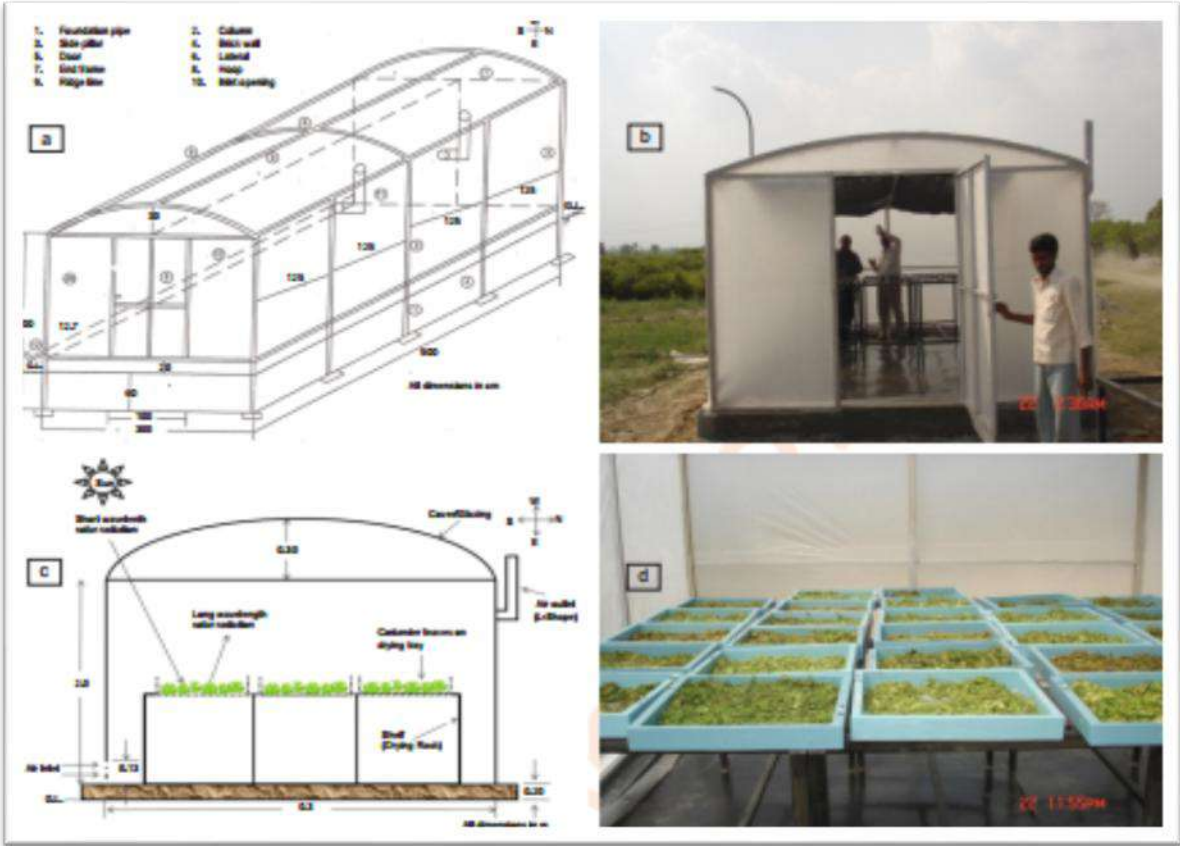
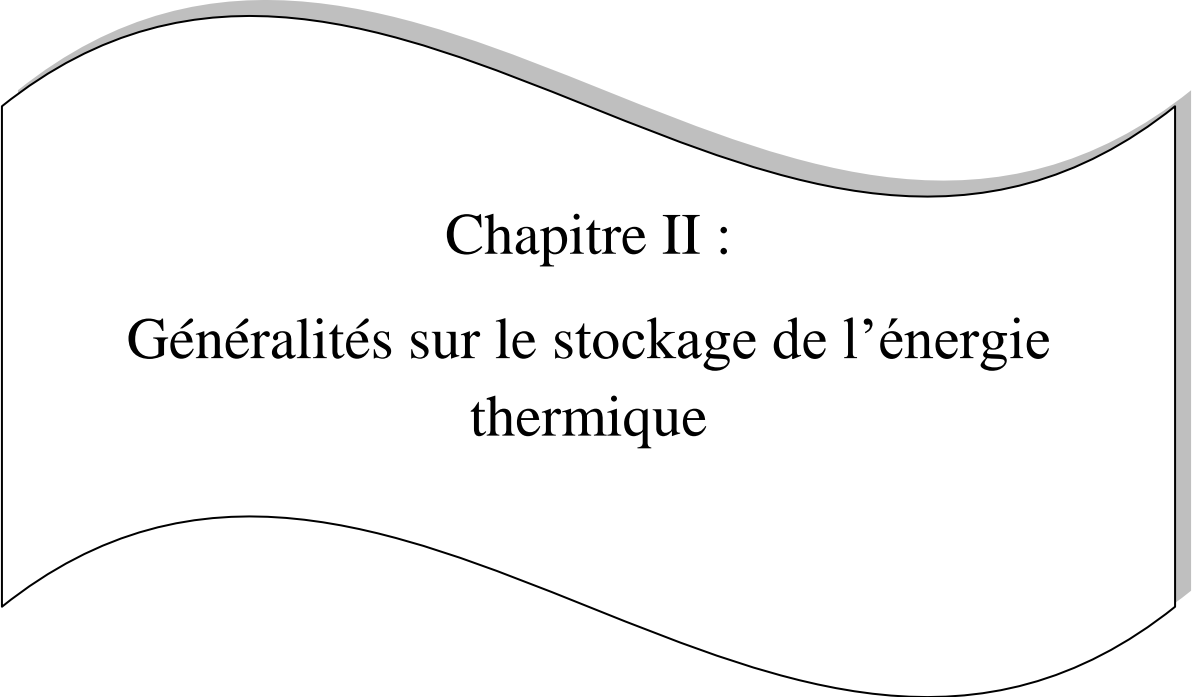


Figure I. 16: Différentes vues du séchoir solaire de type serre: (a) CAO du cadre structurel; (b) Structure développée; (c) Montage expérimental et (d) Expérimentation sous le séchoir

[Singh et al., 2021]

I.10 Conclusion :

A partir de cette étude bibliographique concernant quelques travaux qu'on a pu rencontrer dans la littérature, on a conclu que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental. Partant des constatations et observations faites après un passage en revue à travers une bref étude bibliographique, il a été jugé utile d'entamé une étude expérimental basé sur l'influence de quelques paramètres physiques sur la cinétique de séchage (la vitesse de séchage), en ayant pour objectif de développer et améliorer les performances des séchoirs solaire direct.



Chapitre II :
**Généralités sur le stockage de l'énergie
thermique**

II.1 Introduction :

Le concept de stockage de chaleur est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer la production d'énergie à la demande. Il existe de nombreuses technologies de stockage de chaleur sous diverses formes tels que l'énergie mécanique, l'énergie électrique et l'énergie thermique [23]. L'énergie thermique peut être stockée dans les liquides ou les solides [24] par trois modes :

- ✓ Latent,
- ✓ Sensible,
- ✓ Thermo-chimique.

Les systèmes de stockage de chaleur par les modes cités ci-dessus peuvent être classés en systèmes actifs ou passifs. Les systèmes actifs comportent des mécanismes de contrôle de la charge et de la décharge de chaleur. Les systèmes passifs fonctionnent sans composant mécanique.

Les paramètres importants d'un système de stockage [25] sont : (i) la durée de stockage ; (ii) la densité énergétique (ou l'énergie spécifique) ; (iii) les caractéristiques de charge et de décharge (stockage et récupération). La densité énergétique conditionne la taille du système de stockage. Les différents types de stockage de chaleur sont représentés sur **la figure II .1**.

Les types de stockage de chaleur existant se différencient selon l'application utilisée mais aussi par les réactions physico-chimiques et thermodynamiques dont ils sont le siège.

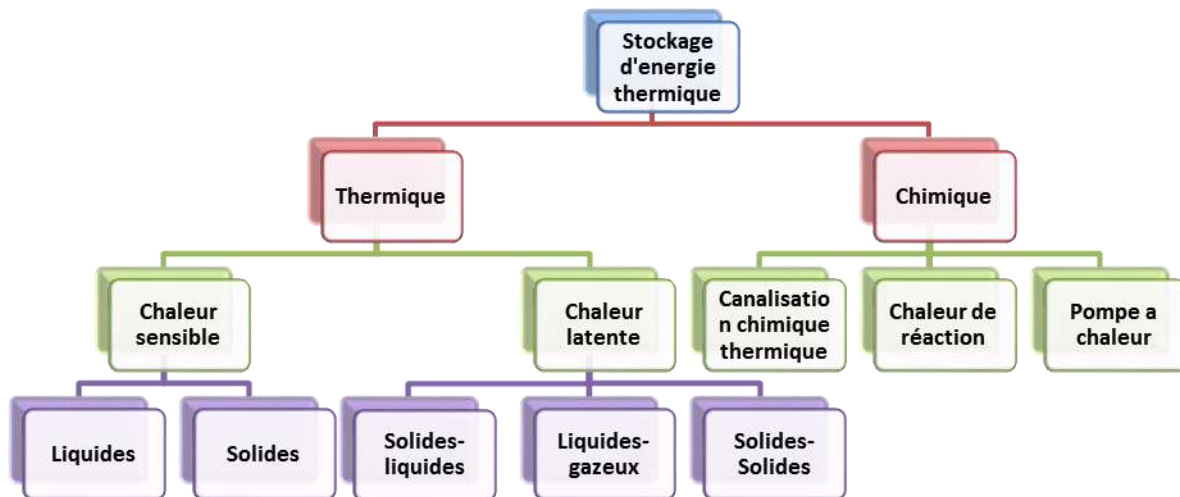


Figure II .1 : Différents types de stockage de chaleur.

II.2 Stockage de la chaleur :

Ce paragraphe décrit les deux principales techniques de stockage de la chaleur, sous forme sensible ou latente, ainsi que l'utilisation du stockage thermique à chaleur latente.

II.2.1 Stockage par chaleur sensible :

Parmi l'ensemble des techniques d'accumulation de chaleur, le stockage par chaleur sensible est la solution la plus ancienne pour stocker la chaleur. Il s'agit d'apporter de la chaleur à un matériau pour faire évoluer sa température sans changement d'état. Le matériau est caractérisé par sa capacité calorifique, notée C_p et exprimée en $J/(kg \cdot K)$, qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur (J) par unité de masse (kg) et de température (K). L'énergie stockée répond alors à la formule suivante :

$$Q = m\Delta h = mC_p \cdot \Delta T$$

L'Equation: (II.1)

La température change linéairement par rapport à la chaleur stockée (**figure II.2**) [26]. La capacité de stockage par chaleur sensible dans certains matériaux solide/liquide est reportée dans **Tableau II.1**. 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.

Le stockage thermique par chaleur sensible est donc très facile à mettre en œuvre mais requiert des volumes et des masses importants de matériau afin de stocker une grande quantité d'énergie. Pour s'affranchir des dimensions importantes, une autre solution est de stocker la chaleur sur une gamme de température très grande. Mais ceci va dans le sens inverse de notre objectif qui est de maintenir une température du récepteur constante le plus longtemps possible. Une alternative est alors d'utiliser la chaleur latente. En générale, l'eau est le milieu de stockage par chaleur sensible le plus efficace parce que sa chaleur spécifique est élevée [26]

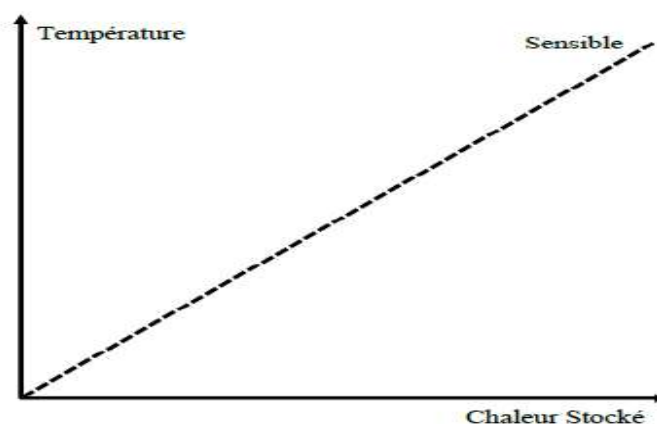


Figure II .2 : Augmentation de la température pendant le stockage de chaleur sensible [26]

Tableau II.1: Exemples de matériaux solide/liquide pour le stockage par chaleur sensible [28].

Milieu	Type du fluide	Rang de température (°C)	Densité (Kg m ⁻³)	Chaleur spécifique (j Kg ⁻¹ K)
Roche		20	2560	879
Brique		20	1600	840
Béton		20	1900-2300	880
Eau		0-100	1000	4190
Caloria HT43	Huile	12-260	867	2200
Engineoil	Liquide organique	Jusqu'à 160	888	1880
Ethanol	Liquide organique	Jusqu'à 78	790	2400
Propanol	Liquide organique	Jusqu'à 97	800	2500
Butanol	Liquide organique	Jusqu'à 118	809	2400
Isotunaol	Liquide organique	Jusqu'à 100	88	3000
isotunaol	Liquide organique	Jusqu'à 148	831	2200

II.2.2 stockages par chaleur latente :

Le stockage par chaleur latente utilise la caractéristique de changement de phase d'un matériau. Habituellement, le changement de phase solide-liquide est utilisé à travers la fusion ou la solidification d'un matériau. Lors de la fusion, une chaleur est transférée au matériau stockant ainsi une grande quantité de chaleur à température constante, cette quantité de chaleur est libérée lorsque le matériau se solidifie. Les matériaux utilisés dans les systèmes de stockage par chaleur latente sont appelés Matériaux à Changement de Phase (MCP).

La quantité d'énergie stockée est calculée selon :

$$Q = m \cdot \Delta h \quad (\text{II.2})$$

L'équation ci-dessus décrit la chaleur sensible de la phase solide, la chaleur latente de la fusion et la chaleur sensible de la phase liquide. La quantité d'énergies stocke peut-être exprimée pour le cas de la transition solide liquide est présentée sur le graphe température-énergie de la **Figure II .3**

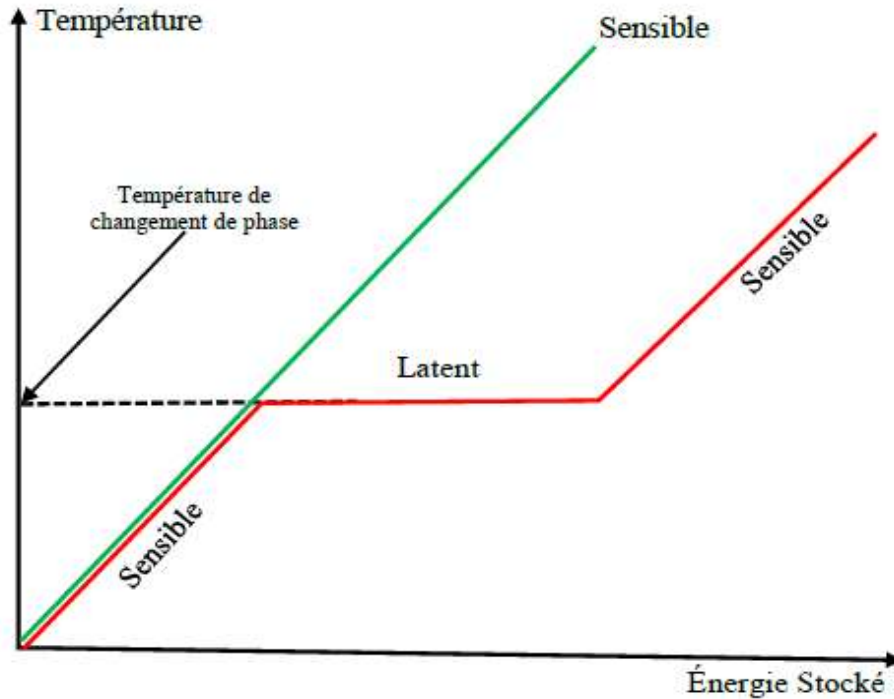


Figure II .3 : Stockage de chaleur comme chaleur latente pour un cas du changement de phase solide-liquide [26]

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. La chaleur est stockée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau appelé matériau à changement de phase (MCP). Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état. Dans la littérature, les systèmes de stockage à chaleur latente, de grande échelle et à haute température sont rares voire inexistantes. Les MCPs sont souvent des matériaux chers (**Tableau II.1**) et peu disponibles. Compte tenu de la faible quantité nécessaire pour parvenir à protéger le récepteur, le stockage latent est donc intéressant dans notre cas.

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 utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. 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 [27].

Tableau II .2 : Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latente [28].

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

II.3 Stockage par chaleur thermochimique (SCT) :

Le stockage par chaleur thermochimique (SCT) se produit lorsqu'une réaction chimique est utilisée pour stocker de l'énergie. Les produits de cette réaction ainsi que la chaleur mise en jeu lors de la réaction sont stockés séparément. Cette chaleur devrait pouvoir être récupérée lorsque la réaction inverse se produit. Par conséquent, seules les réactions réversibles peuvent être utilisées pour ce procédé de stockage. Le stockage d'énergie thermochimique est divisé entre les réactions chimiques d'une part, et les systèmes à sorption d'une autre. Dans les réactions chimiques, la densité de stockage de haute énergie et la réversibilité sont requises dans le choix des matériaux utilisés. Habituellement, la conversion de l'énergie chimique a une meilleure efficacité de stockage de l'énergie que les méthodes physique (stockage de chaleur sensible et latente). Le défi le plus important est de trouver la réaction chimique réversible appropriée pour la source d'énergie utilisée. Les réactions chimiques sont utilisées à des températures élevées (plus de 400 °C) et l'enthalpie de la réaction est élevée aussi et se situe dans l'intervalle 80 à 180kJ/mol. Etant donné que les produits de la réaction doivent être stockés séparément, les systèmes de stockages thermochimiques peuvent être utilisés en tant que systèmes de stockage saisonnier. Les principaux inconvénients des réactions chimiques gaz-solide sont les mauvaises performances au niveau de transfert de chaleur et de masse et le faible rendement thermodynamique du cycle de base [29].

II.4 Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase :

II.4.1 Matériaux à changement de phase (MCP) :

Dans les capteurs d'énergie solaire, le stockage d'énergie thermique en utilisant un matériau à changement de phase MCP fournit une capacité de stockage thermique élevée plus que les systèmes de stockage d'énergie sensibles. En conséquence, il existe un grand nombre d'études récemment publiées décrivant les performances des capteurs solaires intégrés à une unité de stockage d'énergie thermique. Un certain nombre de ces études ont suggéré d'améliorer les

performances des systèmes d'énergie solaire en utilisant les matériaux sensibles comme support de stockage.

II.4.2 Caractéristiques d'un MCP idéal (MCP) :

Pour résumer, le MCP idéal devrait posséder les propriétés optimales suivantes [30].

II.4.2.1 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, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge.
- ✓ Une bonne chaleur spécifique, 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.4.2.2 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.5 Classification des matériaux à changement de phase MCP :

Un grand nombre de matériaux à changement de phase (organiques, inorganiques et Eutectiques) sont disponibles dans toutes les plages de températures requises. Une classification des MCP est illustrée sur **la figure II .4** suivante :

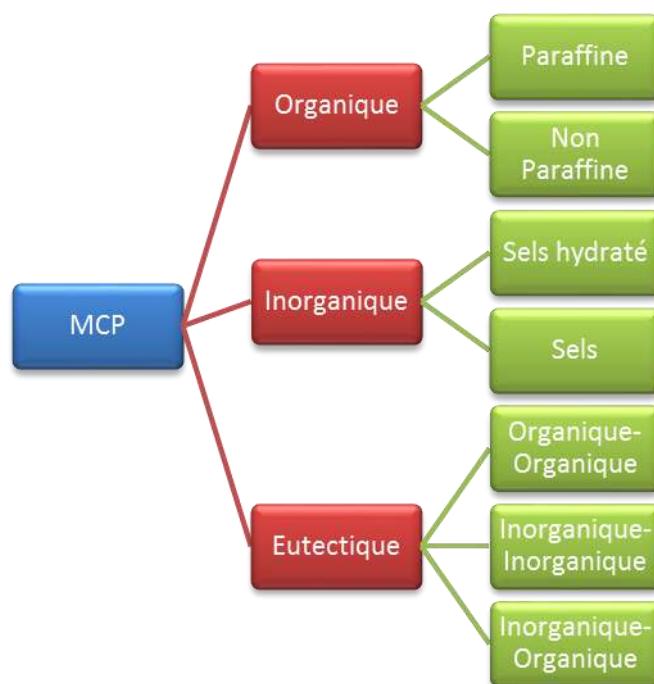


Figure II .4 : Classification des MCP.

II.5.1 MCPs organiques :

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

a) Paraffines :

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles s'offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP appropriée à chaque application.

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadécane ($T_{\text{fusion}} = 22^\circ\text{C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63.4$ °C) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65.4^\circ\text{C}$) [31].

b) Non paraffine :

Les non-paraffines sont les plus abondants matériaux de changement de phase ayant des propriétés très différentes. Ces matières organiques ont d'autres sous-groupes d'acides gras et autres composés organiques non paraffinés tels que les esters, alcools, glycols, etc [32].

c) Acide gras et Alcools :

La chaleur latente de fusion de ces produits est élevée, leur inflammabilité et leur conductivité thermique sont faibles. Leur niveau de toxicité est variable et ils sont instables à haute température. L'inconvénient majeur est leur coût, qui est de 2 à 2,5 fois supérieur à celui de la paraffine et ils sont peu corrosifs.

Tableau II .3 : Caractéristique de quelques MCPs organiques [28].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH fusion (Kj/Kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)
Substance organiques	Paraffine C12-C50	66-68	66-68	0.21 sol	0.83 liq.70°C
Substance organiques	Naphtalène	80	147.7	0.123 liq.83.8°C 0.341sol.49.9°C	976 liq.84°C 1145 sol.20°C
Eutectiques organiques	67.1Naphtalene ⁺ 32.9% Acide benzoïque	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

II.5.2 MCP inorganiques :

Ce groupe est principalement composé des sels ou des sels hydratés et des métaux. La température de fusion de ces matériaux est comprise entre -100°C et +1000°C. Les plus utilisés sont : les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont beaucoup d'avantages : ils ont une chaleur latente de fusion importante, une conductivité thermique élevée, ne sont pas inflammables et ont un coût abordable. Parmi leurs inconvénients, citons la corrosion, la ségrégation et la surfusion.

II.5.2.1 Sels hydratés :

La formule générale d'un sel hydraté est sous la forme de AB. nH₂O (AB=formule du sel anhydre, n= nombre de molécule d'eau). Beaucoup de sels hydratés ont été utilisés comme matériaux à changement de phase. Les sels hydratés ont une chaleur latente de fusion par unité de volume et une conductivité thermique élevées.

En outre, leur volume pendant la phase de transition est faible. Ils ne sont pas très corrosifs et sont compatibles avec le plastique. Le sel hydraté le plus utilisé est le CaCl₂.6H₂O [33].

Tableau I- 4 : Propriété thermique de certains MCPs [28].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCPs Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-l'aurique	21	143
MCPs Inorganiques	KF.4H ₂ O	18.5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.8	125.9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
MCPs Eutectiques	66.6% CaCl ₂ .6H ₂ O+33.3% MgCl ₂ O.6H ₂ O	25	127
	48% CaCl ₂ +4.3% NaCl+47.3% H ₂ O	26.8	188
	47% Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

Les caractéristiques de quelques MCPs sont reportées dans les tableaux I-4 et I-5. Les Tableaux I-6 et I-7 présentent les propriétés de quelques MCPs.

Tableau I-5 : Caractéristique de quelques MCPs inorganiques [28].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH fusion (Kj/Kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)
Substance inorganique	H ₂ O	0	333	0.612 liq.20°C	998 liq.20°C 917 sol.0°C
	CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190.8	0.540 liq.38.7°C 1.088 sol.23°C	1562 liq.32°C 1802 sol.24°C
	Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O	89	162.8	0.490 liq.95°C 0.611 sol.37°C	1550 liq.94°C 1636 sol.25°C
	MgCl ₂ .6H ₂ O	117	168.6	0.570 liq.120°C 0.694 sol.90°C	1450 liq.120°C 1569 sol.20°C
Eutectique inorganique	58.7% Mg(NO ₃) ₆ H ₂ O+41.3% MgCl ₂ .6H ₂ O	59	132.2	0.565 liq.85°C 0.678 sol.38°C	1550 liq.50°C 1630 sol.24°C
Mélange non eutectique de substance	50% Na(CH ₃ COO).3H ₂ O+50% HCONH ₂	40.5	255	n.d.	n.d

Tableau I-6 : Caractéristique de quelques MCPs organiques [28].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH_{fusion} (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg.m ⁻³)
Substances organiques	Paraffine C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	0.21 sol	0.830 liq ,70°C 0.930 sol ,20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.132 liq ,83.8°C 0.341 sol ,49.9°C	976 liq ,84°C 1145 sol ,20°C
Eutectique organique	67.1% Naphtalène+32.9% Acide benzoïque	67	123.4	0.130 liq ,100°C 0.282 sol ,38°C	n.d.
Acides gras	Acide caprique	32	152.7	0.153 liq ,38.5°C	878 liq ,45°C 1004 sol,24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172 liq ,70°C	848 liq ,100°C 965 sol ,24°C

Tableau I- 7: Caractéristique de quelques MCPs commerciaux [28].

Nom du MCP	Type de produit	Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ.kg ⁻¹)	Densité (Kg.L ⁻¹)	fabricant
RT26	Paraffine	25	131	0.88	RubithermGmbH
AC27	Sel hydraté	27	207	1.47	Cristopia
STL47	Sel hydraté	47	221	1.34	Mitsubishi Chemical
TH58	n.d.	58	226	n.d.	TEAP
ClimSel C70	n.d.	70	194	1.7	Climator

II.5.3. MCPs eutectiques :

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire a une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [34].

II.6 MCPs organiques et inorganiques :

Le tableau I-9 présente les avantages et les inconvénients des matériaux à changement de phase organiques et inorganiques.

Tableau I- 8: Comparaison des avantages et inconvénients des MCPs organiques et Inorganiques [28].

	Avantages	Inconvénients
MCP organiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pas de corrosion ✓ Stabilité chimique et thermique ✓ Surfusion négligeable ✓ Recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible conductivité thermique ✓ Inflammabilité ✓ Coût élevé
MCP inorganique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductivité thermique élevée ✓ Non inflammabilité ✓ Faible coût ✓ Chaleur latente de fusion élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible conductivité thermique ✓ Inflammabilité ✓ Coût élevé

II.7 Amélioration de la conductivité des matériaux a changement de phase MCPs :

La faible conductivité thermique ($0,2 - 0,8 \text{ W m}^{-2}$) et le sur-refroidissement des MCPs conventionnels limitent leurs capacités de stockage de chaleur qui peut être amélioré en introduisant dans les MCPs des particules métalliques (Cu, Ag ou Al) de conductivité thermique élevée, par exemple, des fibres et des ailettes métalliques, des particules de carbone. L'ajout de ces particules modifie les propriétés thermiques du MCP et conduit à une amélioration des performances du stockage de chaleur. Elles peuvent être augmentée également par l'utilisation d'ailettes, de matériaux poreux à conductivité thermique élevée comme les mousse métalliques, la micro-encapsulation de MCPs en carbone ou métalliques, etc. Parmi ces techniques d'amélioration des performances thermiques lors des phases de stockage et déstockage de chaleur dans les MCPs, l'utilisation d'ailettes fixées sur les parois du réservoir dans lequel les MCPs sont disposés s'avère être une technique simple et efficace. Les ailettes sont utilisées pour accroître la surface d'échange des MCPs contribuant ainsi à l'augmentation du flux de chaleur transféré entre les MCPs et les ailettes. Ces dernières peuvent être radiales ou axiales et fixées au solide d'un échange de chaleur avec le milieu considéré. La forme et la disposition des ailettes dans le système de stockage de chaleur contribuent à l'accroissement de la quantité de chaleur stockée dans les MCPs.

Les ailettes peuvent être appliquées à des systèmes existants en adoptant leurs formes et leurs dimensions pour une application spécifique caractérisée par une densité de flux de chaleur donnée. Elles sont de par leurs simplicités de fabrication et leur faible coût de construction l'une des techniques les plus utilisées dans les échangeurs de chaleur et les systèmes de stockage de chaleur latente.

Les ailettes utilisées dans le système de stockage de chaleur dans les MCPs peuvent être circulaires, rectangulaires et spirales [35]. Elles peuvent être disposées de façon axiale ou radiale au système de stockage de chaleur.



**Chapitre III :
Matériels et Méthodes**

III.1 Description des prototypes :

Dans cette partie, nous allons faire une description générale des prototypes expérimentés dans le cadre de ce mémoire de master. La figure III.1 montre une photographie des deux séchoirs solaires directs réalisés dans l'atelier de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER). Le premier (le nouveau prototype) est un séchoir solaire de type serre qui se compose d'un prisme à base trapézoïdale construit en acier, d'une largeur totale de 2,20 m. La face trapézoïdale mesure 50 cm de base courte, 1 m de base de long et 1 m de haut. Les angles de la base du trapèze sont de 90° (face arrière) et 45° (face antérieure). L'ensemble du séchoir repose sur un châssis métallique. Le deuxième (l'ancien prototype) séchoir solaire de type serre tunnel est de dimensions (1m de largeur, 2m de longueur et 0.7m d'hauteur). La structure est recouverte d'un film polycarbonate pour les deux séchoirs, le premier se compose de deux portes en polystyrène protégée par des tôles en acier galvanisé 1 mm d'épaisseur sur la face arrière, peinte en noir et joue le rôle d'un absorbeur. A l'intérieur, le matériel peut être logé dans une étagère métallique perforée de 4 mailles suspendue à 20 cm du fond du séchoir, ou sur la face inférieure elle-même, disposée au-dessus des plateaux perforés de séchage. Sur les côtés du séchoir solaire, un ventilateur de 35W a été installé afin de permettre l'évacuation de l'air.



Figure III 1 : Les deux prototypes utilisés pour les expériences.

III.2 Instrumentation des prototypes :

Divers paramètres ont été mesurés afin d'améliorer les performances de prototype de séchoir solaire de type serre. Les instruments de mesure utilisés sont mentionnés ci-dessous.

- 1)- Thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium, de type K ;
- 2)- Anémomètre Testo modèle 440 ;
- 3)- Centrale d'Acquisition de données Keithley 2701 ;
- 4)- BTM-4208SD: 12 channels temperature recorder + SD card data recorder.
- 5)- Pyranomètre type EKO et type EPPLY.
- 6)- Balance type KERN PCB 3500-2 ET Balance KERN ABT 220-4M.

III.2.1 Mesure des Températures :

Les Températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium, de type K. Ces thermocouples, prévente aller jusqu'à des températures de 750 °C et permettant une précision de 0.1 °C (voir la figure III.2). L'emplacement des deux capteurs montrés dans la figure III.3.



Figure III 2 : Thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium.

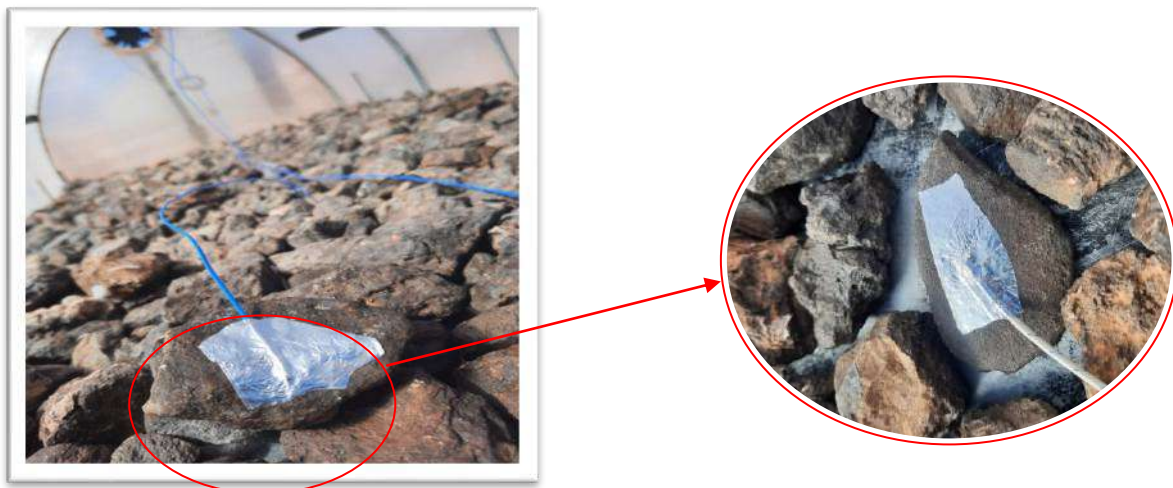


Figure III 3 : Emplacement des thermocouples.

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

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



Figure III 4: Anémomètre testo 440 + thermo-hygromètre testo 610.

III.2.3 Mesure du rayonnement solaire, de la vitesse et d'humidité relative de l'air :

Une station radiométrique comporte deux parties : une partie fixe qui est constituée d'un pyromètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global sur un plan horizontal et d'un pyromètre différentiel type EPPLEY pour mesurer l'irradiante sur un plan incliné de 32° et orienté vers le sud. Une partie mobile (système de poursuite solaire) qui est pourvue d'un pyréliomètre pointé vers le disque solaire, afin de mesurer le rayonnement direct, et d'un pyromètre type EKO, muni d'une boule pare soleil pour la mesure de l'éclairement diffus sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo- hygrométrique « Tech el sonde thermo-igrometriche » avec un étalonnage de précision égale $\pm 1.5 \%$, sensibilité à la température ambiante égale $0.1 (^{\circ}\text{C}/\text{mV})$ et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à $+60^{\circ}\text{C}$. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x. celle-ci est reliée par interface RS232, à un ordinateur. Ces données sont ainsi collectées quotidiennement 24/24h et avec un pas de cinq minutes. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre (Teston modèle 445 : incertitude $\pm 0,03\text{ms}^{-1}$) L'appareil Teston 445 à affichage numérique est aussi muni d'une sonde pour la mesure de l'humidité relative de l'air (Figure III 5).



Figure III. 5 : Station radiométrique.

III.2.4 Balance KERN PCB 3500-2: 3500g:

C'est un instrument de mesure qui sert à suivre la masse au cours de séchage (Figure III.6)



Figure III. 6: Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g

III.2.5 Acquisition et traitement des données :

Le système d'acquisition et de traitement des données est constitué d'une centrale d'acquisition de données Keithley 2701 combine un multimètre de résolution 6,5 chiffres (22-bit) un système de commutation 40 voies pilote. Un autre appareil utilisé dans cette étude est 12 cannes température recorder (voir la Figure III 7-8).



Figure III 7 : Photographie de la centrale de mesure 12 cannales température recorder et keithley 2701.

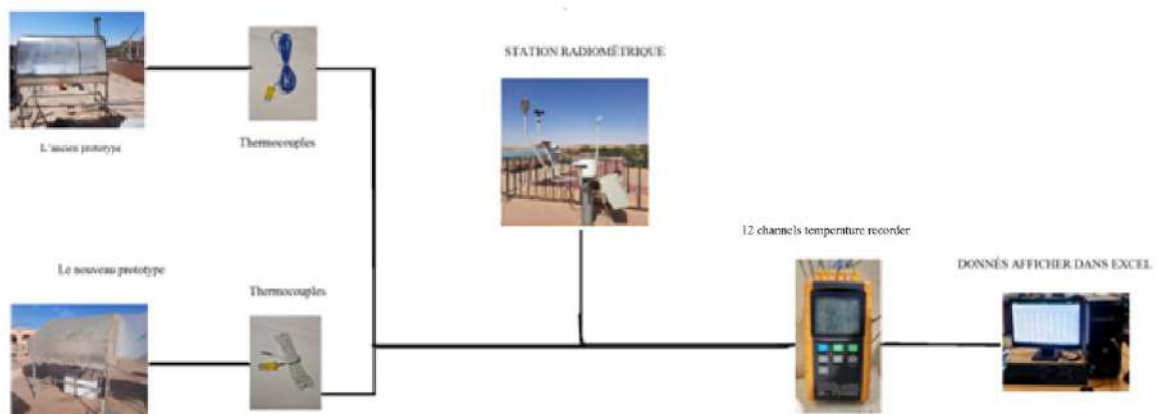


Figure III 8 : Schéma de principe de fonctionnement de système d'acquisition et traitement des données par 12 cannales température recorder.

III. 3 Matériels de Laboratoire :

III. 3.1 Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g :

La balance analytique KERN ABT 220-4M (220g/0.1mg) (Figure III 9) convient pour l'analyse, le dosage, le contrôle dans le secteur pharmaceutique. Grâce à son afficheur LCD avec indicateur de charge, elle détermine la pesée à 0.1mg de précision, le contrôle de poids, le pesage en pourcentage, la totalisation, le comptage ainsi que la détermination de la densité. Elle est équipée d'une interface RS232 et GLP avec Date et Heure pour faciliter la transmission de donnée.



Figure III 9: Balance KERN ABT 220-4M 200g/0.1g.

III. 3.2 Dessiccateur :

C'est un équipement de labo en verre qui permet de protéger des substances contre l'humidité. Il est constitué d'une cuve circulaire surmonté d'un couvercle. Cet ensemble est muni d'un disque perforé et une quantité suffisante de desséchant (gel de silice). Figure III 10.



Figure III 10 : Photographies de dessiccateur utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale.

III. 3.3 Etuve MEMMERT UNB 100 :

Enceinte chauffante fonctionnant, dans la majorité des cas, dans l'air (parfois sous vide ou gaz neutre) et permettant d'effectuer des traitements thermiques à température régulée. Spécifications techniques du stérilisateur Mèmemert UNB 100 :

- Stérilisateur à air chaud - Convection naturelle
- Réglage en continu du mélange d'air frais préchauffé
- Minuterie digitale 1min - 99h59 - Température : 30°C - 220°C
- Affichage LED digital-Puissance : 600 watt.



Figure III 11 : Photographies Etuve MEMMERT UNB 100 utilisé pour déterminer la teneur en matière sèche.

III. 4 Matières premières :



a) Menthe Pouliot



b) Moringa

Figure III 12 : Matériel végétale

III.4.1 La Menthe pouliot :

La Menthe pouliot, ou flio, ou menthe sauvage, est une plante odorante des régions méditerranéennes, au parfum subtil et léger, rafraîchissant et mentholé (en rapport avec la Menthe poivrée qui restitue un parfum beaucoup plus fort). Elle pousse dans nos campagnes roussillonnaises et nous la ramassons aux environs de Touggourt.

La Menthe pouliot présente des propriétés très intéressantes pour son action "ventre plat" car elle favorise une bonne digestion, diminue les sensations de ventre gonflé et facilite l'élimination du surplus d'eau dans le corps. On l'utilise aussi pour les voies respiratoires en infusion et même en inhalation car elle a une action bénéfique et apaisante pour la gorge et la

poitrine. Elle a également une action sur la sphère utérine et apaise les douleurs lors du cycle menstruel. Son goût est tellement agréable qu'elle devrait venir compléter la panoplie des épices et tisanes sur l'étagère de notre cuisine.

III.4.2 Feuilles de Moringa :

Les feuilles de Moringa sont riches en vitamines A, C, E et B. Une forte teneur en calcium et en potassium est à noter ainsi qu'en magnésium, manganèse, sélénium, fer. Elles contiennent également des bons acides gras et les 8 acides aminés dits essentiels (isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, valine). Elles sont, par contre, pauvres en phosphore et lipides. Attention cependant à leur teneur en oxalate, oxydant naturel contenu notamment dans les épinards.

Les feuilles de moringa vont aider les personnes carencées ou fatiguées à retrouver une énergie importante qui pourrait rivaliser avec celle fournie par les sucres lents.

Les feuilles de moringa ont aussi des propriétés anti tumorales, anti-inflammatoires et antibactériennes mais elles auraient également des propriétés neuro protectrices visant à améliorer le fonctionnement du cerveau, au niveau de la mémoire et des fonctions cognitives en cas de maladie d'Alzheimer.

La richesse en acides gras du Moringa se trouve dans les graines : acide oléique (oméga 9), acide palmitoléique (oméga 7). Ces acides gras agissent de façon préventive contre les maladies cardiovasculaires, en faisant grimper le bon cholestérol et baisser le mauvais, en évitant le syndrome métabolique conduisant à l'obésité. Ils ont aussi une action de diminution du glucose sanguin, particulièrement intéressant pour les personnes à tendance diabétique.

En médecine ayurvédique, le Moringa est bien connu depuis des siècles pour les vertus antiseptiques de sa sève en usage externe, de son écorce bouillie contre les calculs rénaux mais aussi de sa racine, riche en polyphénols, contre le paludisme, l'asthme ou les douleurs articulaires.

III.5 Protocole de séchage :

III.5.1 Préparation des échantillons de la Menthe pouliot :

Nous disposons deux séchoirs solaires direct de type serre couverte polycarbonate, fonctionnant en convection forcée, le premier séchoir (serre trapézoïdal), et le deuxième séchoir (serre tunnel) Figure III.1. La quantité de produit à sécher pendant les expériences été de 2 kg. Le produit épluché est divisé en trois lots et reparti à parts égales sur les deux séchoirs, le 3^{ème} lot est reparti à l'air libre. Afin d'obtenir les courbes des cinétiques de séchage, des échantillons sont pesés tout au long du processus de séchage. Simultanément, nous enregistrons les températures à l'aide de thermocouples de type K placés en différents endroits des deux prototypes des échoir solaire de type serre. Afin de déterminer la teneur en eau initiale, on introduit 3-5 grammes d'échantillons par coupelle en aluminium (05 coupelle utilisé) dans une étuve réglée à 105°C durant 24 heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale. Pour déterminer la cinétique de séchage nous avons procédé au protocole ci-dessous (Figure III.13).



Figure III. 13 : Etapes de détermination de la teneur en eau initiale de la menthe pouliot

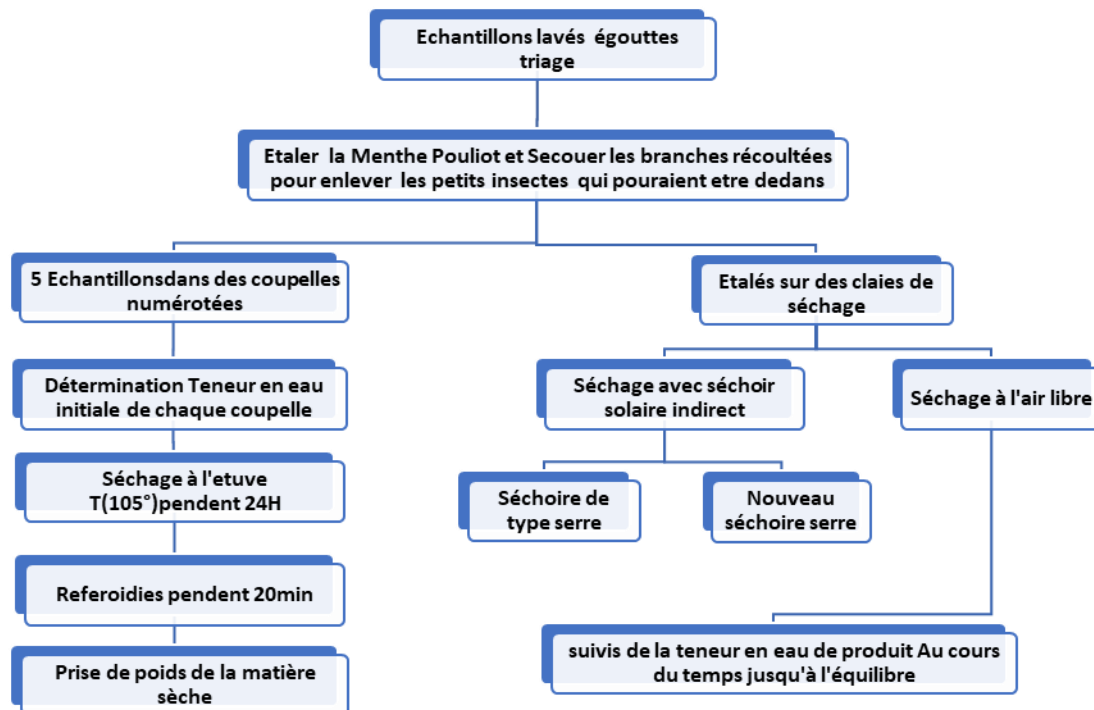


Figure III.14 : Schéma représentant le protocole de séchage de la menthe pouliot

III.5.2 Préparation de l'échantillon des feuilles de Moringa :

Triage et lavage des feuilles de Moringa à l'eau froide de robinet, puis secouez-les branches récoltées pour enlever les petits insectes qui pourraient être dedans, est reparti à parts égales sur deux lits (paniers) pour chaque séchoir (figure III.15). La quantité de produit à sécher est de 1.5 kg. Afin de déterminer la teneur en eau initiale, nous mettons une petite quantité de la Moringa (3–5g) dans l'étuve à 105 °C. Pour déterminer la cinétique et la vitesse de séchage, nous avons procédé au protocole suivant (Figure III. 16).



Figure III 15 : Etapes de séchage des feuilles de Moringa.

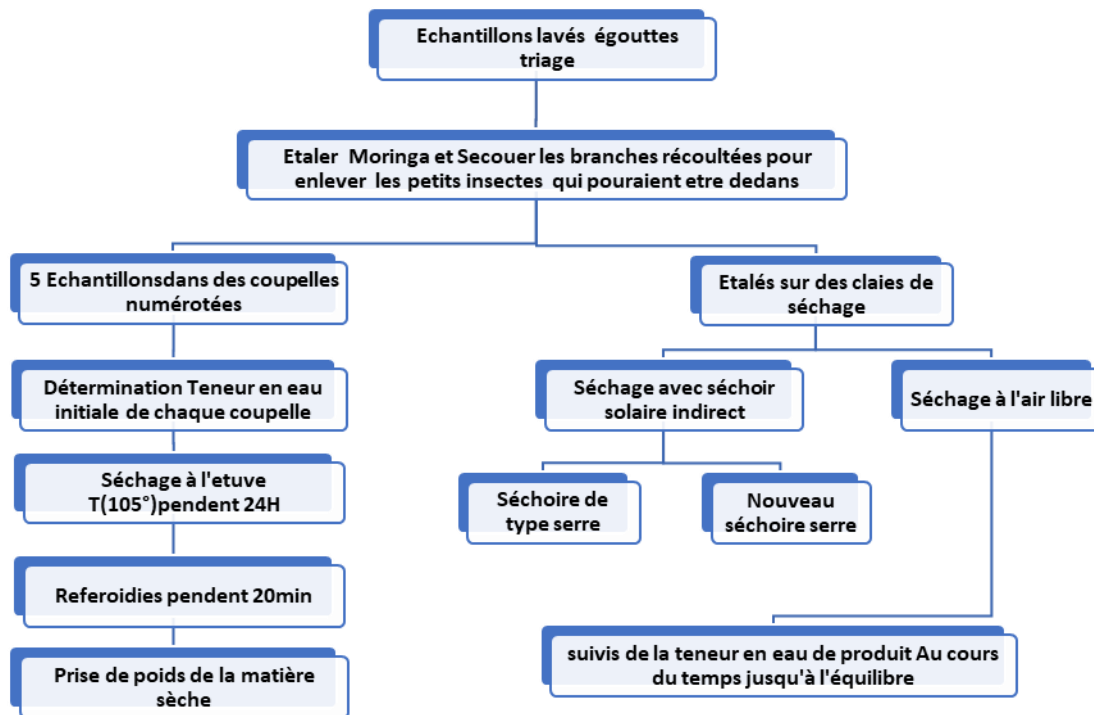


Figure III.16 : Schéma représentant le protocole de séchage des feuilles de Moringa.

III.6 Conception et fabrication de dispositif de stockage d'énergie thermique par matériau à changement de phase :

La photographie de prototype de séchoir solaire de type serre couplé avec le dispositif de stockage d'énergie thermique latente est illustré dans la figure III. 17. Il se compose de 40 canettes de cire de paraffine intégrées d'ailettes comme moyen d'amélioration de la conductivité thermique de MCP. Les photographies de réalisation expérimentale de dispositif de stockage d'énergie thermique latente et de préparation de matériaux à changement de phase est illustrée aux figure III.18 et figure III.19.

Le dispositif de stockage, est composé d'un lit de canettes, disposées en quinconces. L'ailette en tôle d'aluminium intégrée aux canettes est peinte en noir mat pour absorber le rayonnement solaire et convertir ces rayonnements en énergie thermique. Les dimensions d'ailette sont de, (20 cm * 5cm), 20 cm diviser par deux parties de 10 cm, elle est orientée au sud est incliné d'un angle de 32° par rapport à l'horizontale. L'objectif de cette configuration est d'augmenter la température de MCP.

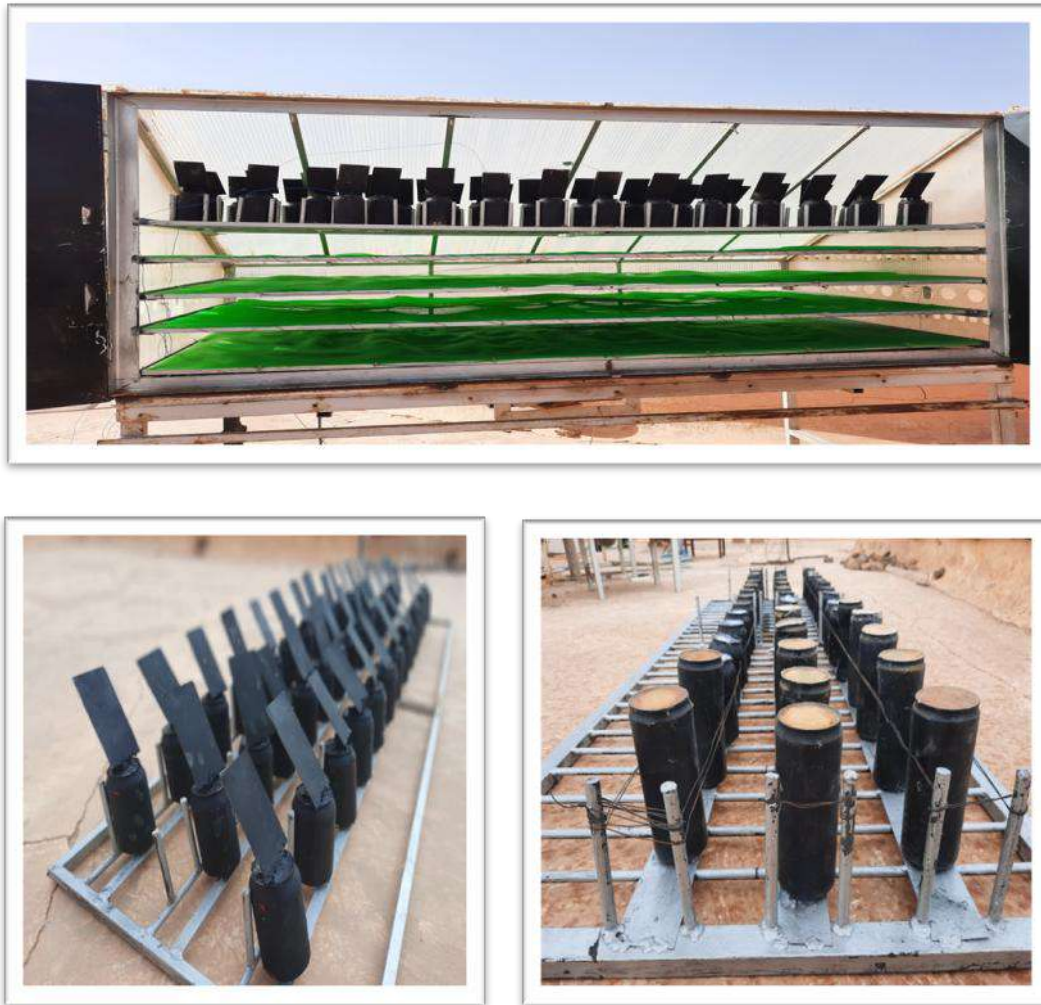


Figure III.17 : Photographie de prototype de séchoir solaire de type serre (trapézoïdale) avec le dispositif de stockage (MCP).



Figure III .18 : Préparation des ailettes en aluminium et son intégration dans les canettes.



Figure III .19 : Matériau de stockage de l'énergie thermique (paraffine wax) et sont remplissage dans les canettes

III.7 Cinétique de séchage :

III.7.1 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 105°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 :

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

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

m(*initiale*) : Masse de l'échantillon avant mise à l'étuve en gramme.

m(*finale*) : Masse de l'échantillon après mise à l'étuve en gramme.

III.7.2 Modélisation des cinétiques de séchage :

La modélisation des courbes de séchage consiste à déterminer une équation caractéristique de séchage de type : $MR = f(t)$.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{L'Equation(III.2)}$$

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 :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad \text{L'Equation (III.3)}$$

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-1 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.1. 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. En plus de (R^2) les différents paramètres statistiques tels que le khicarré réduit (χ^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 [36]

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

	N° Modèles	Equation	Références
1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model	$MR = (-kt)$	[Lewis, 1921]
2	Page Model	$MR = \exp -(kx^n)$	[Xanthopoulos et al., 2007]
3	Herderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = (Aexp - kt)$	[Zhang and Litchfield, 1991]
4	Modied Page Model	$MR = \exp(- (kx^n))$	[Midilli et al., 2002]
5	Logarithmic Model	$MR = Aexp(-kt) + c$	[Yaldyz and Ertekyn, 2001]
6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = Aexp(-kt^n) + bt$	[Midilli et al., 2002]
7	Diffusion Approximation (Diffusion Approach) Model	$MR = Aexp(-kt) + (1 - A)exp(-kbt)$	[Balbay and Sahin, 2012]
8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	$MR = Aexp(-k1t) + (1 - A)exp(-k2t)$	[Ruiz et al., 2013]
9	Two-Termes Model	$MR = Aexp(-k1t) + bexp(-k2t)$	[Akpinar et al., 2004]
10	Two-Termes Exponentiel Model	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kAt)$	[Corzo et al., 2011]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \quad \text{L'Equation(III.4)}$$

$$\text{Avec : } X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pré},i})^2}{N-n} \quad \text{L'Equation(III.5)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{pré},i} - \text{MR}_{\text{exp},i})^2} \quad \text{L'Equation(III.6)}$$

$$\text{MR}_{\text{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{MR}_{\text{exp},i}}{N} \quad \text{L'Equation (III.7)}$$

Avec MR_{exp} et $\text{MR}_{\text{pré}}$ Présent, respectivement, la teneur en eau issue de l'expérience et prédite par le modèle, N est le nombre d'observations, n est le nombre de constantes du modèle. L'analyse statistique et de corrélations et les méthodes de régression sont largement utilisées dans la modélisation du comportement au cours du séchage de divers produits agricoles. Les modèles de régression linéaire et non linéaire sont essentiels pour établir une relation entre les variables et sont d'une importance primordiale dans le cas où les auteurs n'ont pas établi de relations empiriques.

III.7. 3 Détermination expérimentale de la diffusivité effective de l'eau dans le produit :

Le taux de transfert de masse par diffusion pure est proportionnel au gradient de concentration de la teneur en eau, avec le coefficient de diffusion effective. Ainsi, la détermination de ce dernier coefficient est essentielle pour mieux d'écrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire, dont l'équation est exprimée par [37] :

$$\frac{\partial \text{MR}}{\partial t} = \nabla [D_{\text{eff}} \nabla \text{MR}] \quad \text{L'Equation (III.8)}$$

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

$$\frac{\partial \text{MR}}{\partial t} = \nabla D_{\text{eff}} \nabla^2 \text{MR} \quad \text{L'Equation (III.9)}$$

La tranche de produit séché peut être considérée comme une plaque uniforme soumise à un régime graduel non stationnaire avec une distribution initiale uniforme et des concentrations égales à la surface. En supposant que la matrice est une plaque infinie indéformable (rétractable négligeable ou étendue) avec une répartition uniforme de l'humidité initiale, une résistance externe négligeable et une diffusivité constante, la solution analytique de la deuxième loi de Fick a été développée par Crank [38] :

$$\mathbf{MR} = \frac{\mathbf{8}}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\mathbf{1}}{(2n+1)^2} \exp(- (2n+1)^2 \pi^2 \mathbf{D}_{\text{eff}} - \pi^2 \mathbf{D}_{\text{eff}} t / 4L^2) \quad \mathbf{L'Equation(III.10)}$$

Ou : \mathbf{D}_{eff} est la diffusivité effective (en m^2/s), t est le temps en (s), (L) est le demi-épaisseur de la tranche (en m) et n est un entier positif. Pour un temps de traitement suffisamment long, tous les termes de la séquence suivante ($n \geq 1$) ont été considérés comme négligeables par rapport au premier terme. Donc l'équation(Eq.III.11) peut être supposée comme suit :

$$\mathbf{MR} = \frac{\mathbf{8}}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \mathbf{D}_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad \mathbf{L'Equation (III.11)}$$

L'équation (Eq III.13) peut être réarrangée et exprimée comme suit :

$$\mathbf{Ln(MR)} = \mathbf{Ln}\left(\frac{\mathbf{8}}{\pi^2}\right) - \pi^2 \mathbf{D}_{\text{eff}} t / 4L^2 \quad \mathbf{L'Equation (III.12)}$$

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

$$\mathbf{slope(k)} = -\pi^2 \mathbf{D}_{\text{eff}} / 4L^2 \quad \mathbf{L'Equation(III.13)}$$



CHAPITRE IV :
Résultats & Discussions

IV.1 RESULTATS ET DISCUSSION :

Les expériences ont été menées pendant la période du 14 février au 23 mai 2022 à la plate-forme expérimentale de séchage solaire (Figure IV.1) à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, situé à une latitude de $32,37^\circ$ Nord et une longitude de $3,77$ Ouest en suivant le comportement thermique des prototypes de séchoir solaire direct de type serre tunnel et trapézoïdal. Les expériences ont été réalisées dans des conditions de fonctionnement réelles de la région de Ghardaïa. Les caractéristiques de séchage de la Menthe pouliot et de Moringa ont été étudiées sur trois jours consécutifs. Les performances thermiques des prototypes de séchoir solaire de type direct sont mesurées en termes des températures dans différentes positions des prototypes. Le débit massique d'air est fixé à 110 kg/h pour chaque cas.



Figure IV.1 Photographie de la plate-forme d'expérience de séchage dans URAER.

IV.2 Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire direct de type serre (tunnel et trapézoïdal) sans produits :

Les différentes expériences qui ont été faits sont les suivants :

Test N°01 : Comparer le comportement thermique de nouveau prototype de séchoir solaire direct de type serre (trapézoïdal) par rapport à l'ancien prototype de séchoir solaire direct de type serre (tunnel) dans le cas d'un système de stockage thermique par chaleur sensible (lit de roche) est intégré (Figure IV.2) ;

Test N°02 : Comparer le comportement thermique de nouveau prototype de séchoir solaire direct de type serre (trapézoïdal) par rapport à l'ancien prototype de séchoir solaire direct de type serre (tunnel) dans le cas d'un système de stockage thermique par chaleur latente

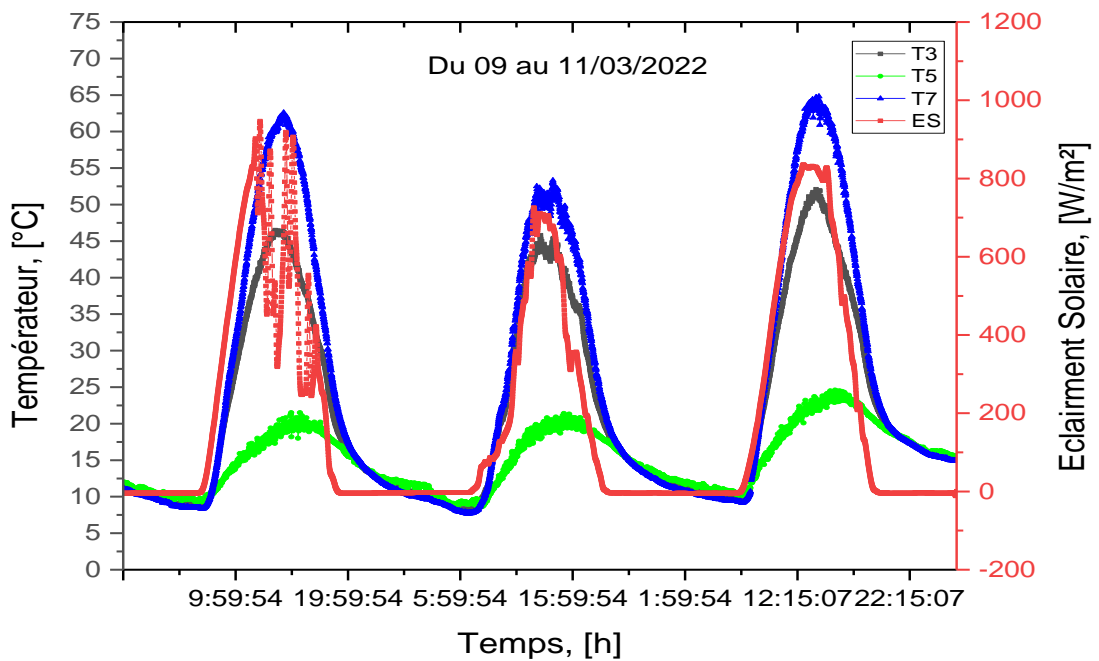
(dispositif de stockage thermique développé dans ce travail de recherche) est intégré (Figure IV.4) ;

IV.2.1 Test N°01 : du 09 au 11/03/2022.

Nous commençons nos essais expérimentaux dans un premier temps, dans l'un des séchoirs solaires de type direct, nous avons intégré un lit de roche rempli de 90kg de roche et dans le deuxième, nous avons intégré la même quantité (Figure IV.2). La Figure IV.3) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes



Figure IV.2 Séchoirs solaires de la serre trapézoïdale et la serre tunnel avec stockage thermique sensible (Lit de roches)



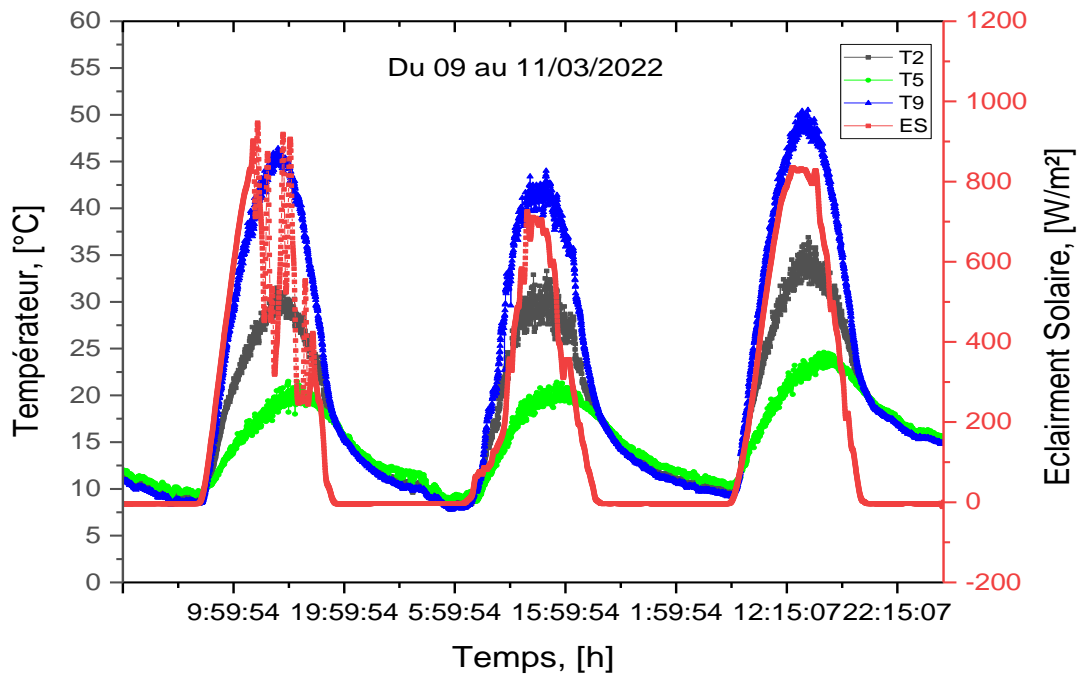


Figure IV.3 Evolution de la température T2, T5 et T9 du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et MCP (Figure IV.4) pour les journées du 09 au 11/03/2022.

IV.2.2 Test N°02 : du 21 au 27/04/2022

Dans un deuxième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type direct, nous avons intégré le dispositif de stockage thermique développé dans ce travail et dans le deuxième, nous avons intégré la même quantité. La (Figure IV.6) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes



Figure IV.4 Prototypes de séchoirs solaires de type direct tunnel (gauche) et trapézoïdal (droite) avec MCP

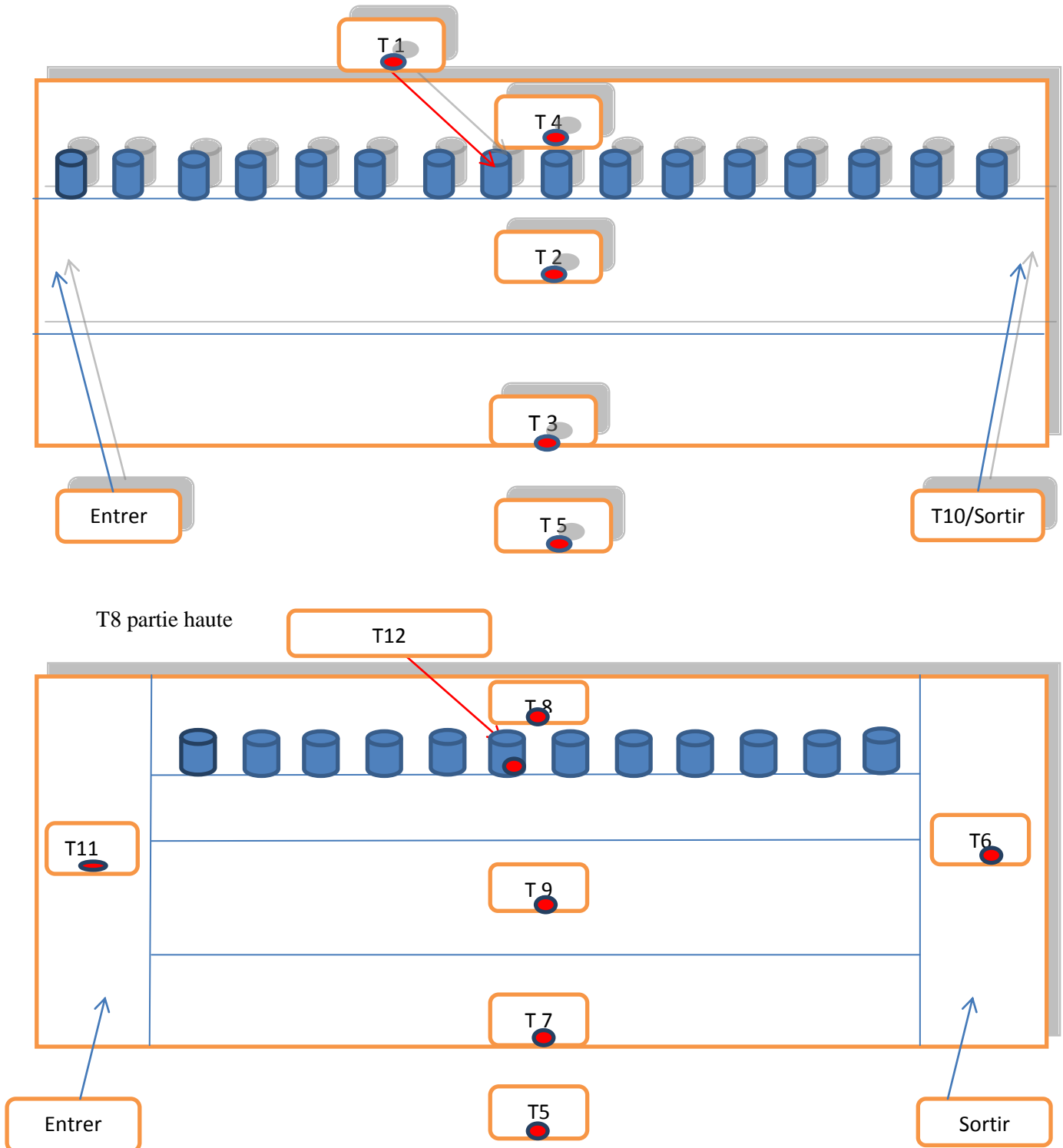


Figure IV.5 : Différentes positions des thermocouples dans les prototypes de deux séchoirs solaires différents de type direct.

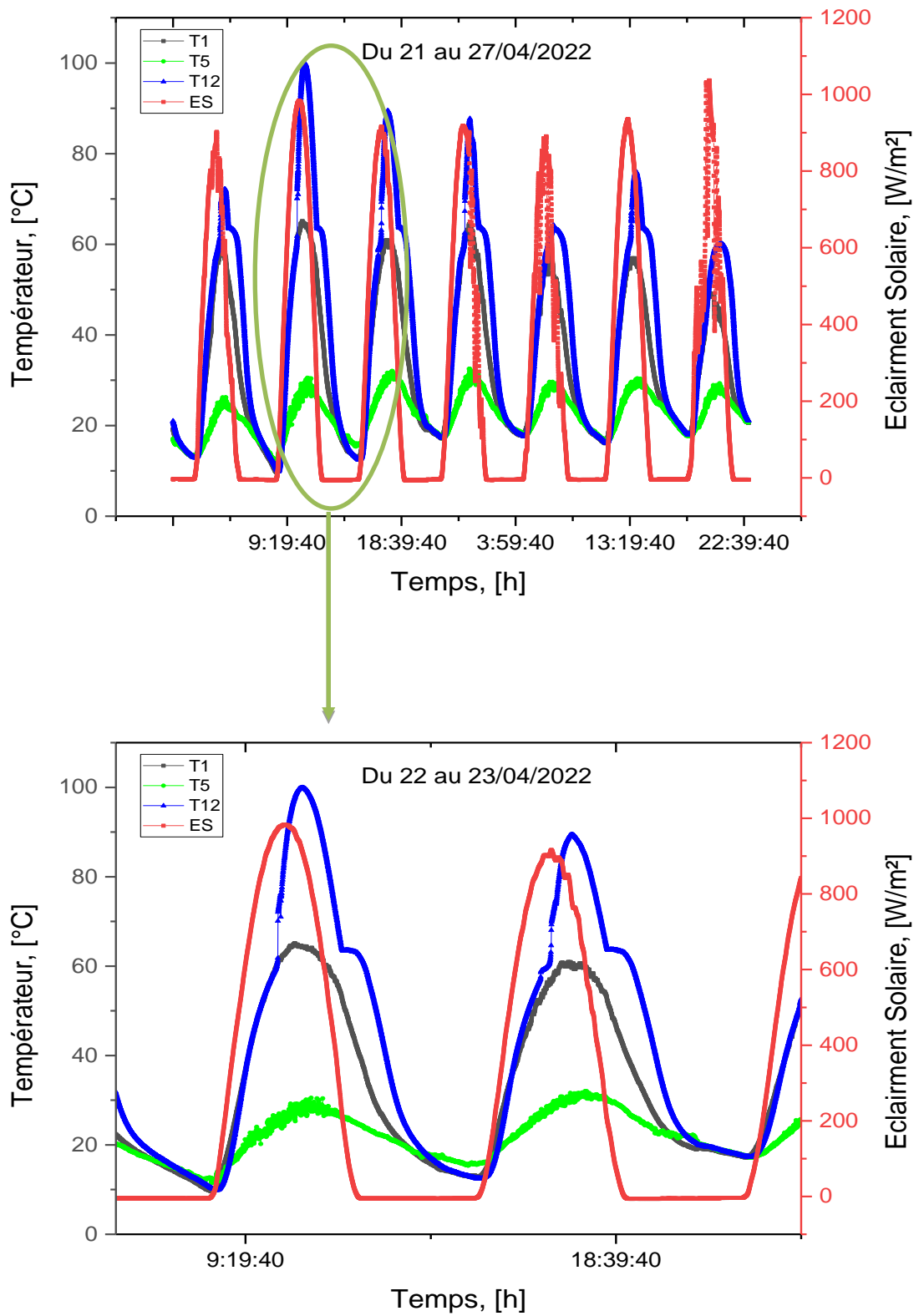


Figure IV.6 Evolution de la température T1 T5 T12 dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et MCP (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 27/04/2022.

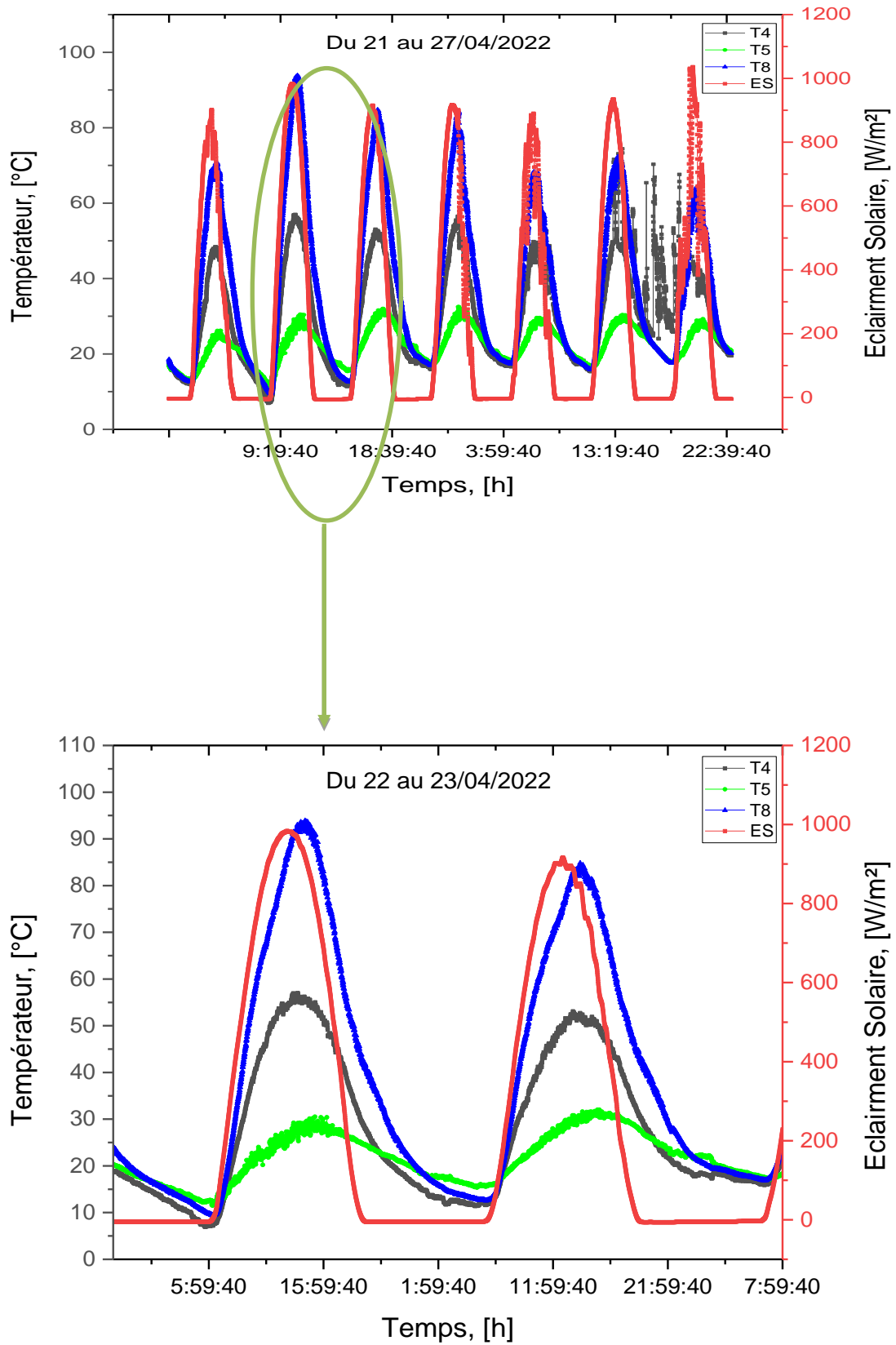


Figure IV.7 Evolution de la température T4 T5 T8 à la haute de la serre du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de (roche) + MCP pour les journées du 21 au 27/04/2022.

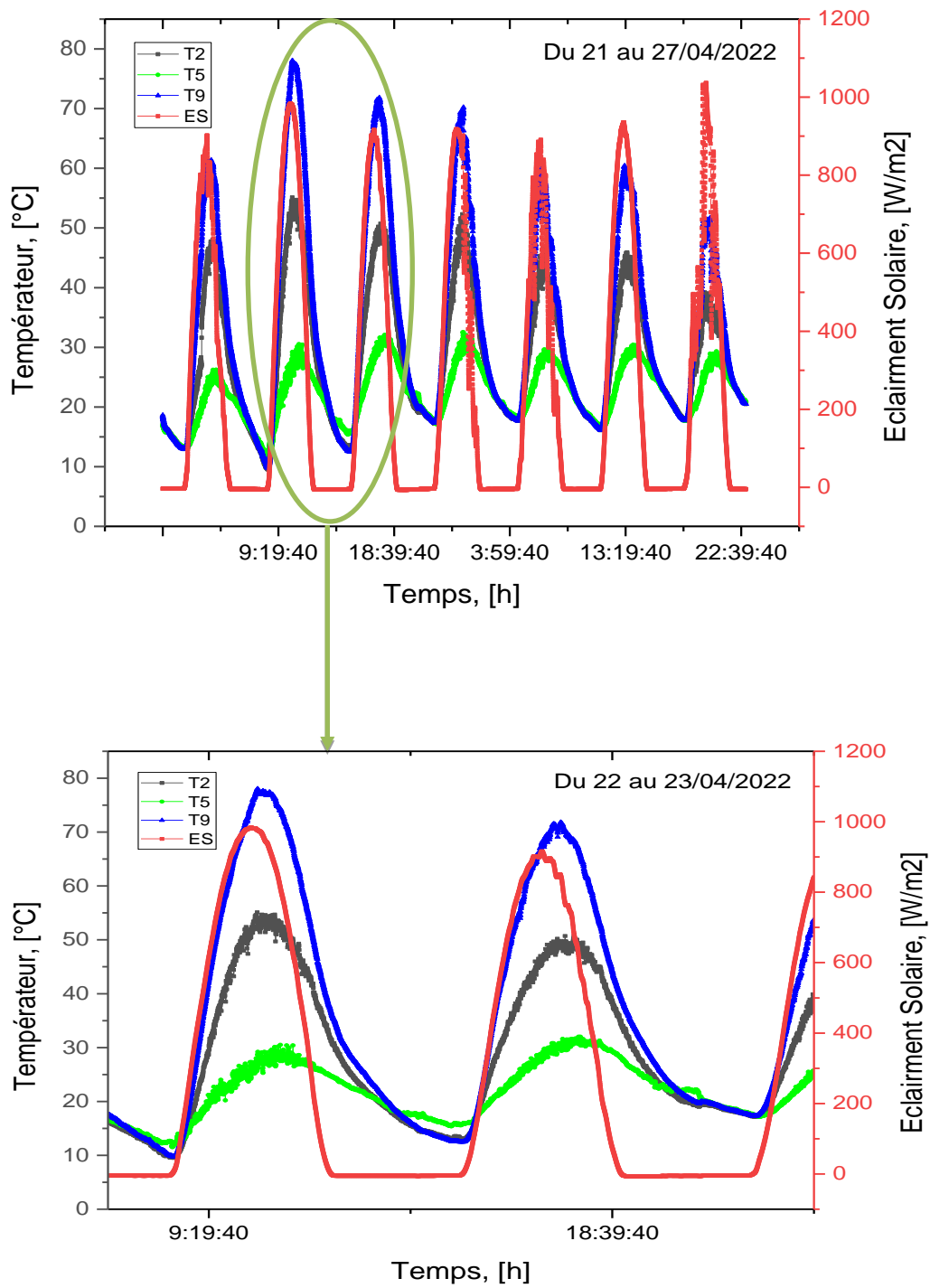


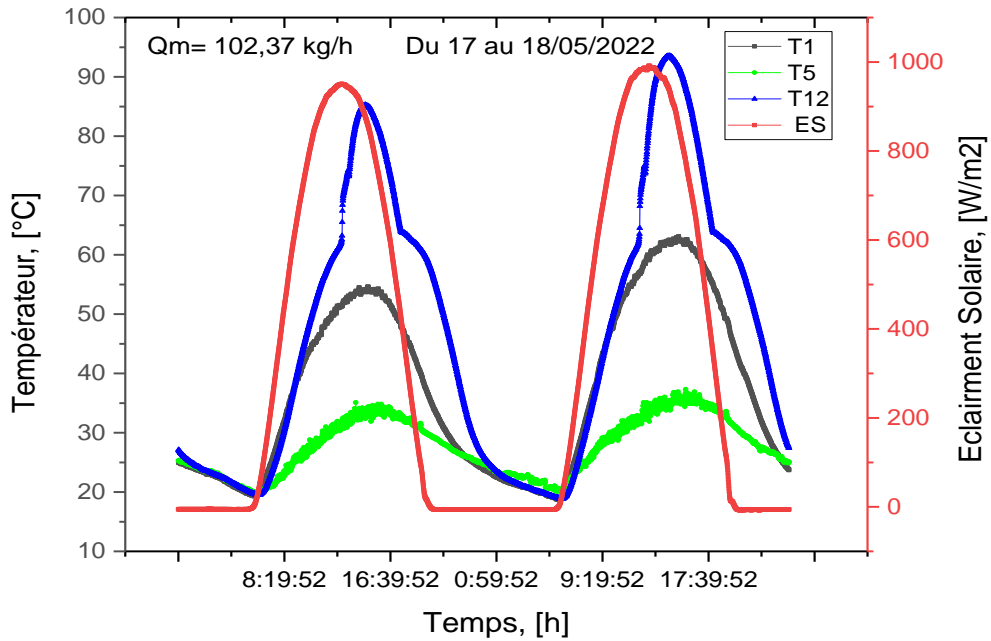
Figure IV.8 : Evolution de la température T2 T5 T9 à l'air intérieur de la serre du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de MCP (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 27/04/2022.

IV.3 Effet d'intégration des obstacles dans le prototype de séchoir solaire de type serre trapézoïdal :

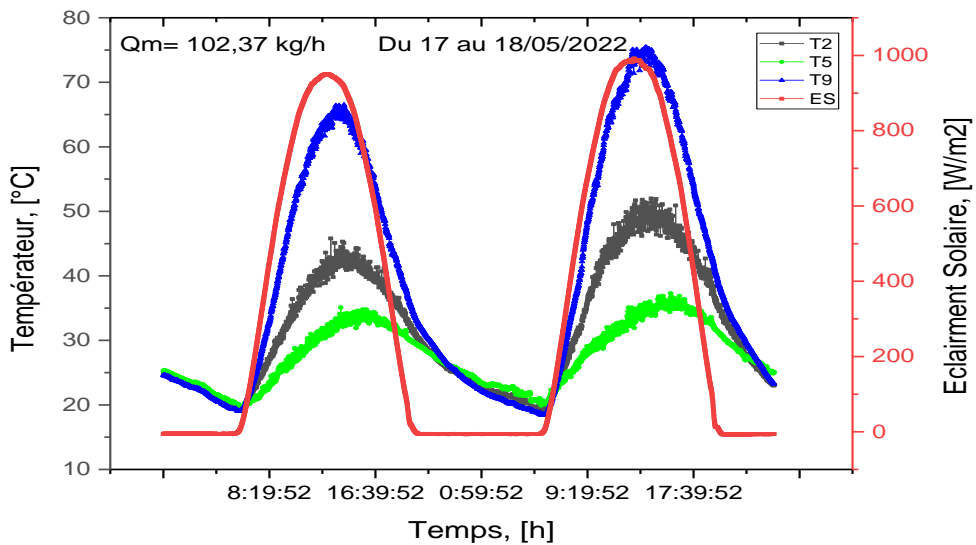
L'examinations expérimentale effectuée a basé sur des scénarios. Deux scénarios ont été étudiés, faisant notamment placer des obstacles dans l'écoulement d'air à l'intérieur de prototype de séchoir solaire de type serre trapézoïdal. On fait varier le débit pour chaque scenario.

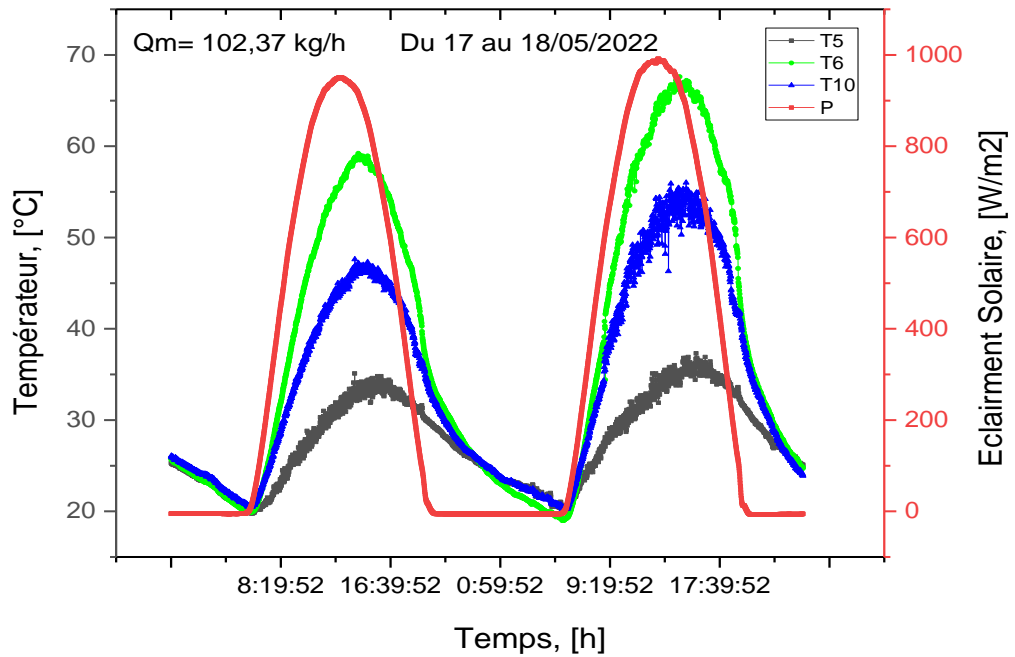
Scenario N° 1 : prototype avec obstacles intégrés

Débit maximum (Qm=102.37kg/h) :



(a)



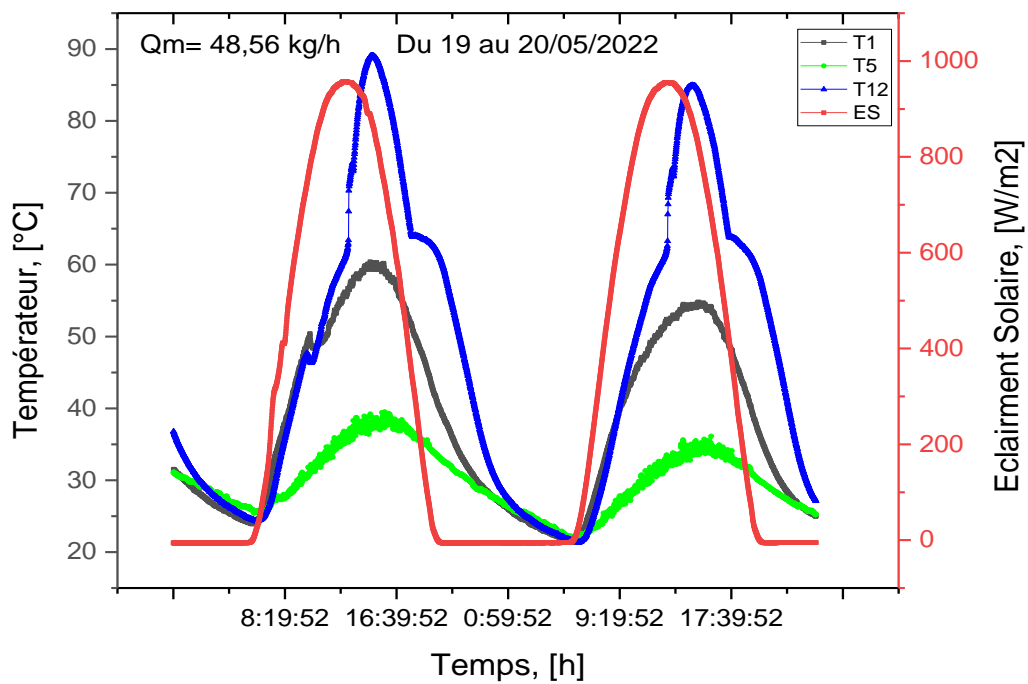


(b)

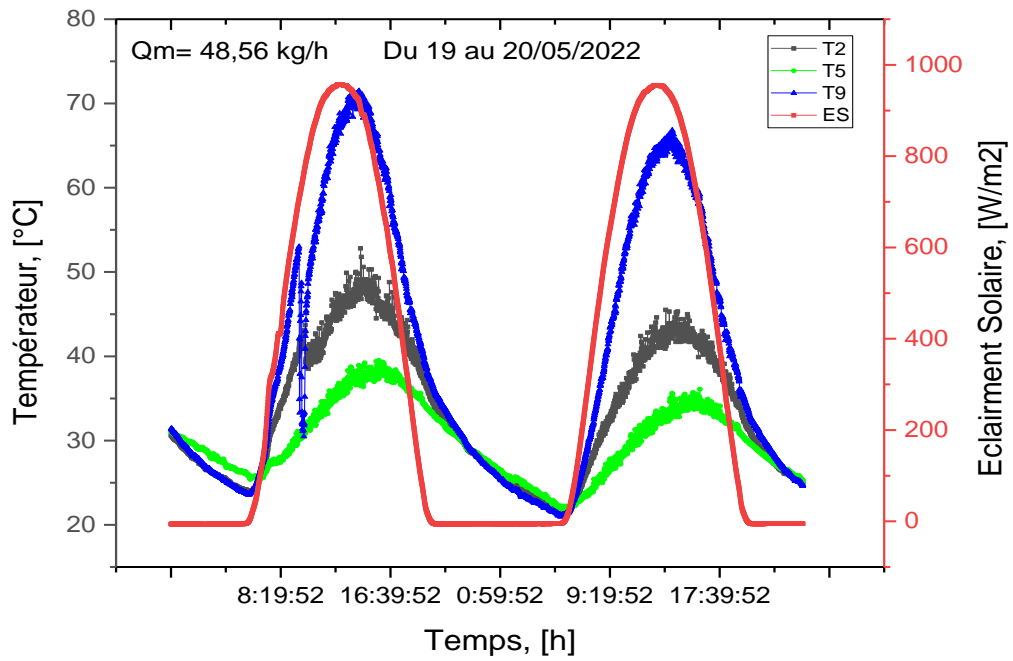
(c)

Figure IV.9: Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie pour les journées du 17 au 18/05/2022.

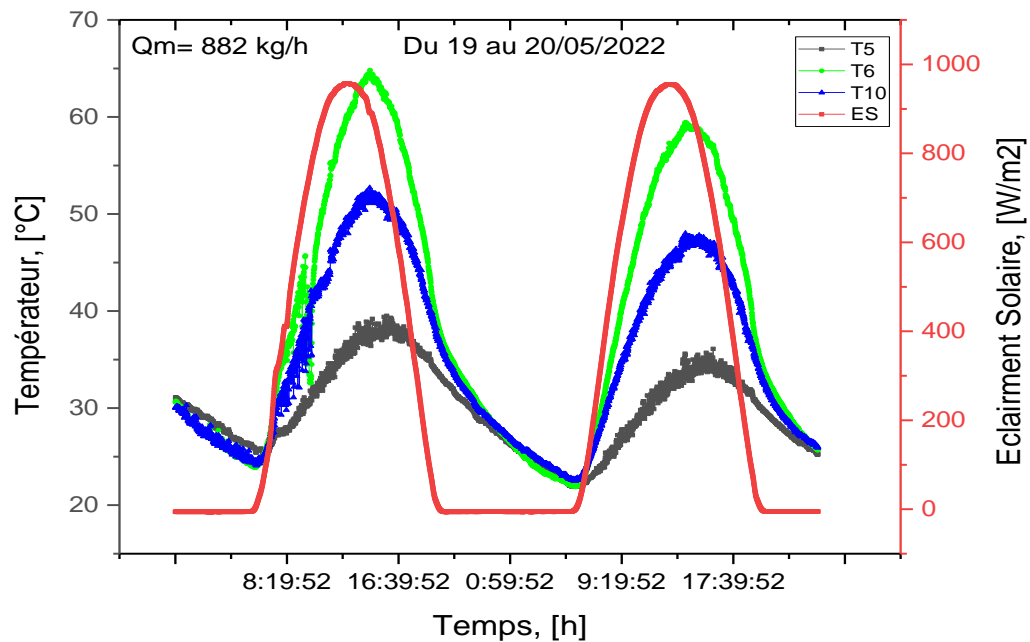
Débit moyen ($Q_m=48.56 \text{ kg/h}$) :



(a)



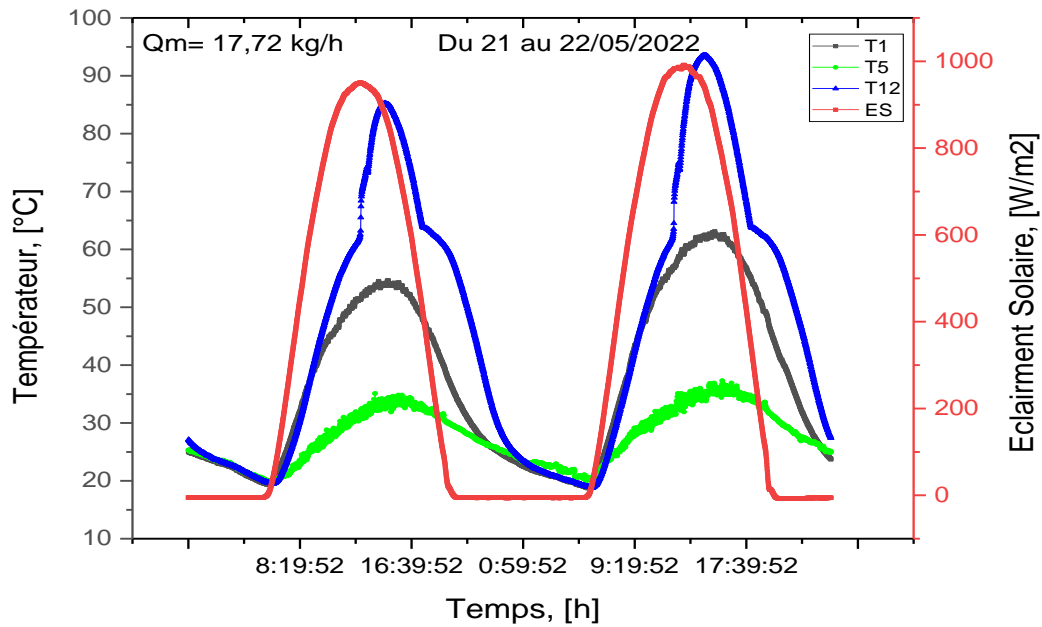
(b)



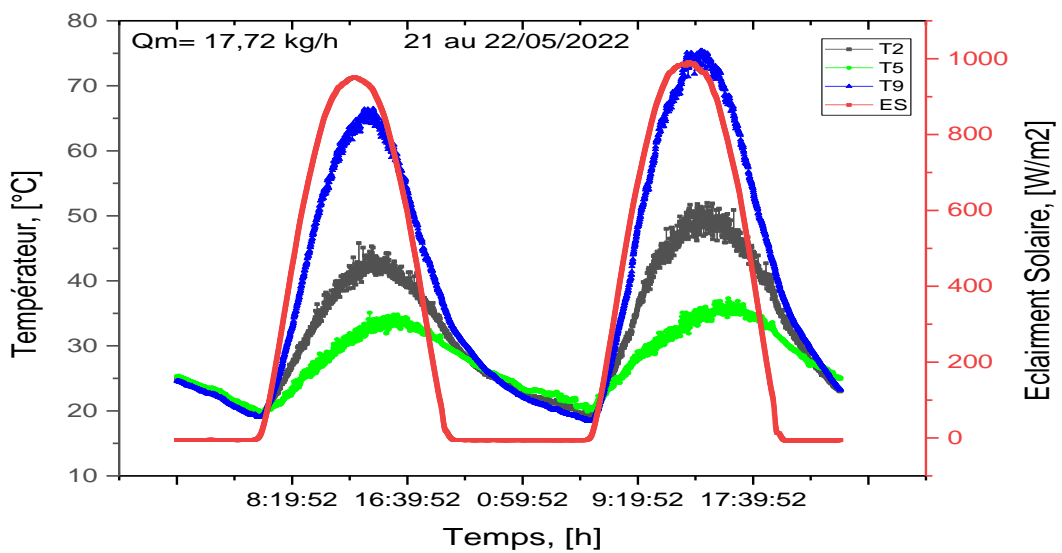
(c)

Figure IV.10 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV5) pour les journées du 19 au 20/05/2022.

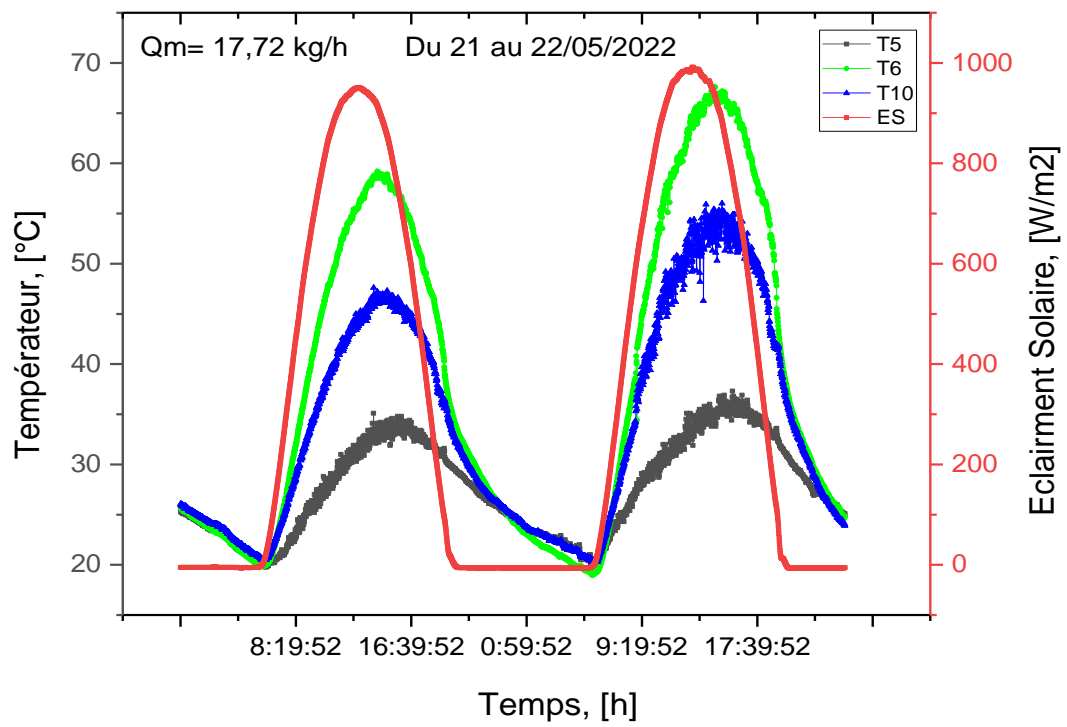
Débit minimum ($Q_m=17.72 \text{ Kg/h}$) :



(a)



(b)

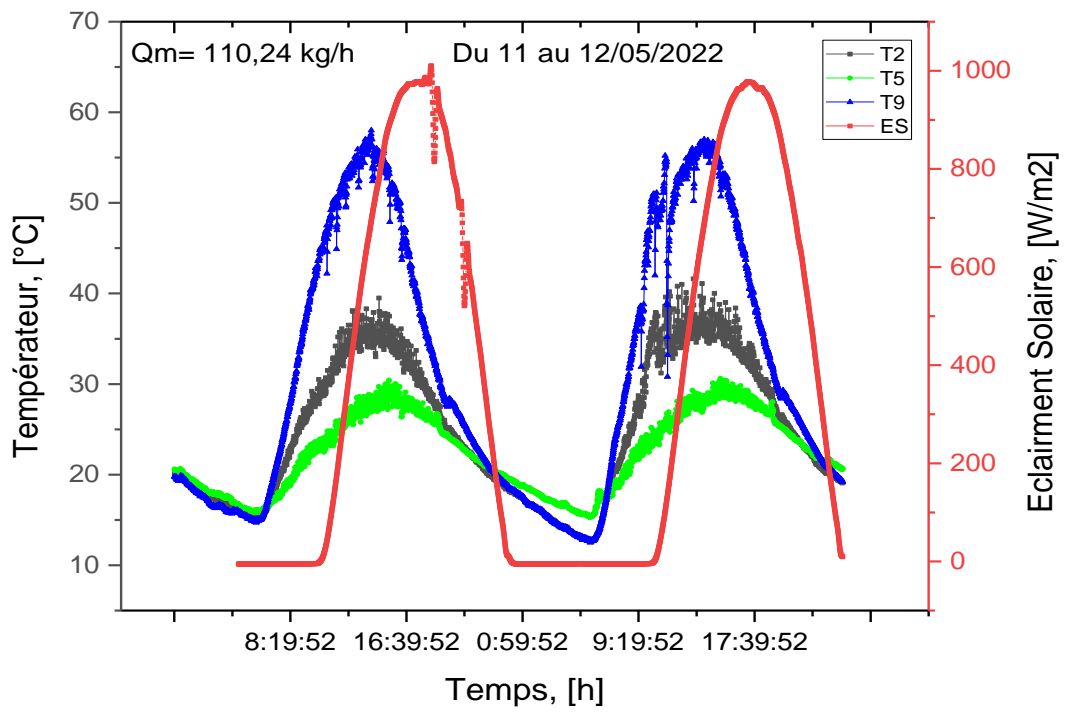


(c)

Figure IV.11 Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 21 au 22/05/2022.

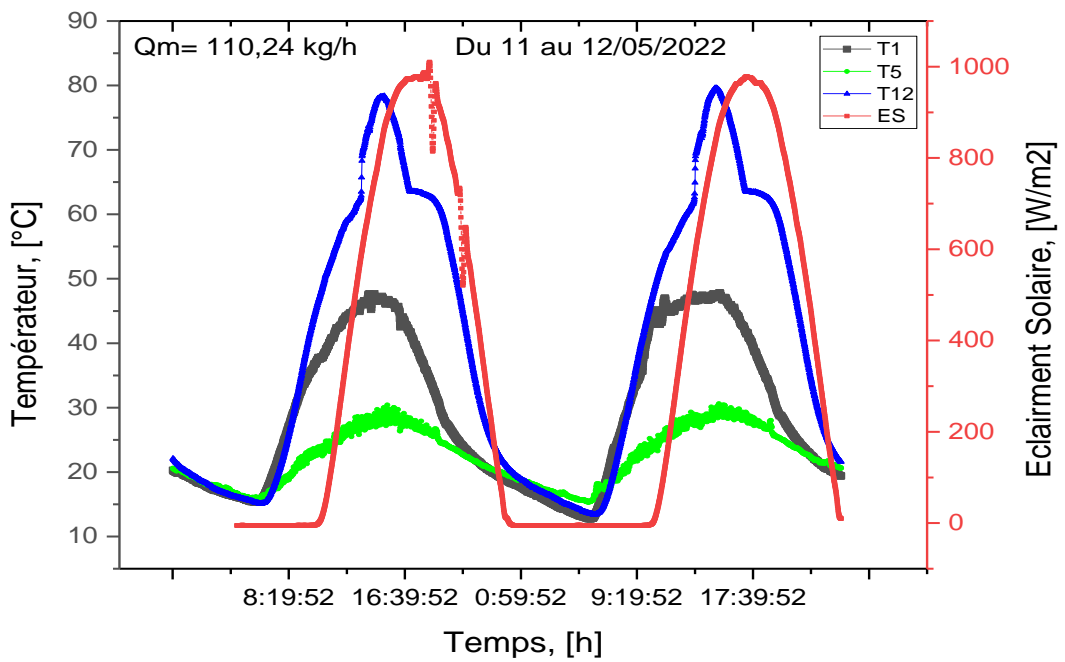
Scenario N° 2 : Prototype sans obstacles intégrés

Débit maximum ($Q_m=110.24$ kg/h)

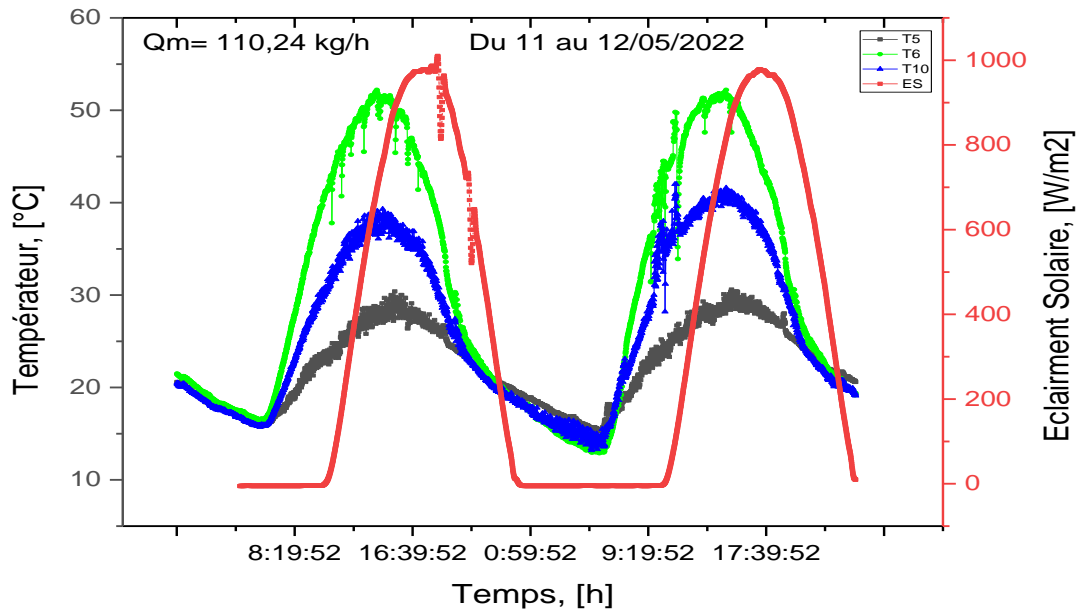


:

(a)



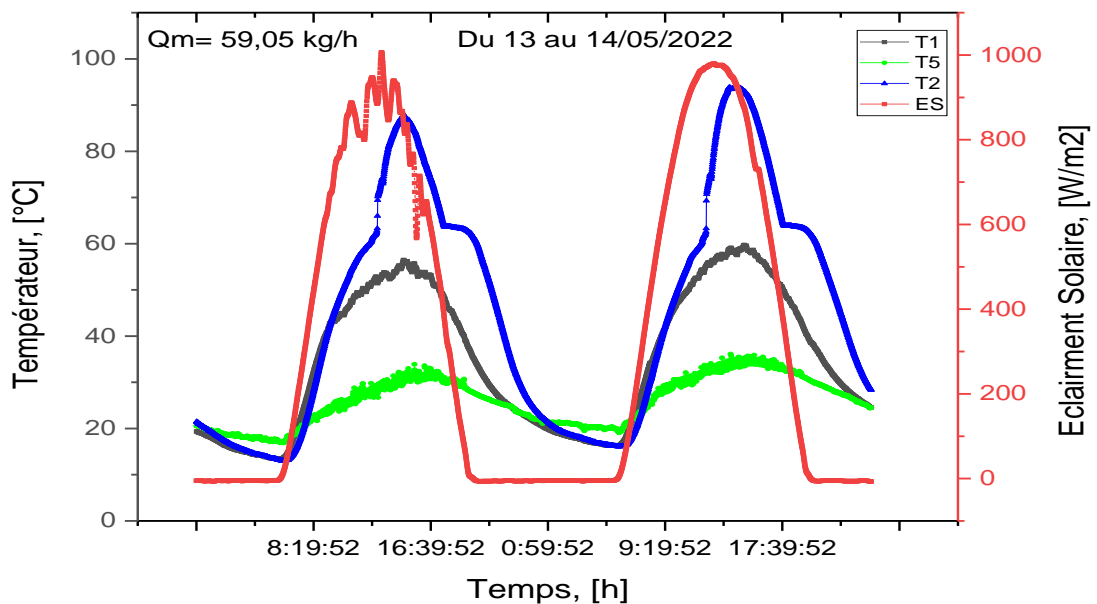
(b)



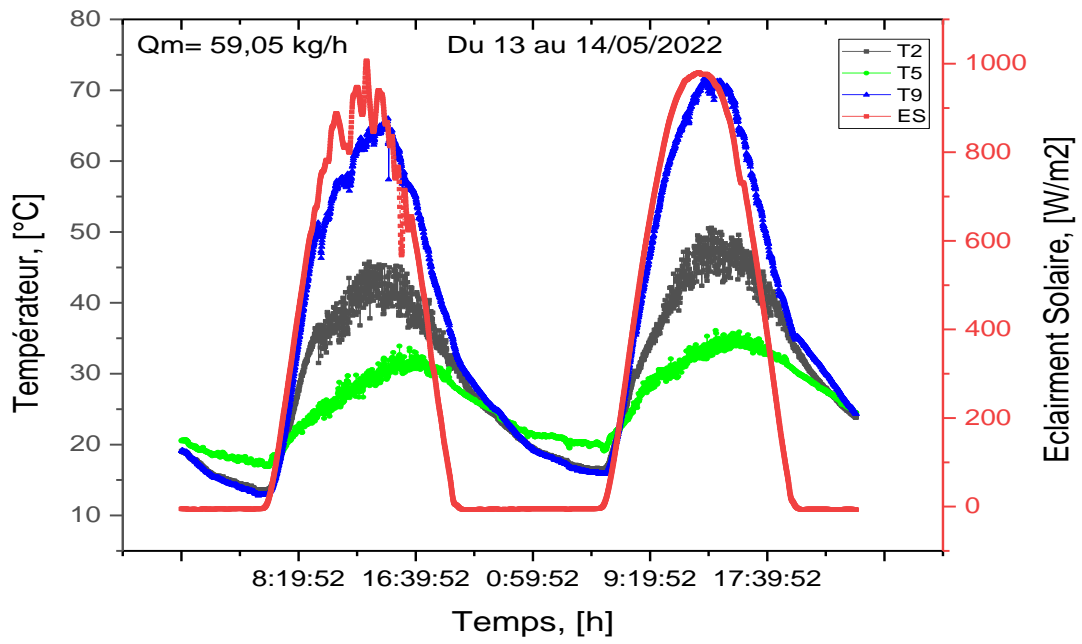
(c)

Figure IV.12 : Evolution de la température T_5 T_6 T_{10} (a) à l'air intérieur de la serre et (b) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP) , (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 11 au 12/05/2022.

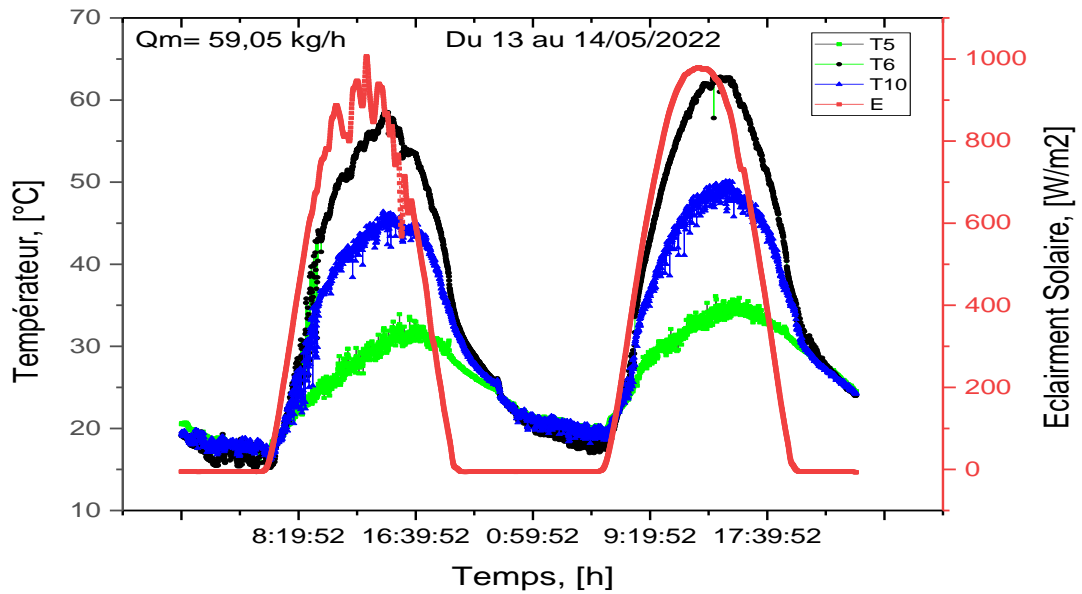
Débit moyen ($Q_m=59.05 \text{ kg/h}$) :



(a)



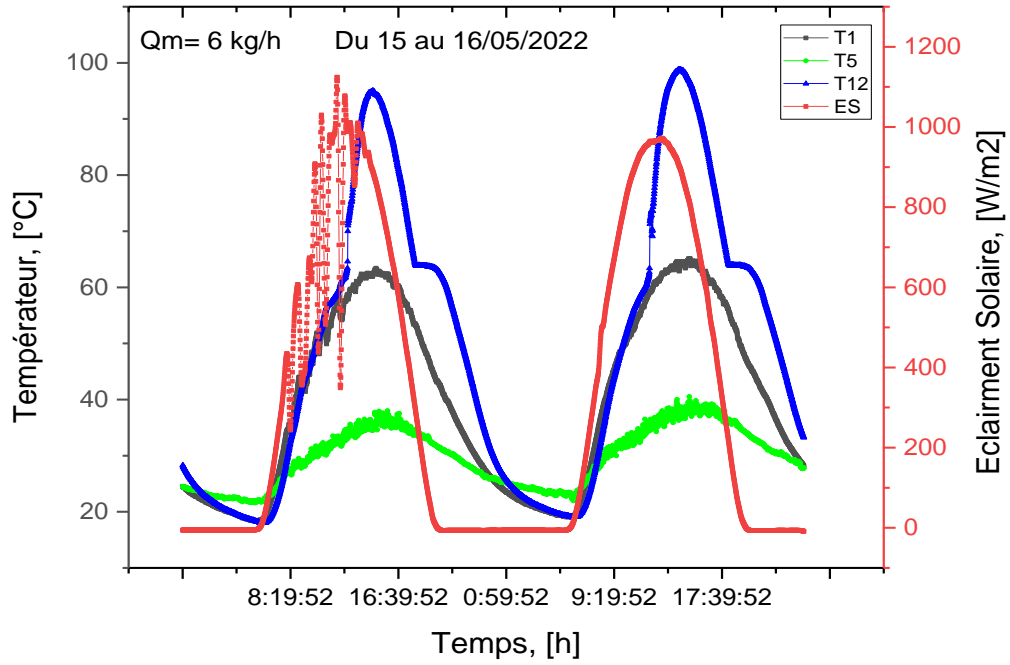
(b)



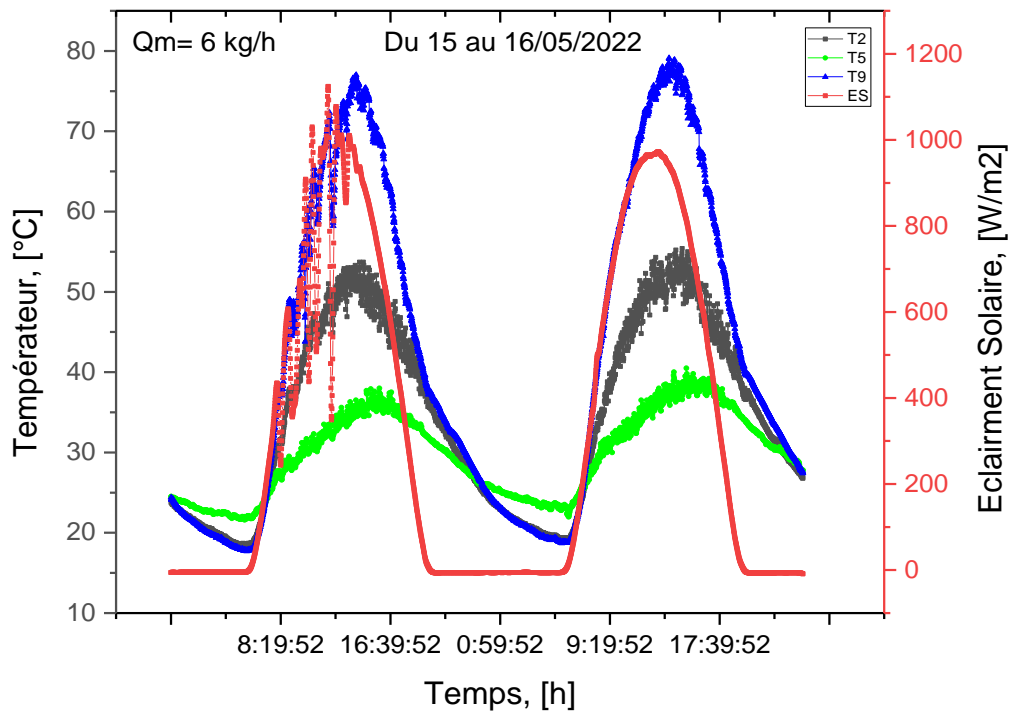
(c)

Figure IV.13 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP ,(b) à l’air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 13 au 14-5-2022.

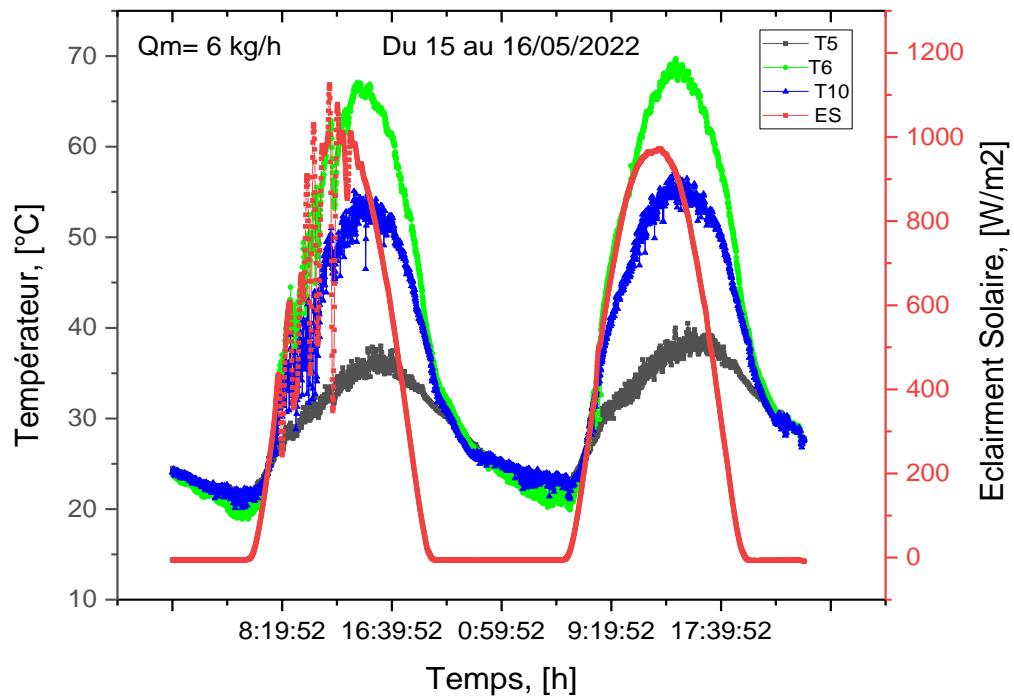
Débit minimum ($Q_m=26.25 \text{ Kg/h}$) :



(a)



(b)



(c)

Figure IV.14 : Evolution de la température T5 T6 T10 (a) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche et MCP), (b) à l'air intérieur de la serre et (c) à la sortie (Figure IV.5) pour les journées du 15 au 16/05/2022.

IV.4 Courbes de séchage

Les résultats expérimentaux en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues dans les conditions météorologiques de la zone semi-aride de Ghardaïa ont été convertis en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). Les variations de la teneur en eau avec le temps pour différentes conditions météorologiques sont présentées sur la Figure IV.7(1, 2).

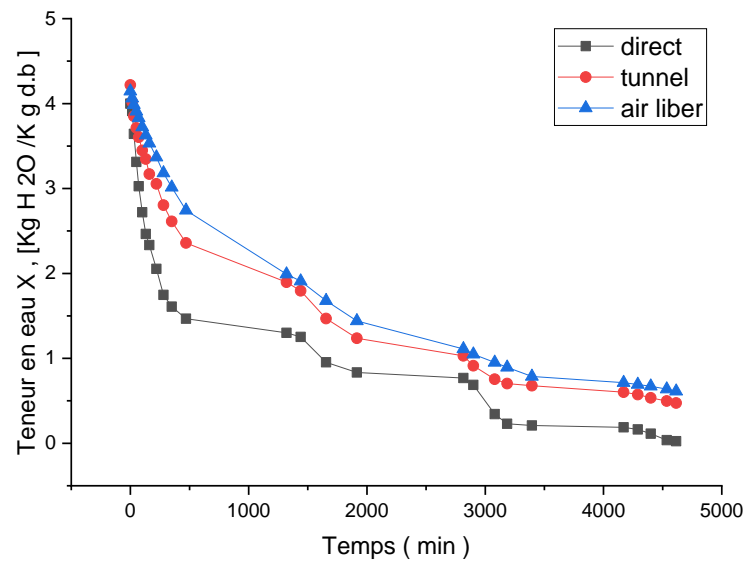


Figure IV.15 Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la menthe pouliot .

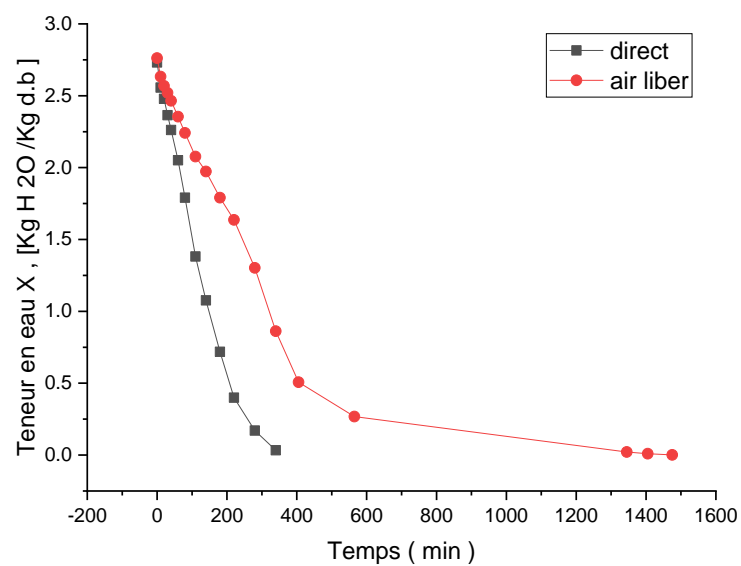


Figure IV.16 Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la Moringa.

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

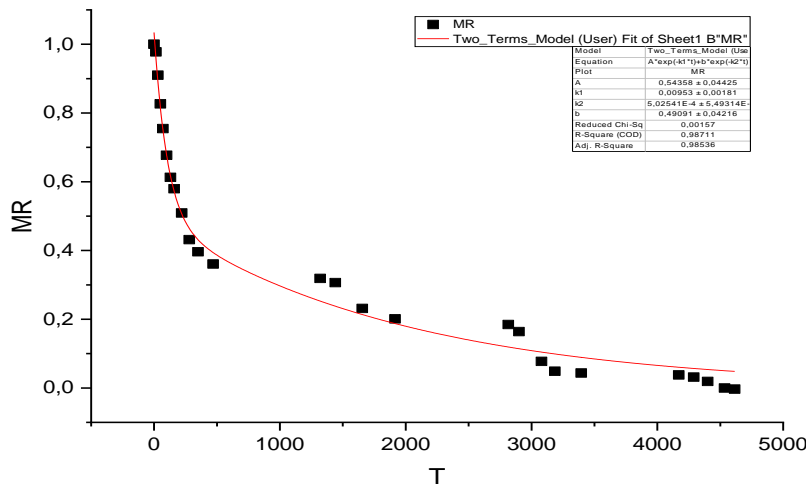
Afin de déterminer la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage, dix modèles de séchage en couche mince ont été ajustés aux données expérimentales (Tableau IV.1). A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans le **Tableau VI.1**, on suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination le plus élevé R^2 , le plus bas du chi carré χ^2 et de l'erreur carrée moyenne RMSE. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux montrent les valeurs des modèles les mieux adaptés. Dans le cas de séchage de la Menthe pouliot, comme le **Tableau VI.1**, le modèle de **Two-Terms** a donné le meilleur résultat de lissage des données expérimental dans séchoir solaire trapézoïdal et dans le séchage à l'air libre. Pour le séchoir solaire de type serre tunnel le modèle de **Midilli-Kucuka** a donné le meilleur résultat de lissage des données expérimental. Ainsi, le modèle de **Midilli-Kucuka** a donné le meilleur résultat de lissage des données expérimental dans séchoir solaire trapézoïdal et dans le cas de séchage solaire de Moringa à l'air libre et au séchoir solaire trapézoïdal. **Tableau IV.1** : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince

pour la Menthe Pouliot.

Procédés	N°	Modèle	Constantes des modèles pour					R^2	RMSE	χ^2	
			K		n	a	b				c
			K1	K2							
Séchoir solaire trapézoïdal	1	Newton	0,003						0,864	0,121	0,121
	2	Page	0,032		0,535				0,966	0,062	0,004
	3	Modified Page	0,002		0,535				0,966	0,062	0,004
	4	Henderson and Pabis	9,417E-4			0,797			0,893	0,109	0,012
	5	Logarithmic	0,003			0,849		0,117	0,934	0,929	0,008
	6	Midilli-Kucuk	0,057		0,449	1,072	-1,323E-5		0,970	0,060	0,004
	7	Approximation of Diffusion	0,009			0,004	0,058		0,986	0,040	0,002
	8	Verma et al	4,975E-4	0,009		0,484			0,986	0,040	0,002
	9	Two-Terms	0,0095	5,025E-4		0,544	0,490		0,987	0,0396	0,002
	10	Tow-termsExponential	0,007			0,222			0,894	0,109	0,012
Séchoir solaire tunnel	1	Newton	0,001						0,9438	0,084	0,007
	2	Page	0,0098		0,676				0,989	0,039	0,001
	3	Modified Page	0,001		0,678				0,989	0,039	0,001
	4	Henderson and Pabis	7,8699E-4			0,877			0,977	0,055	0,003
	5	Logarithmic	8,301E-4			0,867		0,013	0,977	0,056	0,003
	6	Midilli-Kucuk	0,020	0,549	1,019	-2,823E-5			0,995	0,026	7,02E-4
	7	Approximation of Diffusion	0,010			0,259	0,063		0,994	0,029	8,440E-4
	8	Verma et al	0,010	6,484E-4		0,258			0,993	0,029	8,440E-4
	9	Two-Terms	0,0096	6,467E-4		0,252	0,739		0,994	0,0295	8,753E-4
	10	Tow-termsExponential	0,0054			0,157			0,973	0,0591	0,004
Séchage à l'air libre	1	Newton	0,001						0,964	0,964	0,005
	2	Page	0,002		0,847				0,995	0,027	7,369E-4
	3	Modified Page	0,002		0,847				0,995	0,027	7,369E-4
	4	Henderson and Pabis	8,155E-4						0,989	0,04	0,002
	5	Logarithmic	6,565E-4					-0,049	0,993	0,032	0,001
	6	Midilli-Kucuk	6,307E7		-1,297E7	0,815	-2,06E-4		0,643	0,244	0,0597
	7	Approximation of Diffusion	8,155E-4			1	1		0,989	0,042	0,002
	8	Verma et al	7,462E-4	19,303		0,945			0,995	0,029	8,624E-4
	9	Two-Terms	0,008	6,91E-4		0,125	0,877		0,997	0,022	5,04E-4
	10	Tow-termsExponential	0,006			0,119			0,997	0,023	5,135E-4

Tableau IV.2 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince de Moringa.

Procédés	N°	Modèle	Constantes des modèles					R ²	RMSE	χ ²	
			K		n	A	b				c
			K1	K2							
Séchoir solaire trapézoïdal	1	Newton	0,01						0,969	0,064	0,004
	2	Page	0,001		1,394				0,996	0,026	6,76E-4
	3	Modified Page	0,001		1,394				0,996	0,026	6,76E-4
	4	Henderson and Pabis	0,008			1,063			0,99	0,053	0,003
	5	Logarithmic	0,007			1,11		-0,0553	0,990	0,043	0,009
	6	Midilli-Kucuk	5,613E-4		1,502	0,966	-2,407E-5		0,999	0,015	2,187E-4
	7	Approximation of Diffusion	0,014			-9,803E8	1		0,996	0,029	8,160E-4
	8	Verma et al	0,003	0,003		101,656			0,993	0,036	0,001
	9	Two-Terms	0,008	0,008		0,532	0,532		0,984	0,056	0,003
	10	Tow-termsExponential	0,011			1,898			0,995	0,0299	8,912E-4
Séchage à l'air libre	1	Newton	0,003						0,982	0,049	0,002
	2	Page	7,17E-4		1,259				0,991	0,037	0,001
	3	Modified Page	7,17E-4		1,259				0,992	0,036	0,001
	4	Henderson and Pabis	0,003			1,019			0,985	0,048	0,002
	5	Logarithmic	0,003			1,045		-0,0289	0,986	0,048	0,002
	6	Midilli-Kucuk	1,771E-4		1,493	0,95	-5,668E-8		0,995	0,0295	8,708E-4
	7	Approximation of Diffusion	0,006			-29,955	0,977		0,992	0,036	0,001
	8	Verma et al	0,003	8,451		0,001			0,983	0,051	0,003
	9	Two-Terms	0,003	0,003		0,51	0,5095		0,983	0,053	0,003
	10	Tow-termsExponential	0,005			1,783			0,991	0,036	0,001



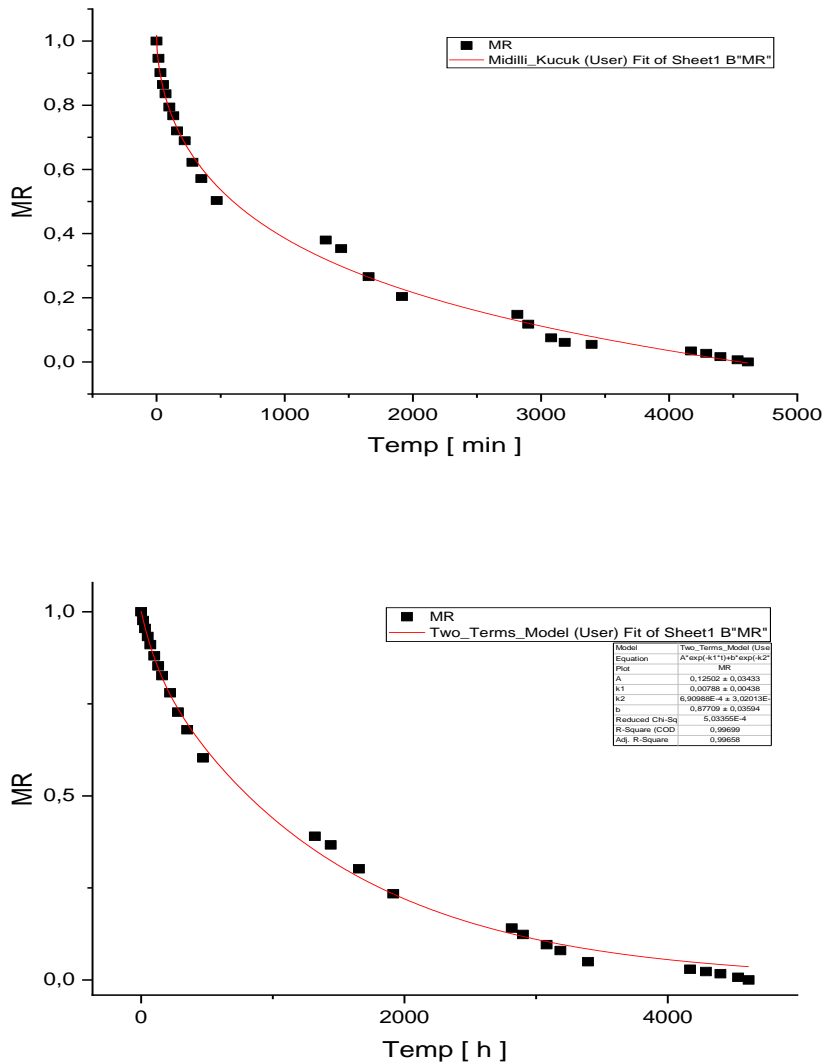
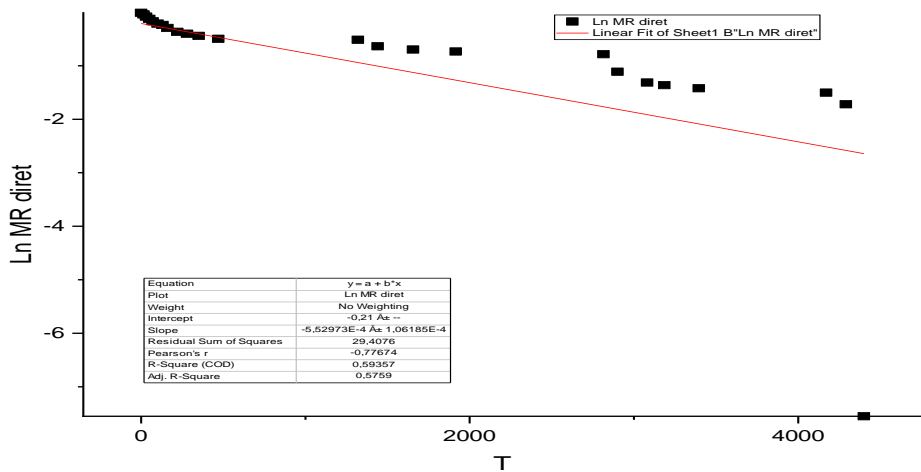
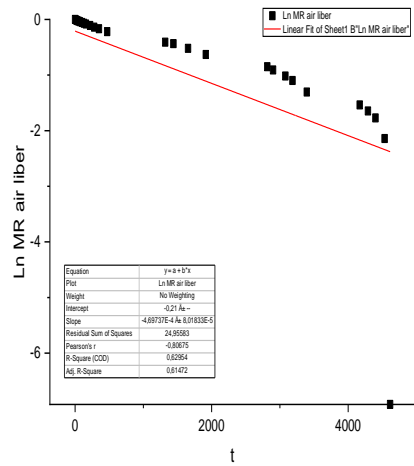
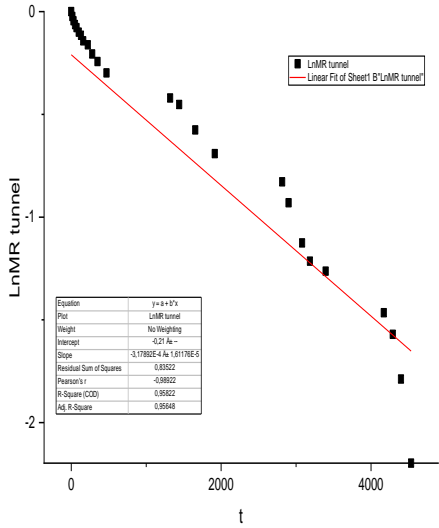


Figure IV.17 : Évolutions de la teneur en eau base sèche de la Menthe pouliot en fonction du temps (modèles empiriques et résultats obtenus expérimentalement).

IV.6 Détermination de la diffusivité effective de l’eau de la Menthe pouliot et de Moringa :

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

La linéarisation du premier terme de l'équation (eq III.12) permet la détermination de la diffusivité effective au moyen des droites qui représentent Ln (MR) en fonction du temps de séchage (t). D'après l'équation (eq III.13) la pente des droites présentées dans les figures VI.3 A,B,C,D est , avec L la demi épaisseur des échantillons de la Menthe pouliot et de Moringa.



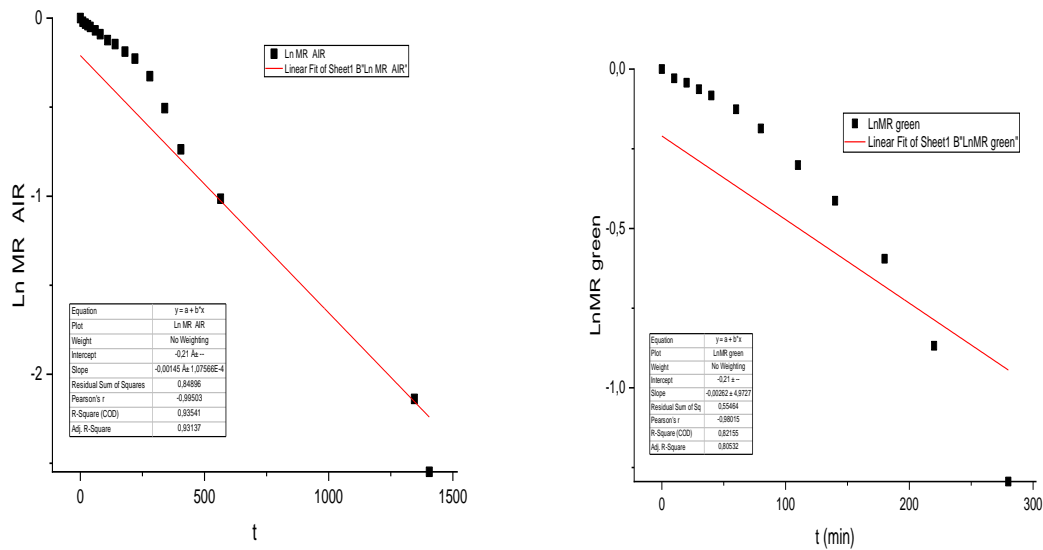


Figure IV.18 : Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de la menthe pouliot et de moringa.

Généralement, une diffusivité effective est utilisée en raison d'informations limitées sur le mécanisme du mouvement de l'humidité lors du séchage vu la complexité du processus. Les résultats sont présentés dans les Tableaux VI.1 et VI.2 pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives (D_{eff}) lors du séchage des échantillons de la menthe pouliot et de moringa ont varié de $1.0618664E-9$ à $5.876631E-10 m^2/s$ dans les deux prototypes de séchoir solaire direct de type serre tunnel et trapézoïdale et dans l'air libre.

Tableau VI.3. Résultats statistiques de la diffusivité effective déterminées par la méthode graphique lors du séchage des échantillons de la menthe pouliot

Procédés de séchage	Diffusivité	R^2	RMSE	σ^2
Serretapézoïdale	$2.241116E-10$	0,59357	1,13075	1,27859
Serre tunnel	$1.288368E-10$	0,95822	0,18655	0,0348
Air libre	$1.903773E-10$	0,62954	0,99912	0,99823

Tableau VI.4. Résultats statistiques de la diffusivité effective déterminées par la méthode graphique lors du séchage des échantillons de moringa.

Procédés de séchage	Diffusivité	R^2	RMSE	σ^2
Serre trapézoïdale	$1.0618664E-9$	0,82155	0,22455	0,05042
Air libre	$5.876631E-10$	0,93541	0,23035	0,05306



Conclusion générale et perspectives

IV.7 Conclusion générale et perspectives :

L'intégration des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible (roche) et latente (paraffine wax) dans le prototype de séchage solaire direct de type serre est réalisable. Le stockage d'énergie a réduit les fluctuations de la température de l'air pendant la période nuageuse.

L'étude expérimentale a été réalisée selon deux volets. Le premier est relatif à l'examinations des deux prototypes de séchoirs solaires direct de types serre tunnel et trapézoïdale (l'ancien et le nouveau prototype) avec différents système de stockage, afin de tester l'influence des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible et latente et toute modification rapportée. Le deuxième volet porte sur l'étude de la cinétique de séchage des échantillons de la menthe pouliot et de moringa dans des conditions météorologiques variables de la région de Ghardaïa. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de Master ne traite qu'une première étape dans l'étude des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible et latente intégrés dans le prototype de séchage solaire direct de type serre 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'amélioré les performances de prototype de séchage solaire direct de type serre. Des modifications de conception sont nécessaires pour maintenir la même température de séchage dans le séchoir durant la nuit. Une batterie de stockage d'énergie thermique serait utile de la couplée au prototype de séchoir solaire de type serre.

Enfin, une étude expérimentale combinée à la simulation numérique s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation du prototype de séchage solaire direct de type serre et de nous permet de mieux comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent au cours du séchage.



Références

- [1] Devan, P. K., Bibin, C., Shabrin, I. A., Gokulnath, R., & Karthick, D. (2020). Solar drying of fruits—A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 253-260.
- [2] Singh, S. K., Singh, B. R., Sengar, R. S., & Kumar, P. (2022). Development and effectiveness of greenhouse type solar dryer for coriander leaves. *Journal of Environmental Biology*, 43(1), 85-96.
- [2] Witzler, M., Alzagameem, A., Bergs, M., Khaldi-Hansen, B. E., Klein, S. E., Hielscher, D., ... & Schulze, M. (2018). Lignin-derived biomaterials for drug release and tissue engineering. *Molecules*, 23(8), 1885.
- [4] Ananno AA, Masud MH, Dabnichki P, Ahmed A. Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer for developing countries. *Sol Energy* 2020;196:270–86. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.069>.
- [5] Agrawal A, Sarviya RM. A review of research and development work on solar dryers with heat storage. *Int J Sustain Energy* 2016;35:583–605.
- [6] Lingayat AB, Chandramohan VP, Raju VRK, Meda V. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops—Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Appl Energy* 2020;258:114005.
- [7] Seveda MS. Design of a photovoltaic powered forced convection solar dryer in NEH region of India. *Int J Renew Energy Resour* 2013;3:906–12.
- [8] Amer BMA, Hossain MA, Gottschalk K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Convers Manag* 2010;51:813–20.
- [9] P. S. Chauhan et al. Applications of software in solar drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51(2015)1326–1337.
- [10] A. Sangamithra et al. An overview of a polyhouse dryer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 902–910.
- [11] V. Shringi, S. Kothari, N. L. Panwar. Experimental investigation of drying of garlic clove in solar dryer using phase change material as energy storage. *J Therm Anal Calorim* (2014) 118:533–539.
- [12] El Hage, H., Herez, A., Ramadan, M., Bazzi, H., & Khaled, M. (2018). An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. *Energy*, 157, 815-829.
- [13] Tiwari, A. (2016). A review on solar drying of agricultural produce. *Journal of Food Processing & Technology*, 7(9), 1-12.
- [14] Sharma, A., Chen, C. R., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1185-1210.
- [15] B. K. Bala and Nipa Debnath. Solar Drying Technology: Potentials and Developments. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2 (2012) 1-5.

- [16] F. Gulcimen, H. Karakaya, A. Durmus. Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable Energy* 93 (2016) 77-86.
- [17] Hii CL, Jangam SV, Ong SP, Mujumdar AS. *Solar drying: fundamentals, applications and innovations*. TPR Gr Publ Singapore; 2012.
- [18] Ogheneruona DE, Yusuf MOL. Design and fabrication of a direct natural convection solar dryer for tapioca. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011; 95–104.
- [19] Basunia MA, Abe T. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *J Food Eng* 2001;47:295–301.
- [20] Lingayat AB, Chandramohan VP, Raju VRK, Meda V. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops–Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Appl Energy* 2020;258:114005.
- [21] Lingayat, A. B., Chandramohan, V. P., Raju, V. R. K., & Meda, V. (2020). A review on indirect type solar dryers for agricultural crops–Dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy*, 258, 114005.
- [22] EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070.
- [23] Bal L.M, Satya S. et Naim S.N., Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010) 2298–2314.
- [24] Bal L.M., Satya S., Naik S.N. et Meda V., Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 876–880.
- [25] Goswami D. Yogi, Kreith F. et Kreider Jan F., *Principles of solar engineering – 2nd.*(1999)173-180.
- [26] Hussam Jouhara, Alina Zabnieńska-Góra, Navid Khordehghah, Darem Ahmad, and Tom Lipinski. Latent thermal energy storage technologies and applications : A review. *International Journal of Thermofluids*, 5-6 :100039, 2020.
- [27] Adèle Soupert-caron.2015, stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Génie des procédés. Université Grenoble alpes
- [28] Aumporn Orawan . Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. Université de perpignan via domitia. 7 décembre 2017 (e) (K1).

- [29] Thèse Elie TERZIBACHIAN. Modélisation dynamique d'un dispositif de stockage par chaleur sensible intégré à un système énergétique.2017.
- [30] Fabien Roget . Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. autre [cond-mat. other]. Université de Toulon, 2012. (f).
- [31] Soupart-Caron Adèle. Stockage de chaleur dans les matériaux a changement de phase. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Décembre 2015. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01266813>.
- [32] Abderrahmane Benhamza and Belkhir Settou. Simulation numérique d'un capteur solaire. Plan utilisant des matériaux a changement de phase. Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [33] Orawan Aumporn. Contribution a l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux a changement de phase. Thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2017. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01682984>.
- [34] Serge Blaise Ekomy Ango. Contribution au stockage d'energie thermique en bâtiment : développement d'un système actif `a matériaux a changement de phase. Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, 2011. URL <https://pastel.archivesouvertes.fr/pastel-00650275>. la rédaction s'est déroulée pendant la période du 01/03/2011au25/092011.
- [35] Rathod M.K. et Banerjee J., Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins, Applied Thermal Engineering,75 (2015) 1084-1092.
- [36] Samira Naderinezhad, Nasrin Etesami, Arefe Poormalek Najafabady, and Majid Ghasemi Falavarjani. Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. Food Science & Nutrition, 4(1) :110–118, 2016. doi : 10.1002/fsn3.258. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fsn3.258>.
- [37] Milos Vasic, Zagorka Radojevic, and Robert Rekecki. Mathematical modeling of isothermal drying and its potential application in the design of the industrial drying regimes of clay products. In Kuodi Jian, editor, Operations Research, chapter 5. IntechOpen, Rijeka, 2016. doi : 10.5772/64983. URL <https://doi.org/10.5772/64983>.
- [38] J. Crank. The Mathematics of Diffusion. Oxford science publications. Clarendon Press, 1979. ISBN 9780198534112. URL <https://books.google.fr/books?id=eHANhZwVouYC>