

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement
/...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'Automatique et Electromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme
Master
Domaine: Sciences et Technologies
Filière : Energies renouvelables
Spécialité: Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

**Conception, Réalisation et investigation expérimentale d'un
procédé de séchage solaire avec système de stockage
d'énergie thermique**

Présenté par :
OULAD BELKHIER Oussama
MOULAY BRAHIM Abdelbasset
Prénom et nom

Soutenu publiquement le...../...../.....

Devant le jury composé de:

Prénom et nom	Grade	Université	Président
Abdelouahab Benseddik	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadrant
Issam Hasrane	Doctorant	Université de Ouargla	Co-encadrant
Djemoui Lalmi	Maître de conférences A	Université de Ghardaïa	Examinateur
Fatiha Yettou	Derecteur de recherche	URAER. Ghardaïa	Examinateur

Année universitaire 2021 - 2022

Remerciement

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

*Ce travail a été possible grâce à plusieurs personnes qui se sont toutes investies Soit par leurs apports scientifiques soit par leurs encouragements et qu'il nous est agréable de leur exprimer en quelques lignes toutes nos reconnaissances. On tient à remercier notre professeur Monsieur de mémoire de master **Monsieur Abdelouahab BENSEDDIK**, pour l'honneur qu'il nous a fait en nous confiant ce travail et en acceptant de le codiriger dans le cadre de la convention de notre université et l'unité de recherche de Ghardaïa Nous exprimons également nos sincères remerciements et notre gratitude à "**Mahfoud BEN ABD RAHMANE**" "**issam hasrane**" "**Hocine BEN SAHA** et **Abd Elmajid BEN SAHA**" qui nous ont beaucoup aidés dans ce travail et Nous tenons à remercier l'équipe de laboratoire de systèmes énergétique pour l'agriculture à savoir **Ghania Hamdoune** et **Khadidja OULED HADJ YUCEF**, pour leurs assistance permanente et leurs efforts à notre égard afin de mettre terme à notre travail.*

Dédicace

*Je ne trouve aucun mot ou expression, qui
vont exprimer mes vifs*

sentiments de gratitude et remerciement :

❖ *A mes chers parents qui n'ont jamais
cessés de m'apporter tout ce dont j'ai
besoin pour réaliser ce travail et tout
au long de mon parcours éducatif,
ainsi que leur tendresse et leur
compréhension.*

❖ *A mes chérés frères
qui m'ont beaucoup aidé.*

❖ *A tous mes amis et à toute les
étudiant de Spécialité de Energie
Renouvelable.*

❖ *A toute l'équipe de URAER de
.Ghardaïa*

Oussama Oulad Belkhir

Dédicace

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

❖ *A mes chers parents qui n'ont jamais
cessés de m'apporter tout ce dont j'ai
besoin pour réaliser ce travail et tout
au long de mon parcours éducatif,
ainsi que leur tendresse et leur
compréhension.*

❖ *A mes chérés frères
qui m'ont beaucoup aidé.*

❖ *A tous mes amis et à tous les
étudiants de Spécialité de Energie
Renouvelable.*

❖ *A toute l'équipe de URAER de
Ghardaïa.*

Moulay brahim Abdelbasset

Résumé :

Le changement climatique a considérablement affecté nos modèles de production, affectant négativement la production agricole annuelle. Un processus de base dans l'industrie est le séchage des produits agricoles. Le séchage augmente la valeur et prolonge la durée de conservation des produits agricoles. Cependant, les technologies de séchage modernes dépendent encore des combustibles fossiles. Des technologies de séchage basées sur l'énergie solaire sont nécessaires pour contrer la dépendance aux combustibles fossiles. Outre la réduction de la consommation de carburant, les séchoirs solaires sont facilement adaptables aux communautés rurales qui dépendent fortement du processus de séchage. Des conceptions alternatives ont été proposées pour améliorer les performances des séchoirs solaires, intégrant notamment des systèmes de stockage d'énergie thermique. Un facteur limitant, cependant, est que la performance est limitée à la capacité de chauffage du système de stockage d'énergie thermique. Une étude précédente a examiné l'intégration du système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans un prototype de séchoir solaire indirect sans recirculation de l'air de séchage, indiquant une amélioration des performances. Une évaluation plus poussée de ce prototype de séchage solaire indirect avec recirculation de l'air de séchage et d'autres produits agricoles est nécessaire pour illustrer l'adaptabilité de la fonction hybride. Cette étude évalue donc les performances de prototype de séchage solaire avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air pour le séchage des feuilles de bettes et de moringa. Des comparaisons ont été faites avec d'autres combinaisons de conception comme référence. 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 des feuilles de bettes et de moringa. Les résultats ont montré que les modèles *Two-Terms*, *Midilli-Kucuk* et Diffusion Approximation étaient les plus adaptés pour décrire la cinétique de séchage des feuilles de bettes et de moringa dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect ainsi que pour le séchage solaire à air libre.

Mots-clefs : séchage de produits alimentaires, séchoir solaire indirect ; comportement thermique ; cinétique de séchage ; modèles empiriques ; diffusivité effective ; feuilles de bettes ; moringa.

Abstract:

Climate change has significantly affected our production patterns, negatively affecting annual agricultural production. A basic process in industry is the drying of agricultural products. Drying increases the value and extends the shelf life of agricultural products. However, modern drying technologies still depend on fossil fuels. Drying technologies based on solar energy are needed to counter the dependence on fossil fuels. Apart from reducing fuel consumption, solar dryers are easily adaptable to rural communities that are highly dependent on the drying process. Alternative designs have been proposed to improve the performance of solar dryers, including integrating thermal energy storage systems. A limiting factor, however, is that the performance is limited to the heating capacity of the thermal energy storage system. A previous study examined the integration of the latent heat thermal energy storage system into a prototype indirect solar dryer without recirculation of the drying air, indicating an improvement in performance. Further evaluation of this prototype of indirect solar drying with recirculation of drying air and other agricultural products is necessary to illustrate the adaptability of the hybrid function. This study therefore evaluates the performance of a solar drying prototype with a thermal energy storage system using latent heat and air recirculation for drying chard and moringa leaves. Comparisons were made with other design combinations as a reference. For the various tests carried out, the performance parameters retained for the evaluation included the water content, the drying kinetics and the effective diffusivity. Ten mathematical models were used to describe the drying kinetics of chard and moringa leaves. The results showed that the Two-Terms, Midilli-Kucuk and Diffusion Approximation models were the most suitable to describe the drying kinetics of chard and moringa leaves in the two prototypes of indirect solar dryer as well as for solar air drying. free.

Keywords: drying of food products, indirect solar dryer; thermal behavior; drying kinetics; empirical models; effective diffusivity; chard leaves; moringa.

ملخص:

لقد أثر تغير المناخ بشكل كبير على أنماط الإنتاج لدينا ، مما أثر سلبا على الإنتاج الزراعي السنوي. العملية الأساسية في الصناعة هي تجفيف المنتجات الزراعية. يزيد التجفيف من قيمة المنتجات الزراعية ويطيل عمرها الافتراضي. ومع ذلك ، لا تزال تقنيات التجفيف الحديثة تعتمد على الوقود الأحفوري. هناك حاجة لتقنيات التجفيف القائمة على الطاقة الشمسية لمواجهة الاعتماد على الوقود الأحفوري. بصرف النظر عن تقليل استهلاك الوقود ، فإن مجففات الطاقة الشمسية قابلة للتكيف بسهولة مع المجتمعات الريفية التي تعتمد بشكل كبير على عملية التجفيف. تم اقتراح تصميمات بديلة لتحسين أداء المجففات الشمسية ، بما في ذلك دمج أنظمة تخزين الطاقة الحرارية. ومع ذلك ، فإن العامل المقيد هو أن الأداء يقتصر على قدرة التسخين لنظام تخزين الطاقة الحرارية. فحصت دراسة سابقة تكامل نظام تخزين الطاقة الحرارية الكامنة في نموذج أولي لمجفف شمسي غير مباشر دون إعادة تدوير هواء التجفيف ، مما يشير إلى تحسن في الأداء. من الضروري إجراء مزيد من التقييم لهذا النموذج الأولي للتجفيف الشمسي غير المباشر مع إعادة تدوير هواء التجفيف والمنتجات الزراعية الأخرى لتوضيح قابلية التكيف للوظيفة الهجينة. تقوم هذه الدراسة بتقييم أداء النموذج الأولي للتجفيف الشمسي مع نظام تخزين الطاقة الحرارية باستخدام الحرارة الكامنة وإعادة تدوير الهواء لتجفيف أوراق السلق والمورينجا. تم إجراء مقارنات مع مجموعات التصميم الأخرى كمرجع. بالنسبة للاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها ، تضمنت معايير الأداء التي تم الاحتفاظ بها للتقييم محتوى الماء وحركية التجفيف والانتشار الفعال. تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف أوراق السلق والمورينجا. أوضحت النتائج أن نموذجي Midilli-Kucuk و Diffusion Approximation هما الأنسب لوصف حركية التجفيف لأوراق السلق والمورينجا في نموذجين أوليين من المجفف الشمسي غير المباشر وكذلك لتجفيف الهواء الشمسي.

الكلمات المفتاحية:

تجفيف المنتجات الغذائية ، المجفف الشمسي غير المباشر. السلوك الحراري حركية التجفيف نماذج تجريبية انتشار فعال أوراق السلق المورينجا.

Sommaire :

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités et état de l'art sur le séchage solaire	
I.1 Le Séchage.....	03
I.1.1 Définition	03
I.1.2 Pourquoi le séchage	03
I.1.3 Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire	03
a. Zone du littorale.....	03
b. Zone du tell.....	03
c. Zone des steppes	03
d. Zone saharienne.....	03
I.1.4 Séchage et énergie	04
I.1.5 Caractéristiques des solides humides.....	04
I.1.5.1. Humidité absolue	04
I.1.5.2. Humidité relative.....	05
I.1.5.3. Teneur en eau	05
I.1.5.4. Activité de l'eau dans un produit	06
I.2 Séchage des produits agricoles	07
I.2.1 Mode de séchage.....	07
I.2.2 Histoire du séchage solaire	07
I.3 Différents types de séchoirs solaires	08
I.3.1 Les séchoirs naturels	08
I.3.1.1 Avantages et inconvénients.....	08
I.3.2 Les séchoirs solaires directs.....	09
I.3.2.1 Principe de fonctionnement.....	09
I.3.2.2 Avantages et inconvénients	09
I.3.3 Séchoirs solaires indirects.....	10
I.3.3.1 Principe de fonctionnement	10
I.3.3.2 Avantages et inconvénients.....	10
I.3.4 Séchoirs hybrides	11
I.3.4.1 Avantages et inconvénients.....	11
I.3.5 Séchoirs solaires mixtes.....	12
I.4 Revue bibliographique.....	12
I.4.1 Convection naturelle	12
I.4.2 Configuration du séchoir solaire indirect à convection forcée	17
Chapitre II : Stockage thermique et matériaux à changement de phase	
II.1 Introduction	26
II.2 Le stockage thermique de l'énergie	26
II.2.1 Utilité du stockage thermique.....	27
II.2.2. Stockage thermique sensible	27
II.2.3. Stockage thermique latent	28
II.2.4 Stockage thermochimique	30
II.3 Matériaux à changement de phase	30

II.3.1	Définition.....	30
II.3.2	Principe de fonctionnement du PCM	31
II.3.3	Critère de sélection d'un bon MCP	32
II.3.4	Propriétés d'un MCP	32
	a- Propriétés thermiques	32
	b- Propriétés physiques.....	32
	c- Propriétés chimiques	33
	d- Propriétés économiques	33
II.3.5	Classifications des MCP.....	33
	II.3.5.1 Les composés organiques	34
	a- Paraffines	35
	II.3.5.2 Les composés inorganiques	37
	a. Hydrates de sels	37
	b. Métaux	37
	c. Les eutectiques.....	38
	d. PCM commerciaux.....	39

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1	Matériels au champ expérimental de l'URAER	42
	III.1.1 Description du prototype expérimental.....	42
	III.1.2 Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins).....	42
	III.1.3 Capteur solaire à air avec cannettes	43
	III.1.4 La chambre de séchage	44
	III.1.5 Modification du séchoir solaire.....	45
	III.1.6 Instrumentation des prototypes	45
	III. 1.6.1 Mesure des températures	45
	III. 1.6.2 Mesure de rayonnement solaire.....	47
	III. 1.6.3 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage	47
	III.1.7 Acquisition et traitement des données.....	48
III.2	Matériel de laboratoire de l'URAER	48
	a- Dessiccateur.....	48
	b- Etuve	49
	c- Balance	50
	d- Agitateur magnétique Chauffant	50
	e- Bêchers	50
III.3	Matériel végétal	51
	a- La bette	51
	b- La moringa	51
III.4	Protocole de séchage.....	52
	III.4.1 Préparation de l'échantillon bette.....	52
	III.4.2. Préparation de l'échantillon de la moringa	54
	III.4.3. Détermination de la teneur en eau initiale.....	56
	III.4.4 Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel.....	57

III.4.5. Préparation de matériaux à changement de phase paraffine	58
III.5 Modélisation des cinétiques de séchage	59
III.6 Détermination expérimentale de la diffusivité effective de l'eau dans le produit	61
Chapitre IV: Résultats et discussions	
IV.1 Résultats et discussion	62
IV.1.2 Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire.....	62
IV.1.2.1. Test N°01	63
IV.1.2.1. Test N°02	70
IV.1.3 Séchage des feuilles de bettes et de moringa dans les deux prototypes.....	76
IV.1.3.1 Cinétique de séchage des feuilles de moringa le 03 Mars 2020.....	76
IV.1.3.2 Cinétique de séchage des feuilles de bettes le 03 Mars 2020.....	77
IV.1.4 Modélisations empiriques du processus de séchage en couche mince	78
IV.1.5 Modélisation mathématique des cinétiques de séchage.....	82
IV.1.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau des feuilles... ..	84
Conclusion générale et perspectives	87

Liste des figures

Fig.(I.1) : Description du solide humide.....	04
Fig. (I.2) : Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau.....	07
Fig. (I.3) : Schéma du séchage solaire en plein air.....	08
Fig. (I.4) : Principe d'un séchoir solaire direct.....	09
Fig. (I.5) : Le principe d'un séchoir solaire indirect.....	10
Fig. (I.6) : Séchoir solaire hybride.....	11
Fig. (I.7) : Principe d'un séchoir solaire mixte.....	12
Fig. (I.8) : Photographie d'un réchauffeur d'air solaire.....	13
Fig. (I.9) : Vue schématique du séchoir solaire construit à convection naturelle indirecte.....	13
Fig. (I.10) : Détails en coupe du séchoir solaire à convection naturelle.....	14
Fig. (I.11) : Séchoir solaire et deux panneaux de réflexion solaire.....	15
Fig. (I.12) : Vue schématique de la configuration expérimentale.....	15
Fig. (I.13) : Capteur solaire en construction.....	16
Fig. (I.14) : Séchoir solaire indirect.....	17
Fig. (I.15) : Section transversale du capteur de chaleur solaire.....	17
Fig. (I.16) : Vue latérale du séchoir et vue de face des panneaux collecteurs.....	18
Fig. (I.17) : Expérimentation du séchoir solaire indirect à convection forcée.....	18
Fig. (I.18) : Diagramme schématique du capteur solaire et du séchoir.....	19
Fig. (I.19) : Photographie du capteur solaire et du séchoir.....	19
Fig. (I.20) : Schéma du séchoir solaire du concon à convection forcée.....	19
Fig. (I.21) : Diagramme schématique de l'expérimentation.....	20
Fig. (I.22) : Photo of an indirect active hybrid solar–electrical dryer.....	20
Fig. (I.23) : Armoire de séchage assistée par l'énergie solaire.....	21
Fig. (I.24) : Un schéma du dispositif expérimental.....	22
Fig. (I.25) : Vue schématique de SAHSHPD.....	22
Fig. (I.26) : Vue photographique de SAHSHPD.....	23
Fig. (I.27) : a) Chambre intérieure, b) Bords de direction à l'eau, c) Configuration du séchoir.....	23
Fig. (I.28) : Photographie de séchoir solaire.....	24
Fig. (I.29) : Vue de la configuration du séchoir solaire mixte.....	24
Fig. (I.30) : Schéma du système de séchage.....	25
Fig. (II.1) : Différents types de stockage de chaleur.....	27
Fig. (II.2) : Diagramme de changement d'état d'un matériau.....	29
Fig. (II.3) : Liquéfaction et solidification du MCP.....	31
Fig. (II.4) : Principes de fonctionnement de PCM.....	32
Fig. (II.5) : Classification détaillée sur les substances.....	33
Fig. (III.1) : Dessine technique des composants du capteur *S*.....	42
Fig. (III.2) : Capteurs solaires avec chicanes.....	43
Fig. (III.3) : Capteur solaire avec cannetes.....	43
Fig. (III.4) : Capteurs solaires avec cannettes et avec chicanes.....	44
Fig. (III.5) : Photographie de la chambre de séchage (frig).....	44
Fig. (III.6) : Avant modification.....	45
Fig. (III.7) : Après modification.....	45
Fig. (III.8) : Position des thermocouples dans l'isolateur (avec chicanes et avec cannettes).....	46
Fig. (III.9) : Position des thermocouples dans la chambre de séchage.....	46
Fig. (III.11) : Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement.....	47
Fig. (III.12) : Anemometer Testo 440 + thermo-hygromètre Testo 610.....	48
Fig. (III.13) : Photographie de système d'acquisition et de traitement des données.....	48
Fig. (III.14) : Photographies de dessiccateur utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale.....	49
Fig. (III.15) : Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche.....	49
Fig. (III.16) : Balance KERN ABT 220-4M: 220g/0,1m.....	50

Fig. (III.17) : Balance KERN PCB 3500-2: 3500g/.....	50
Fig. (III.18) : Becher utilisé au laboratoire	50
Fig. (III.19) : La bette.....	51
Fig. (III.20) : La moringa	52
Fig. (III.21) : Préparation de la bette au laboratoire.....	53
Fig. (III.22) : Quantités de bette à séchée dans le séchoir	53
Fig. (III.23) : Schéma représentant le protocole de séchage de la bette.....	54
Fig. (III.24) : Préparation de la moringa au laboratoire	55
Fig. (III.25) : Quantités de moringa à séchée dans la chambre de séchage	55
Fig. (III.26) : Schéma représentant le protocole de séchage de la moringa	56
Fig. (III.27) : Pesé de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (391g).....	57
Fig. (III.28) : Pesé de l'eau (200g).....	57
Fig. (III.29) : Mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau	58
Fig. (III.30) : Matériau préparé pour le stockage de l'énergie	58
Fig. (III.31) : Paraffine solide	59
Fig. (III.32) : Dégivrer paraffine Verser dans les Cannelles	59
Fig. (IV.1) : Photographie de la plate-forme d'expérience de séchage à l'URAER.....	62
Fig. (IV.2) : Prototypes de séchoir solaire indirect.....	63
Fig. (IV.3) : différentes positions des thermocouples dans les prototypes.....	64
Fig. (IV.4) : Evolution des températures.....	66
Fig. (IV.5) : Evolution des températures.....	67
Fig. (IV.6) : Evolution des températures.....	69
Fig. (IV.7) : Prototypes de séchoir solaire indirect.....	70
Fig. (IV.8) : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire	71
Fig. (IV.9) : Evolution des températures.....	73
Fig. (IV.10) : Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27.....	74
Fig. (IV.11): Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27.....	76
Fig. (IV.12) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les feuilles de moringa.....	77
Fig. (IV.13) : Vue photographique d'échantillons des feuilles de bettes et de moringa frais.....	77
Fig. (IV.14) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les feuilles de bettes.....	78
Fig. (IV.15) : Teneur en eau réduite (MR) versus le temps de séchage	84
Fig. (IV.12) : Logarithme de la teneur en eau réduite (Ln (MR)).....	85

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Matériaux utilisés dans le stockage sensible	28
Tableau II.2 : Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente	30
Tableau II.3 : Les avantages et les inconvénients des types de changement de phase	31
Tableau II.4 : Diffèrent PCM pour Métaux	37
Tableau II.5 : Diffèrent PCM pour Les eutectiques	38
Tableau II.6 : Diffèrent PCM commerciaux	39
Tableau III.1 : Températures des fusions des Matériaux obtenus et $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58
Tableau III.2 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces.....	60
Tableau IV.1 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles	79
Tableau IV.2 : Résultats statistiques	80

NOMENCLATURE

Ac: surface de captation de l'insolateur plan à air m^2

Aw: activité en eau -

Cpb: Chaleur massique du bois, $Cpb = 2300 J/kg \cdot K$

Cp: Chaleur massique de l'air libre, $Cp = 1005 J/kg \cdot K$

M: Teneur en eau (base sèche) $kg \text{ eau}/kg \text{ MS}$

Mh: Teneur en eau (base humide) $kg \text{ eau}/kg \text{ Mh}$

Pvp: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

Pv: pression partielle de vapeur saturante (Pa)

H: enthalpies du matériau J

Deff: la diffusivité effective m^2/s

HR =MR: humidité relative de l'air (%)

(initiale): masse de l'échantillon avant mise à l'étuve g

(finale): masse de l'échantillon après mise à l'étuve g

Qu: l'énergie utile emportée par le fluide caloporteur W

η : rendement thermique de l'insolateur %

W: tenure en humidité absolue de l'air $kg \text{ vap}/kg \text{ as}$

W: humidité absolue du produit à l'instant t à base humide $kg \text{ eau}/kg \text{ Mh}$

Mt: humidité absolue du produit à l'instant t à base sèche $kg \text{ eau}/kg \text{ MS}$

Me: humidité absolue du produit initiale à base sèche $kg \text{ eau}/kg \text{ MS}$

MReq : humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche $kg \text{ eau}/kg \text{ MS}$

TE: Température d'entrée au capteur (K)

TS: Température de sortie du capteur (K)

I: Puissance solaire incidente (W/m^2)

E: coefficient de transmissivité pour le vitrage. ($E = 87\%$)

ΔT : la variation de température K

X: Humidité Absolue de L'air $kg \text{ eau}$

$/kg \text{ air sec}$

p_v: Pression partielle de vapeur d'eau [Pa]

P: Pression totale de l'air humide, $P_{atm}=10130$ [Pa]

Lettre grecques

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

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

RMSE : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

χ² : khicarré réduit

R² :

N : nombre d'observations

n : nombre de constantes du modèle

t : le temps s

L : la demi d'épaisseur de la tranche

Introduction générale

Introduction générale :

L'industrie agricole est importante pour la survie et le développement humains. La durabilité est importante pour que l'industrie se développe simultanément tout en garantissant des futures ressources pour la population croissante. Cependant, le changement climatique a eu un impact négatif sur la production agricole annuelle. La durabilité agricole est en déclin depuis la dernière décennie [1]. De plus, l'industrie est encore fortement dépendante des énergies fossiles. Un processus important dans l'industrie agricole est le séchage en raison de sa capacité à augmenter la valeur des produits agricoles tout au long de la chaîne d'approvisionnement avec une durée de conservation accrue [2]. Cependant, le processus est intensif sur la consommation d'énergie. L'amélioration de l'efficacité énergétique du processus de séchage aura un impact significatif sur la durabilité de l'industrie agricole.

La plupart des systèmes de séchage modernes ne possèdent pas de caractéristiques durables en raison des besoins élevés en combustibles fossiles. Ils sont fortement dépendants de l'accès au réseau, limitant ainsi son adoption aux zones rurales des pays en développement [3]. Comme solution alternative, le séchage solaire peut être envisagé pour atténuer les besoins en combustibles fossiles et découpler la dépendance au réseau. Le séchage au soleil en plein air est une technique populaire dans les zones rurales en raison de son faible coût et de sa facilité d'utilisation. La technique est une méthode bien reconnue comme une méthode traditionnelle parmi la communauté rurale [4]. Cependant, la méthode, manque de débit d'air et de contrôle du système, ce qui entraîne des conséquences imprévues. Le séchage au soleil à l'air libre est vulnérable aux dommages causés aux produits par les ravageurs, à la dégradation des produits due à l'exposition directe au soleil et à la pluie et à la contamination des produits par la pollution de l'air. Alternative au séchage au soleil à ciel ouvert, les séchoirs solaires peuvent agir comme un substitut. La technologie est facilement adoptable en raison de sa simplicité d'utilisation et de son faible coût. Le séchoir solaire, contrairement au séchage solaire ouvert, possède un système de chambre fermée pour isoler les produits agricoles séchée aux conditions environnementales extérieures. L'énergie solaire est la principale force motrice du processus de séchage, dissociant ainsi la technologie de l'utilisation des combustibles fossiles et de la dépendance au réseau. Le fonctionnement peut être effectué par un flux d'air naturel ou forcé [3]. Cependant, la technologie en elle-même est confrontée à des limites. Des fonctionnalités supplémentaires sont souvent implémentées pour améliorer les performances. Il existe une variété de caractéristiques dans la conception et l'amélioration du séchoir solaire. Le travail de [3] a fait un examen des différentes fonctionnalités supplémentaires dans lesquelles le stockage d'énergie thermique est l'une des fonctionnalités identifiées améliorant considérablement les performances du séchoir. Les matériaux de stockage d'énergie thermique sont des substances qui peuvent stocker la chaleur par absorption et libérer de la chaleur si nécessaire, aidant le séchoir solaire à fonctionner efficacement même en cas d'irrégularités de la disponibilité solaire [4]. De plus, la fonction peut également améliorer le fonctionnement du séchoir solaire pendant la période nocturne [5]. Il existe de nombreux types de matériaux de stockage d'énergie thermique et l'un des plus populaires est les matériaux à changement de phase (MCP). Les MCP sont attrayants en raison de leurs grandes capacités à absorber de la chaleur et ne nécessitent pas d'apports externes. Des travaux antérieurs révèlent l'application de cette caractéristique parmi différentes produits agricoles, notamment les figes [6], les raisins [7] et les fèves de cacao [8]. Une autre caractéristique identifiée est la recirculation où le flux d'air de l'échappement est réintroduit dans le système, utilisant ainsi la chaleur perdue. La mise en œuvre de cette fonctionnalité améliore l'efficacité énergétique du séchoir solaire.

Un cas a indiqué que 70 % d'économies d'énergie sont réalisables avec la recirculation [9], tandis qu'un autre a indiqué une augmentation de l'efficacité du séchoir solaire lorsque 65 % de l'air est recirculé [10]. Un autre cas a indiqué que l'air recyclé n'améliore pas seulement les économies d'énergie mais améliore la qualité du produit séché [12]. Le facteur limitant dans le fonctionnement d'un séchoir solaire assisté par un système de stockage d'énergie thermique est la capacité thermique finie du système de stockage d'énergie thermique. Le couplage de cette conception avec la recirculation a le potentiel d'améliorer les performances et les économies d'énergie du séchoir solaire. L'air recyclé réduit le dégagement thermique du PCM, augmentant ainsi la longévité de la capacité thermique. Les deux caractéristiques ont le potentiel d'inhiber une relation complémentaire améliorant considérablement les performances globales. La revue de la littérature révèle qu'une seule étude a intégré un tel système. Les travaux de [13] ont conçu un séchoir solaire hybride avec PCM et IE recirculé, testant le taux de recirculation de 70% à 80% pour le séchage des champignons. Leurs découvertes révèlent qu'un taux de recirculation plus faible fournit de meilleurs champignons séchés. Compte tenu du potentiel de la conception hybride, une enquête plus approfondie sur la compatibilité avec d'autres produits agricoles est nécessaire.

Cette étude porte sur l'évaluation de l'approche hybride pour le séchage des feuilles de bettes et de moringa. L'étude de la compatibilité du séchoir solaire hybride pour le séchage des feuilles de bettes et de moringa aidera à identifier les éléments clés de l'adoption technologique pour la communauté rurale locale. Cette étude vise à étudier les performances du séchoir solaire indirect des feuilles de bettes et de moringa avec système de stockage d'énergie thermique et recirculation d'air. 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. 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 prototype, la configuration expérimentale du prototype de séchoir solaire indirect et l'évaluation effectuée. Le chapitre 4 discute des résultats de l'expérience.

Chapitre I : Généralités et état de l'art sur le séchage solaire

I.1 Le Séchage :

I.1.1. Définition :

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année) L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.[14]

I.1.2. Pourquoi le séchage ?

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

- Améliorer la conservation des produits,
- Faciliter leur transport,
- Réduire les risques de pertes de produits après récolte
- Elargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année. [15]

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

Une étude du climat Algérien a été effectuée par H. Rebour et A. Hauville (1954), permet de visualiser les vocations climatiques et les zones les plus favorables au séchage solaire naturelles des principaux fruits. Selon cette étude, la variabilité des conditions climatiques permet de limiter les différentes zones et leurs aptitudes au séchage de raisin [16]

a. Zone du littorale :

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

b. Zone du tell :

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

c. Zone des steppes :

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

d. Zone saharienne :

Le séchage solaire du raisin peut s'effectuer dans les meilleures conditions en raison des contraintes hybrides enlevées. [Le séchage se poursuit même la nuit. H. Rebour et A. Hauville, (1954)], ont conclu que la région de Laghouat, situé entre le Sahara et les steppes, présente les mêmes conditions

que celles de Fresno (en Californie) ou se situe le plus grand centre mondial de séchage solaire des fruits.

I.1.4. Séchage et énergie :

Afin de sécher un produit, liquide ou solide, il faut fournir de la chaleur, de l'énergie. Globalement on considère que les opérations de séchage consomment environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés. Cette part est importante et il faut essayer de trouver les moyens d'optimiser les procédés dans une démarche économique mais aussi écologique. Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau. Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique : certaines structures ou molécules retiennent l'eau plus que d'autres, alors lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de "libre". Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure et lui suffit d'environ 2250 kJ/kg pour la vaporiser. Par contre lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de "liée" et l'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie [17]

I.1.5. Caractéristiques des solides humides:

Avant le séchage, un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la **figure1.1**. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. [18]

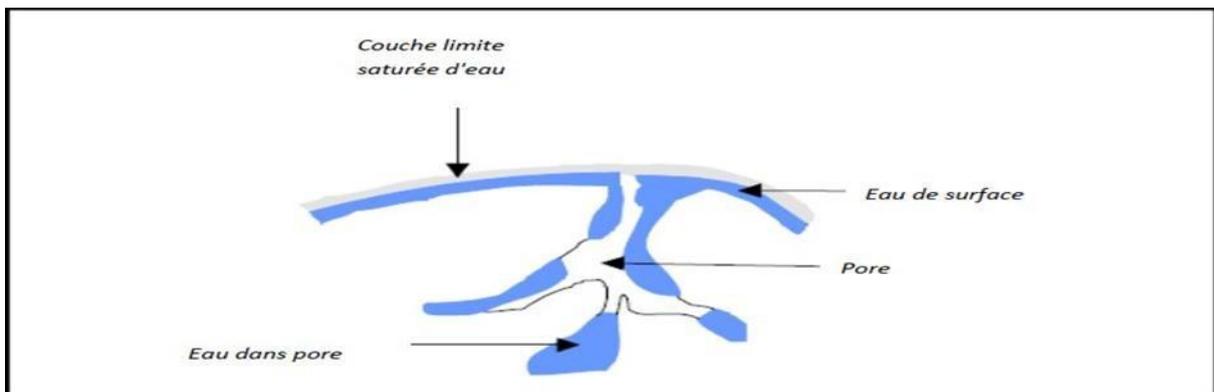


Fig.(I.1) : Description du solide humide[18].

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

Humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [18].

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

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

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

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

Les deux grandeurs sont liées par les relations [20]:

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

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

I.1.5.3. Teneur en eau :

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

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

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

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

•Teneur en eau (base humide) :

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

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

I.1.5.4. Activité de l'eau dans un produit :

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

Elle est définie comme suit :

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

Avec:

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

L'activité de l'eau (A_w) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique. L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique, La FigI.2 illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des denrées alimentaires (M. Belahmidi, & al., 1993, J. J. Bimbenet, & al., 1984, T.)

P. Labuza, (1968), Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit :

- Pour $A_w < 0,9$, la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ; Pour $A_w < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives
- Pour $A_w < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée
- Pour $0,8 < A_w < 0,7$, les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.
- La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_w comprises entre 0,25 et 0,35 [19].

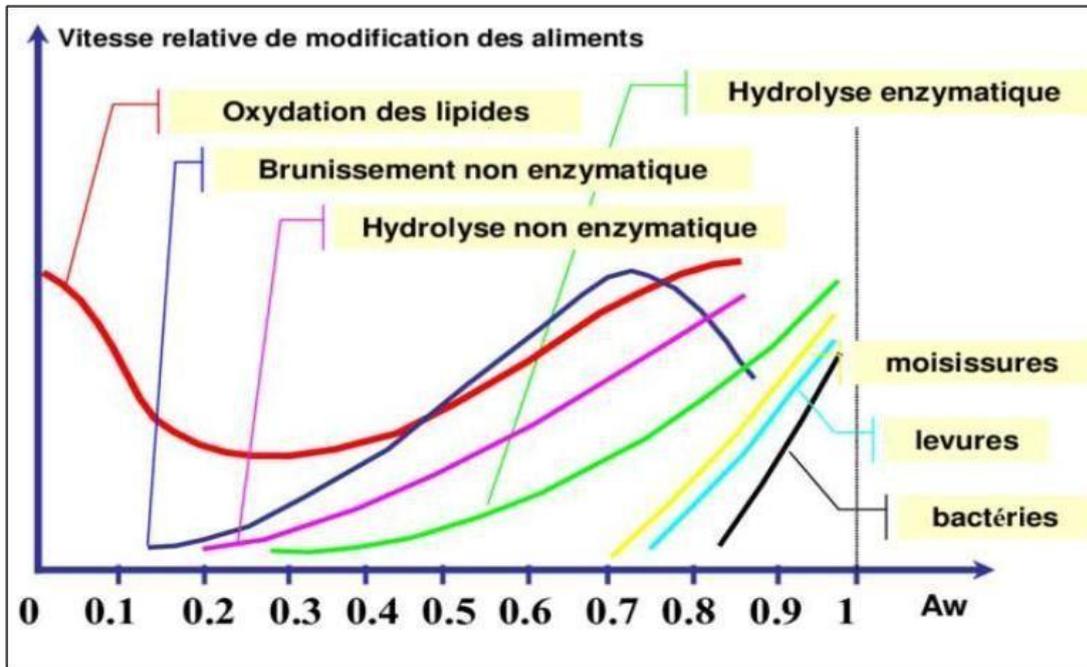


Fig.(I.2) : Vitesse de détériorations des aliments en fonction de l'activité de l'eau[19].

I.2. Séchage des produits agricoles :

I.2.1. Mode de séchage:

On peut distinguer divers procédés de séchage [20]:

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

Diverses méthodes de chauffage peuvent également être utilisées:

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

Le procédé de séchage par convection, appelé aussi par entraînement, est plus répandu et fait l'objet de notre étude. [20]

I.2.2 Histoire du séchage solaire :

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes utilisées depuis les temps préhistoriques pour conserver et conserver les aliments tels que la viande, les légumes, le poisson, les fruits, etc..... et c'est en utilisant l'énergie solaire comme en énergie thermique disponible pour le séchage et la

conservation de tous les nutriments nécessaires à la séparation. , le séchage des briques de terre pour leurs maisons et des peaux d'animaux.

I.3 Différents types de séchoirs solaires :

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects [SECAAR]. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcée, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs [21]

I.3.1 Les séchoirs naturels:

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (figure III.3).

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières) [22]

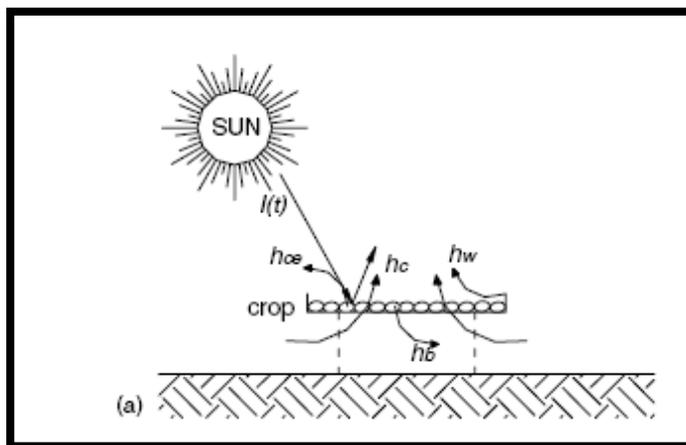


Fig.(I.3) : Schéma du séchage solaire en plein air[22]

I.3.1.1 Avantages et inconvénients.

- **Avantage :**
 - Plus besoin d'utiliser des machines pour générer la chaleur nécessaire au séchage.

- Faibles coûts de production car il ne nécessite pas beaucoup de soin ou d'expérience et une étude technique élevée pour sa facilité de réalisation et de production.
- Il n'y a pas besoin de gros capitaux et l'agriculteur ordinaire peut le faire.
- **Inconvénients :**
 - La méthode ne permet pas de descendre sous 13 à 17 % d'humidité
 - L'immobilisation du stock de bois est longue dans le temps.
 - Il y a des risques d'attaque du bois par des insectes et champignons.

1.3.2 Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception du séchoir coffre à plateau adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

1.3.2.1 Principe de fonctionnement :

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent, sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) [22]

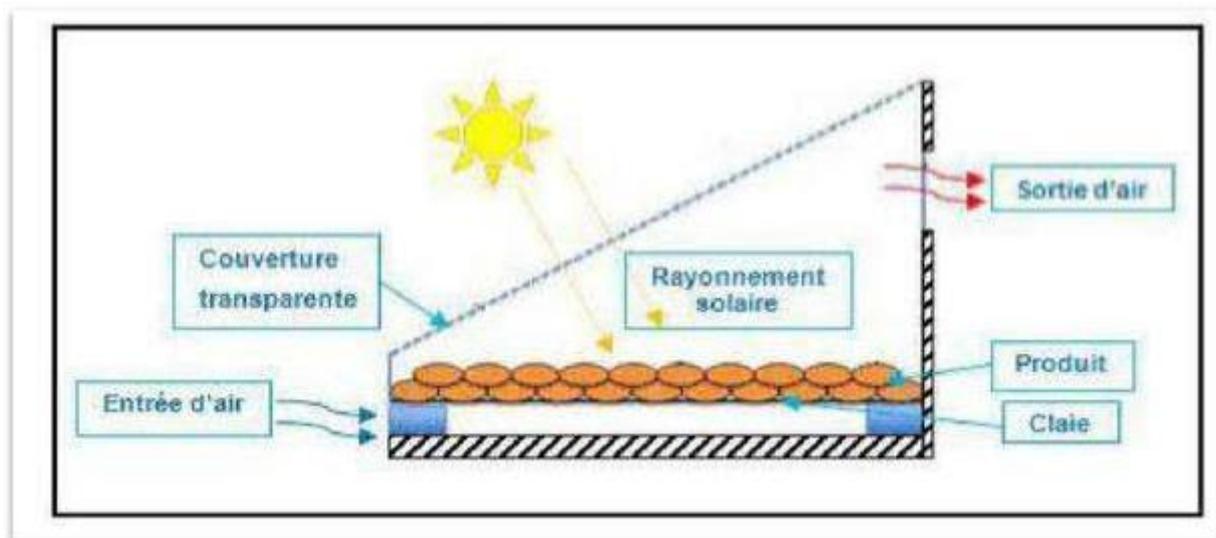


Fig.(I.4) : Principe d'un séchoir solaire direct. [23]

1.3.2.2 Avantages et inconvénients :

- **Avantage :**
 - Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
 - Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
 - Grandes possibilités de conception.

- **Inconvénients :**

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments

I.3.3 Séchoirs solaires indirects :

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive [22]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

I.3.3.1 Principe de fonctionnement : Le séchoir solaire indirect se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure I.5). L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [23].

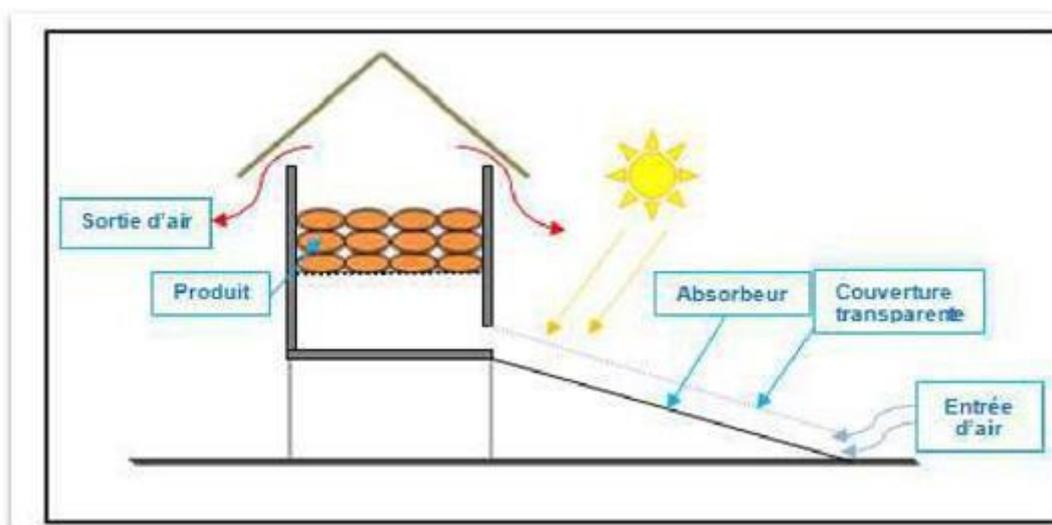


Fig.(I.5) : Le principe d'un séchoir solaire indirect . [23]

I.3.3.2 Avantages et inconvénients :

- **Avantage :**

Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).

Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit

Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles **Inconvénient :**

Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

I.3.4 Séchoirs hybrides :

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, gaz, ...etc.), l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [23] : Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air. Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

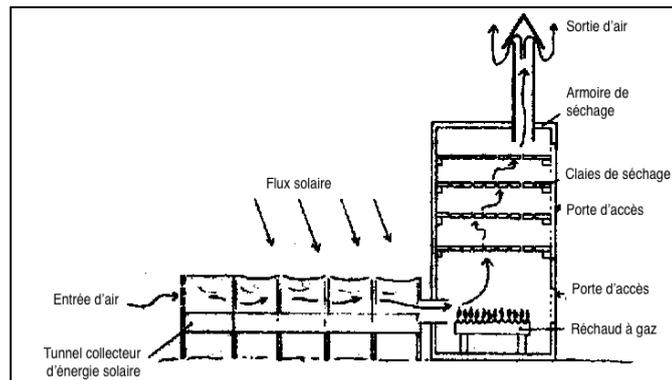


Fig.(I.6) : Séchoir solaire hybride. [22]

I.3.4.1 Avantages et inconvénients :

- **Avantages :**
 - Meilleur contrôle de séchage
 - Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.
- **Inconvénients :**
 - Coût de production et d'investissement élevé
 - Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange, personnel qualifié pour la maintenance.

I.3.5 Séchoir solaire mixte

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires directes sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents[23].

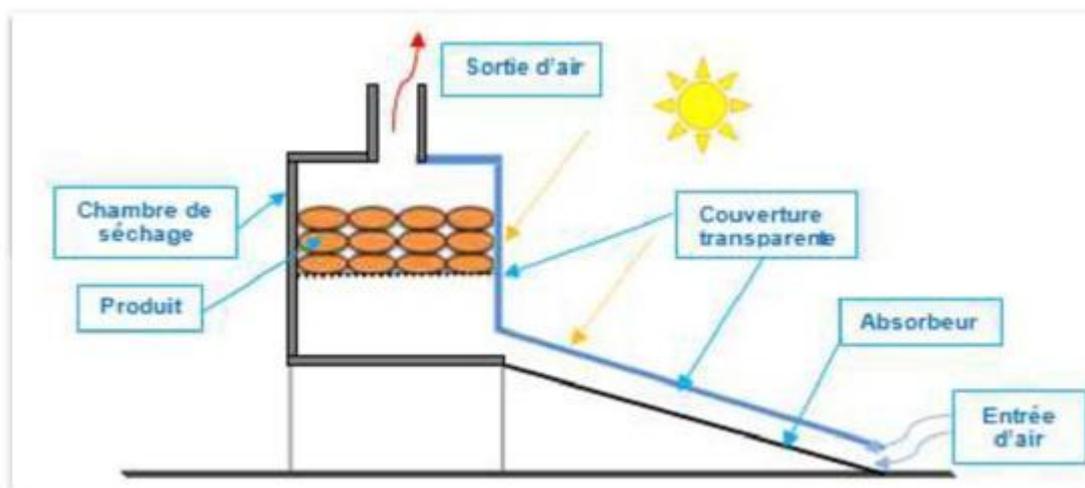


Fig.(I.7) : principe d'un séchoir solaire mixte [23].

I.4 Revue bibliographique :

Dans cette section, nous présentons une recherche bibliographique sur les séchoirs solaires indirects :

I.4.1 Convection naturelle :

Parikh et Agrawal., 2011 [24] ont effectué les expériences et analysé le séchoir d'armoire à double étagère attaché avec un collecteur à plaques plates à Jaipur, en Inde. L'analyse a été effectuée pour des piments verts (*Capsicum annuum*) et des chips de pomme de terre (*S. tuberosum*). Des feuilles de verre et de polycarbonate ont été utilisées comme couverture de vitrage pour améliorer l'efficacité du séchage. Pour le cas du vitrage en verre comme feuille de couverture, l'efficacité a augmenté de [9%- 12%] à 23,7% ; cependant elle a atteint 18,5% en utilisant une feuille de polycarbonate. Par conséquent, le temps de séchage a considérablement diminué.



Fig.(I.8) : Photographie d'un réchauffeur d'air solaire, d'un séchoir d'armoire et de deux cadres de vitrage [24]

Maiti et al,2011.,[25] ont conçu, développé et testé un séchoir solaire ITSD (indirect type solar dryer)(convection naturelle) fixé avec des réflecteurs. Il a été rapporté que lors de l'utilisation d'un réflecteur, l'efficacité du capteur est passée de 40% à 58,5% sans condition de charge pendant les valeurs maximales de l'irradiation solaire au mois de janvier à Bhavnagar, Gujarat (Inde). Le système a été utilisé pour sécher une gaufrette indienne populaire appelée « Papad ». 1 kg de papad a été séché d'une teneur en humidité initiale de 4,88% à une teneur en humidité finale de 12% (en base humide) avec une efficacité de séchage de 4,12%.



Fig.(I.9) : Vue schématique du séchoir solaire construit à convection naturelle indirecte (toutes dimensions en cm) et b) photographie de l'ensemble réel du séchoir[25]

Pangavhane et al, 2002 [26] ont développé un séchoir solaire indirect à circulation naturelle qui se compose d'un capteur solaire à air et d'une chambre de séchage pour le séchage du raisin. La configuration du capteur consistait en une plaque absorbante avec une ailette peinte en noir, un collecteur en verre et l'isolation nécessaire en bas. Des ondulations en forme de U ont été placées sur l'absorbeur parallèlement à la direction du flux d'air pour améliorer le transfert de chaleur. La face

inférieure de la plaque absorbante a été équipée d'ailettes en aluminium (0,15 mm d'épaisseur) pour créer plus de turbulences dans le flux d'air, de sorte qu'une quantité maximale de chaleur puisse être transférée à l'air. À l'entrée du collecteur, des plaques d'obturation de 4 mm d'épaisseur et de 0,08 m × 0,4 m ont été utilisées pour limiter le flux d'air pendant la nuit afin d'éviter le séchage en raison d'une humidité relative plus élevée. L'ensemble de l'unité a été placé dans une boîte en tôle de fer galvanisée (0,9 mm d'épaisseur). Une réduction de 43 % du temps de séchage a été observée par rapport à la méthode de séchage de soleil ouvert. L'ombrage traditionnel et la méthode de séchage au soleil ouvert prennent respectivement 15 et 7 jours, tandis que le séchoir indirect à circulation naturelle polyvalent prend 4 jours à fin d'obtenir des raisins secs de bonne qualité.

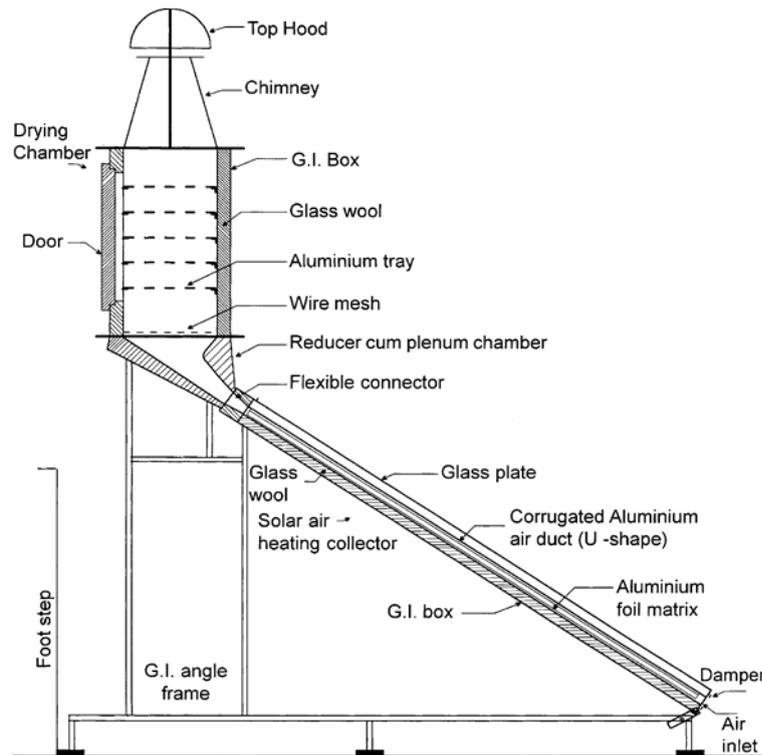


Fig.(I.10) : Détails en coupe du séchoir solaire à convection naturelle [26]

Stiling et al. 2012.,[27] ont développé une configuration pour le séchage des tomates Roma. L'installation a été construite avec et sans les panneaux solaires à concentration (CSP). Les résultats ont montré que le séchoir avec CSP avait une température supérieure de 10 °C et une vitesse de séchage 7,4 % plus rapide que le séchoir sans CSP .



Fig.(I.11) : Séchoir solaire et deux panneaux de réflexion solaire à concentration utilisés dans des expériences de séchage. L'instrumentation d'enregistrement des données pour les capteurs est située sur la table basse [27]

Abhay et al., 2017 [28] ont développé un séchoir solaire indirect pour le séchage des récoltes. Il se composait d'un capteur solaire à air, d'une chambre de séchage et d'une cheminée. La plaque plate du capteur solaire était équipée d'une plaque absorbante rugueuse en forme de V. La chambre de séchage était munie de quatre plateaux aux même distance l'un au-dessus de l'autre. Des expériences ont été réalisées sur la banane pour analyser ses caractéristiques de séchage. La banane a été séchée d'une teneur en humidité initiale de 78 % à une teneur en humidité finale de 14,04 %, 16,31%, 17,46 %, 23,76 % et 29,76 % (base humide) aux plateaux 1, 2, 3, 4 et au séchage au soleil ouvert, respectivement. Ils ont estimé les rendements thermiques moyens de la chambre de séchage et du capteur solaire et ceux-ci étaient: 22,38% et 31,50%, respectivement. Il a été observé que la température de l'air de séchage était le facteur le plus influent pendant l'opération de séchage.

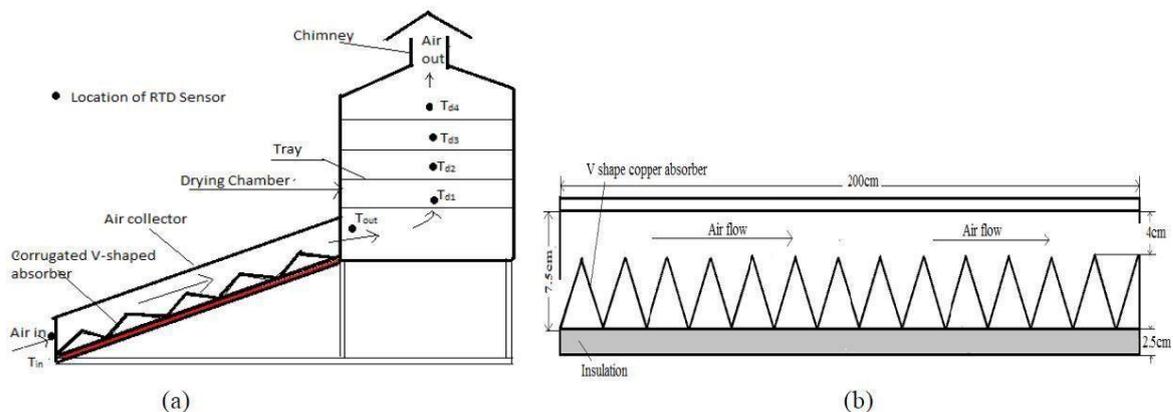


Fig.(I.12) : Vue schématique de la configuration expérimentale; b) Capteur solaire à plaque plate [28]

Tedesco et al., 2018 [29] ont conçu et simulé un séchoir solaire indirect à convection naturelle avec une cheminée. Trois parties distinctes du séchoir (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée) ont été modélisées et les paramètres d'écoulement ont été estimés à l'aide de simulations numériques. Les résultats de la simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux du processus de séchage des pommes. D'après les études ci-dessus, il est recommandé d'utiliser un séchoir solaire indirect pour le séchage des produits agricoles; étant photosensible, il protège le matériau de la saleté, la

poussière, les attaques d'animaux et d'oiseaux. La chaleur gagnée par le séchage de l'air peut être augmentée avec l'augmentation des dimensions du capteur solaire telles que la longueur, la largeur, l'espace d'écoulement de l'air et l'angle d'inclinaison. On observe que le temps nécessaire de séchage est inférieur en séchoir indirect par rapport au séchage au soleil ouvert (direct). L'analyse CFD peut être effectuée pour visualiser la vitesse de l'air et la distribution de la température dans la chambre du séchoir indirect à convection naturelle afin de trouver une zone morte qui réduit les performances du sécheur. D'éventuelles modifications peuvent être effectuées dans la chambre avant de commencer les travaux. En outre, les produits alimentaires peuvent être installés là où se trouve la zone active dans la chambre.

La capacité maximale du sécheur indirect à convection naturelle n'est que de 7,45 kg qui est utilisé pour le séchage des tomates. Toutes les autres études sont faites avec des prototypes à petite échelle car ces études suggéraient une petite quantité de production. Cela montre que ce sujet nécessite beaucoup de données sur les séchoirs solaires à grande échelle. Ainsi, il peut attirer des fabricants commerciaux et des acheteurs tels que les agriculteurs, qui cultivent des aliments pour les marchés locaux et les petites unités de transformation des aliments. Les séchoirs à convection naturelle prennent plus de temps à sécher les produits alimentaires, et donc de tels modèles peuvent être idéaux pour les matériaux alimentaires à faible teneur en humidité tels que les tranches d'igname, le piment vert, le chou-fleur (*Brassica oleracea*), l'oignon (*Allium cepa*), la banane et la sapote (*Manilkara zapota*).

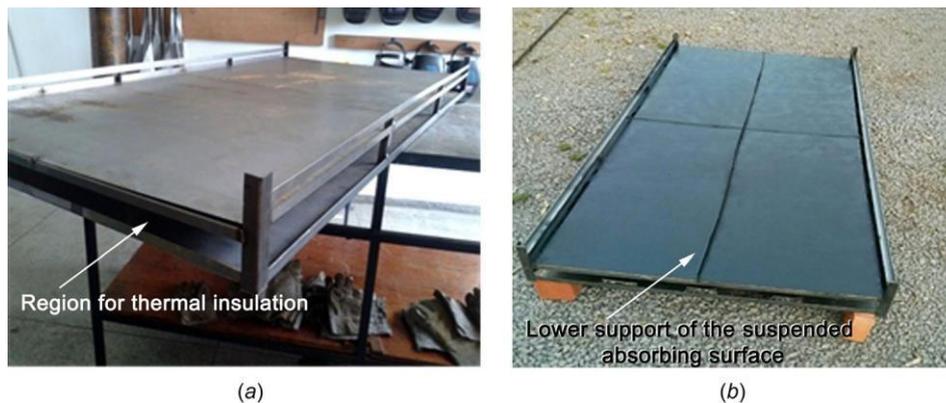


Fig.(I.13) : Capteur solaire en construction: (a) détails de la région d'isolation thermique du capteur et (b) support de la plaque absorbante du collecteur[29]



Fig.(I.14) : Séchoir solaire indirect[29]

1.2.2 Configuration du séchoir solaire indirect à convection forcée :

Dans le séchoir solaire à convection forcée, un ventilateur est utilisé pour améliorer le débit d'air à travers la conduite. Il aide à maintenir la température à l'intérieur du système en contrôlant le débit d'air à l'entrée, [30]. L'examen du séchoir solaire indirect à convection forcée est présenté dans cette section.

Kadam et Samuel., 2006 [31] ont utilisé des capteurs solaires à air rainurés en V par convection forcée pour le séchage du chou-fleur (*Brassica oleracea*). L'augmentation maximale de la température a été de 13,5 °C à la sortie du collecteur. L'efficacité thermique moyenne du collecteur a été calculée à 61,5%. Il a été conclu que l'efficacité thermique et le taux de séchage peuvent être améliorés en optimisant le débit d'air.

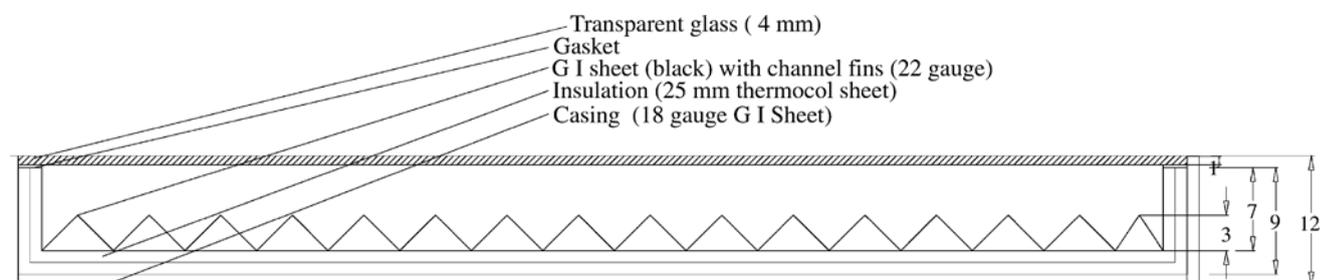


Fig.(I.15) : Section transversale du capteur de chaleur solaire; GI, fer galvanisé; toutes les dimensions en mm[31]

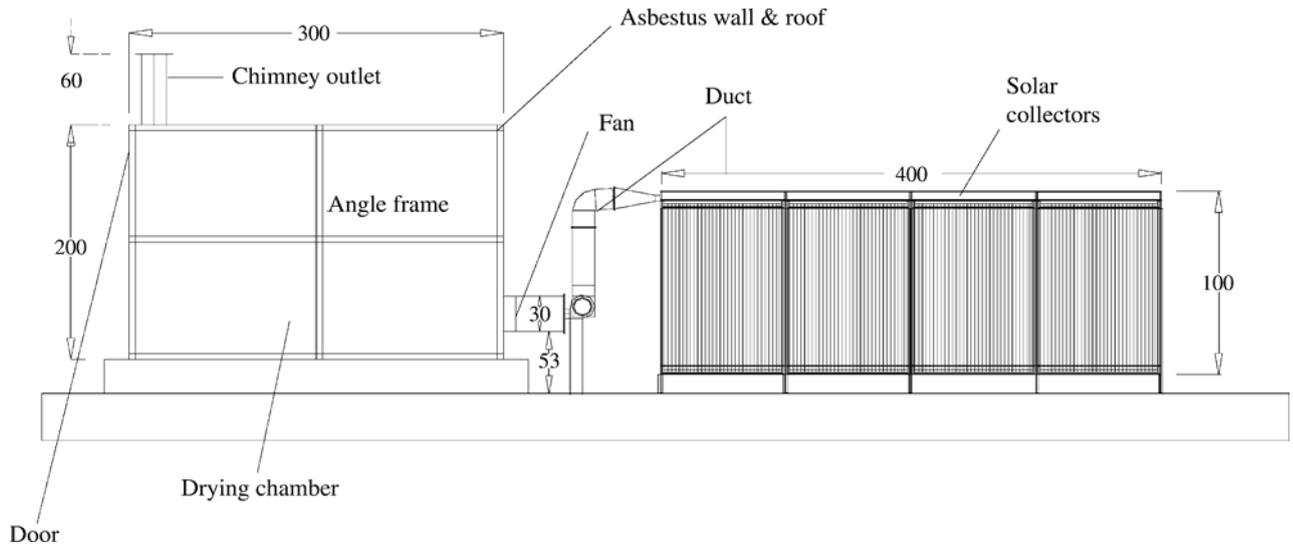


Fig.(I.16) : Vue latérale du séchoir et vue de face des panneaux collecteurs de chaleur solaire à plaque plate; toutes les dimensions en mm[31]

El-Beltagy et al., 2007 [32] ont mené des expériences sur le séchoir solaire pour le séchage des tranches de fraises (*Fragaria Xananassa*). Des expériences ont été menées avec différentes formes de fraises prétraitées. La fraise a été prétraitée avec différentes solutions telles que : 1) 1% de Métabisulfite de sodium + 1% d'acide citrique, 2) 1% d'acide ascorbique + 1% d'acide citrique, 3) 1% d'acide citrique et 4) 2% de Métabisulfite de sodium.

Le résultat a montré que les temps de séchage requis pour atteindre 10,15%, 11,58%, 0,1031% et 15,61% à base humide de teneur en humidité étaient de 24, 28, 26 et 20 h pour les disques, les moitiés, les quarts et une fraise entière, respectivement. Il a été constaté que le processus de prétraitement et de tranchage réduisait le temps de séchage sans affecter la composition chimique de la fraise. .

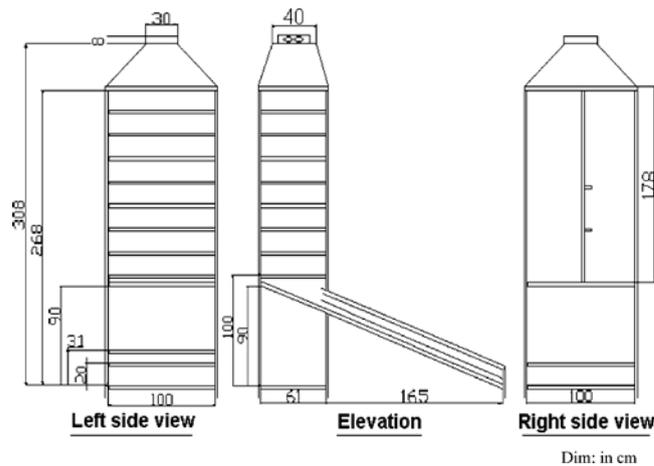


Fig.(I.17) : Expérimentation du séchoir solaire indirect à convection forcée.[32]

Hossain et coll., 2008 [33] pour le séchage de 20 kg de tomates demi-coupées. La température à la sortie du collecteur a atteint 30 °C supérieure à la température ambiante. 20 kg de l'échantillon ont été séchés jusqu'à 2 kg par lot avec une efficacité de séchage de 17 à 29%. Le réflecteur solaire a permis d'augmenter l'efficacité du capteur de 10%. Ils ont suggéré d'effectuer un prétraitement

avant le séchage avec 8 g/L de Métabisulfite de sodium pour empêcher la croissance microbienne si la température de séchage est inférieure à 45 °C .

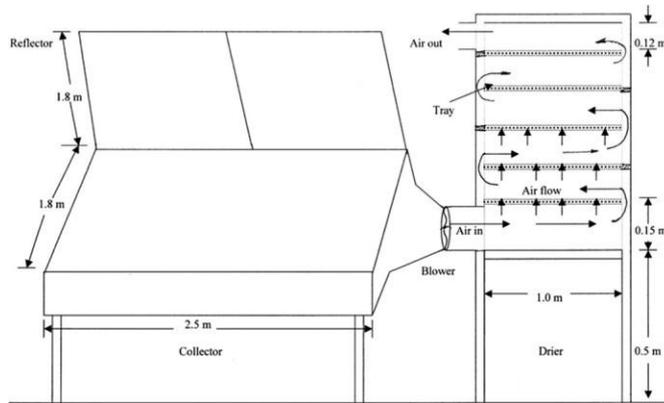


Fig.(I.18) : Diagramme schématique du capteur solaire et du séchoir.[33]



Fig.(I.19) : Photographie du capteur solaire et du séchoir .[33]

Singh 2011.,[34] a développé un séchoir solaire indirect à convection forcée pour le séchage du cocon de soie en couche mince (*Bombyx Mori*). Il se composait d'une chambre de séchage avec plusieurs plateaux pour le chargement du cocon et d'un aérotherme solaire. Les pourcentages d'humidité du cocon ont été réduits de 60 % (wb) à 12 % à différentes températures de l'air entre 50 et 75 °C. Il a effectué une analyse énergétique et a constaté que la consommation d'énergie électrique était très faible, ce qui a été mentionné en termes de valeur actuelle nette .

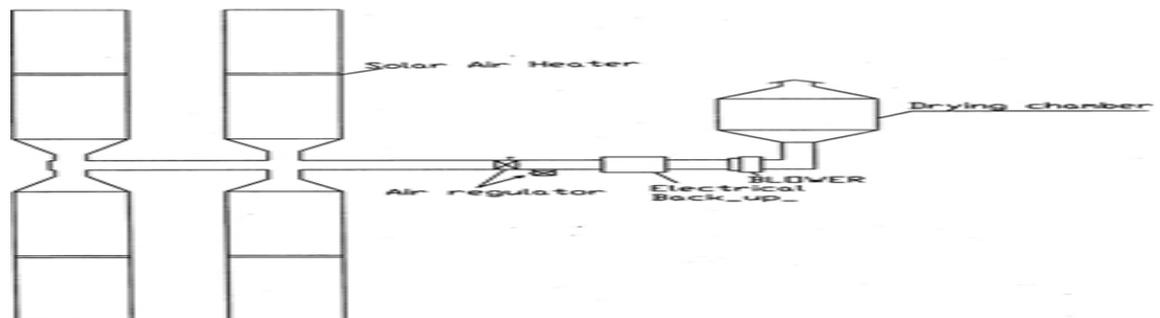


Fig.(I.20) : Schéma du séchoir solaire du concon à convection forcée[34]

Sundari et al., 2013 [35] ont expérimenté avec un séchoir solaire indirect actif composé d'un collecteur à tubes sous vide et d'une chambre de séchage avec cheminée et soufflante. La performance du système a été étudiée pour la courge amère (*Momordica Charantia*). La teneur en humidité de la courge amère a été réduite de 91% à 6,25% (base humide) en 6 h par rapport à 10 h dans le séchage au soleil ouvert. Les taux de séchage ainsi que le taux d'humidité ont également été calculés et comparés au séchage au soleil ouvert. Il a été remarqué l'obtention d'un produit de meilleure qualité par rapport à celui du séchage au soleil ouvert.

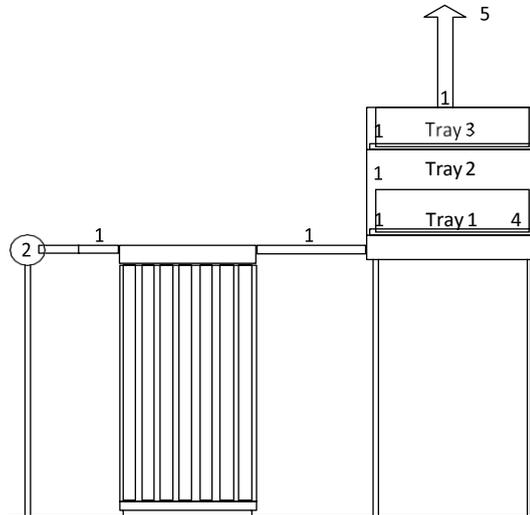


Fig.(I.21) : Diagramme schématique de l'expérimentation (1, capteur de température; 2, ventilateur; 3, tube collecteur d'évacuation; 4, chambre de séchage; 5, cheminé).[35]

Boughali et al. 2009.,[36] ont développé un séchoir hybride solaire-électrique. Des expériences ont été réalisées pendant la saison hivernale. Avec et sans charge, et le comportement thermique, l'effet d'un débit massique élevé d'air sur les performances du collecteur et l'efficacité du séchage ont été analysés. Il a été rapporté que l'efficacité moyenne du système était comprise entre 13 et 31 %, 12,5 à 33 % et entre 2,5 et 47,5 % pour des vitesses de l'air de 1, 1,5 et 2 m/s, respectivement.

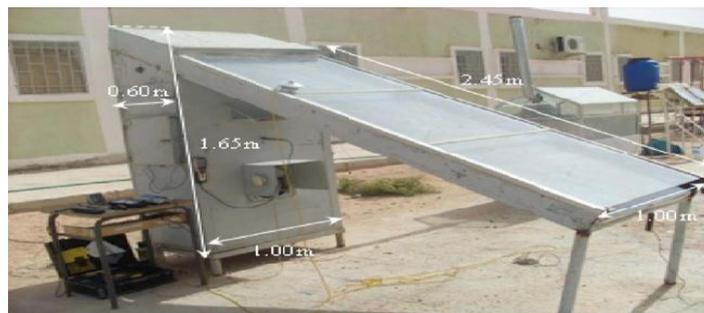


Fig.(I.22) Photo of an indirect active hybrid solar–electrical dryer.[36]

Midilli.,2001 [37] a étudié le comportement de séchage d'échantillons de pistaches (coquilles et non décortiquées) à l'aide du séchage solaire indirecte et au soleil ouvert. Les expériences ont été réalisées sur 100 g de pistache crue et non décortiquée dans les deux conditions. Il a été observé que les échantillons de pistache séchée dans le séchoir indirect prenaient 6 h à 50 ± 10 °C de température avec une teneur en humidité finale de 29 %. L'échantillon séché selon la méthode de séchage au soleil ouvert prenait plus de temps à sécher et il a été observé que la pistache séchée était de mauvaise qualité en raison de la poussière et des insectes.

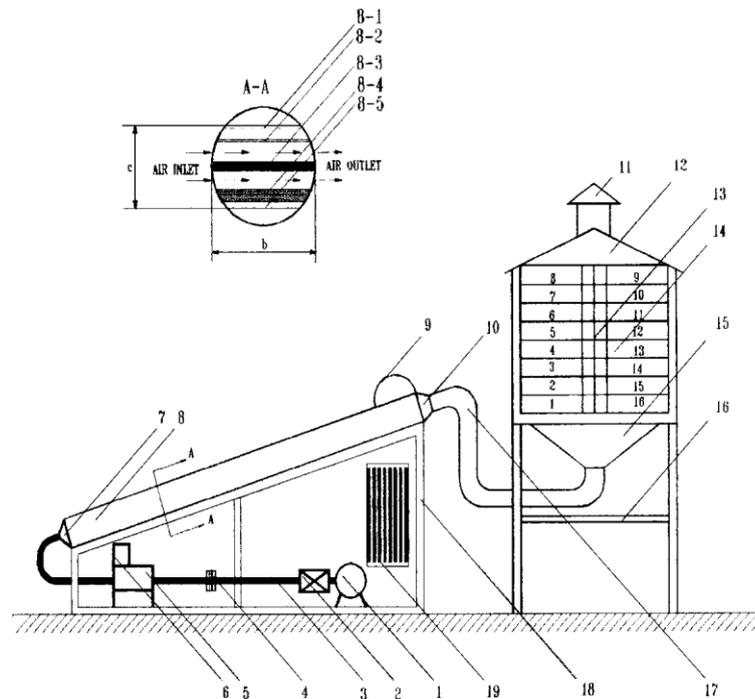


Fig.I.23 Armoire de séchage assistée par l'énergie solaire[37]

(1. Ventilateur, 2. Vanne, 3. Tuyau de raccordement, 4. Orifice, 5. Chauffage d'appoint, 6. Régulateur de température, 7. Entrée du capteur d'air solaire, 8. Capteur d'air solaire, 8-1. Couvercle en verre, 8-2. Couvercle en verre, 8-3. Plaque absorbante, 8-4. Isolation, 8-5. Couverture en bois, 9. Pyranomètre, 10. Sortie du capteur d'air solaire, 11. Cheminée, 12. Sortie de l'armoire de séchage, 13. Inter section, 14. Étagères, 15. Entrée de l'armoire de séchage, 16. Support de placard de séchage, 17. Tuyau de raccordement flexible, 18. Support de capteur d'air solaire, 19. Manomètre).

El-Sebaili et Shalaby., 2013 [38] ont développé un séchoir solaire indirect à convection forcée. Une analyse expérimentale a été réalisée pour le séchage du thymus et de la menthe. Le thymus a été séché d'une teneur en humidité initiale de 95% (base humide) à une valeur finale de 11% (base humide) pendant un temps de séchage de 5 h tandis que la menthe a été séchée d'une teneur en humidité initiale de 85% (base humide) à une teneur en humidité finale de 11% (base humide) pendant un temps de séchage de 34 h.

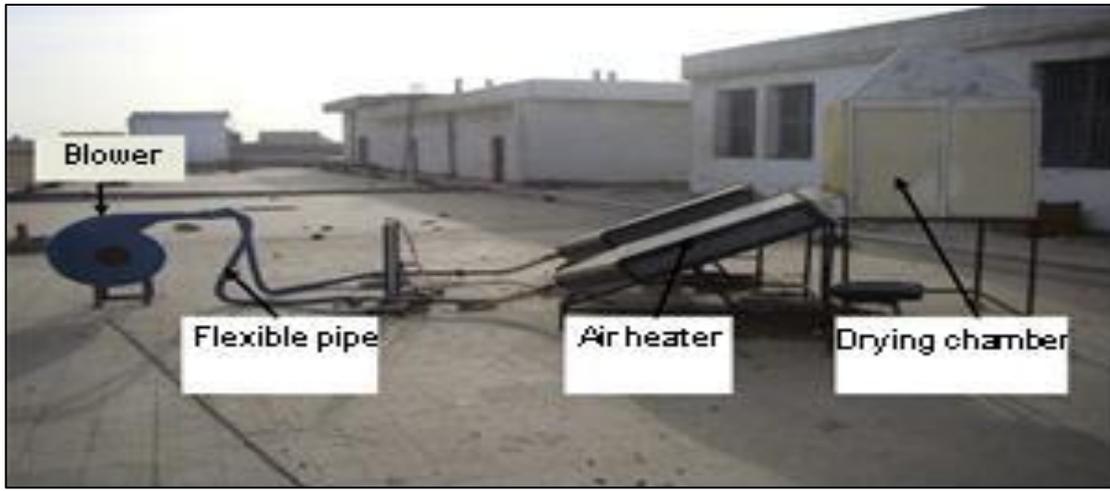


Fig.I.24 Un schéma du dispositif expérimental et b) une photographie du dispositif expérimental.[38]

Mohanraj 2014 .,[39] a développé un séchoir solaire- ambiant à pompe à chaleur de source hybride et a analysé ses performances pour le séchage du copra. Le taux d'extraction d'humidité spécifique a été estimé à 0,79 kg/kWh. Les résultats expérimentaux ont montré une réduction de la teneur en humidité du copra de 52% (base humide) à environ 9,2% en 40 h et c'était une bonne méthode de séchage par rapport à d'autres méthodes.

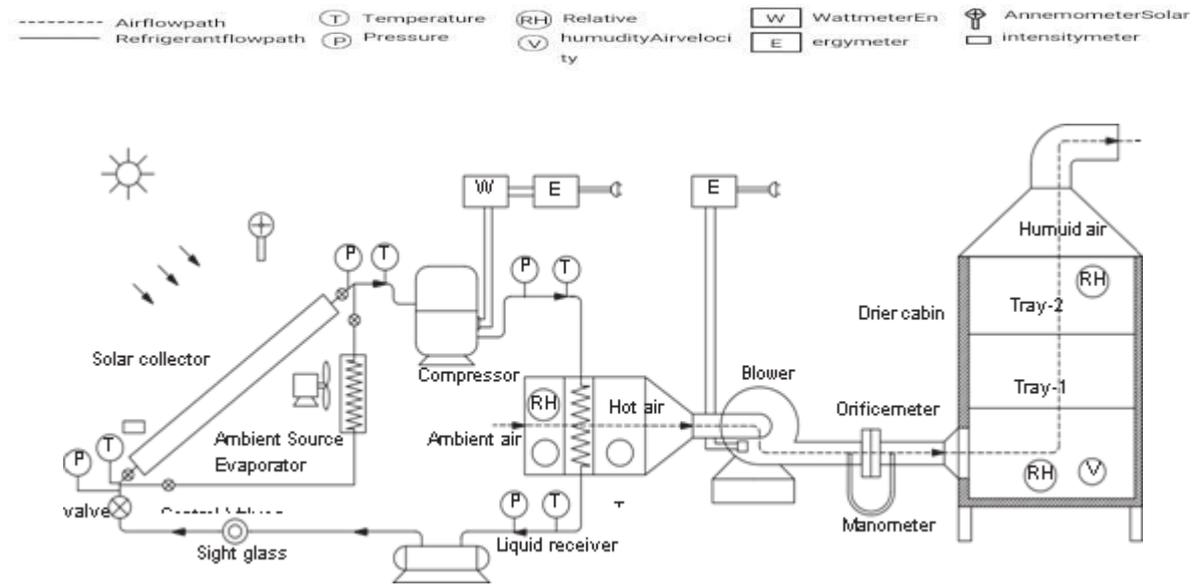


Fig.I.25 Vue schématique de SAHSHPD[39]



Fig.I.26 vue photographique de SAHSHPD[39]

Daghigh et coll., 2016 [40] ont conçu et analysé la performance du collecteur à tubes sous vide du caloduc pour le chauffage et l'eau et l'application du séchage. Le système de récupération d'eau a été utilisé pour le séchoir afin d'améliorer la performance globale du système. La température maximale de l'air disponible pour le séchoir observé était de 45,5 °C.



Fig.I.27 a) Chambre intérieure, b) Bords de direction à l'eau, c) Configuration du séchoir.[40]

Condorí et al., 2017 [41] ont développé deux séchoirs solaires et les ont expérimenté avec des légumes à Huacalera, en Argentine. Chaque séchoir se composait d'un tas de 10 capteurs solaires à plaques plates et d'une chambre de séchage à tunnel d'une capacité de 450 kg. La surface totale du collecteur plat était de 92m². L'expérience a été réalisée environ pendant 16 h avec des tranches d'oignon pour obtenir la teneur en humidité final de 8,26% à partir d'une valeur initial de 81% (base humide). L'efficacité optimale du collecteur a été observée à 0,4 kg/s pour les expériences à basse température. La valeur optimale a été atteinte à 0,23 kg/s lorsque la température de l'air était supérieure à 50 °C. Le taux de retour sur investissement a été trouvé et il était de 13 mois.



Fig.I.28 Photographie de séchoir solaire. Le réseau de collecteurs, l'armoire de ventilateur et la chambre de séchage sont montrés [41]

Fterich et al., 2018 [42] ont développé un séchoir solaire mixte à convection forcée et ont effectué les expériences avec des tranches de tomates. Le séchoir se composait d'un collecteur d'air photovoltaïque-thermique (PV/T) et d'une chambre de séchage munie de plateaux. Les panneaux photovoltaïques ont été munis d'un tube en aluminium en bas pour le flux d'air et se sont répandus dans l'espace supérieur, ce qui a aidé à refroidir le panneau photovoltaïque. La teneur en humidité de la tomate a été réduite de 91,94 % à 22,32 % pour le plateau 1 et à 28,9 % (base humide) pour le plateau 2 .

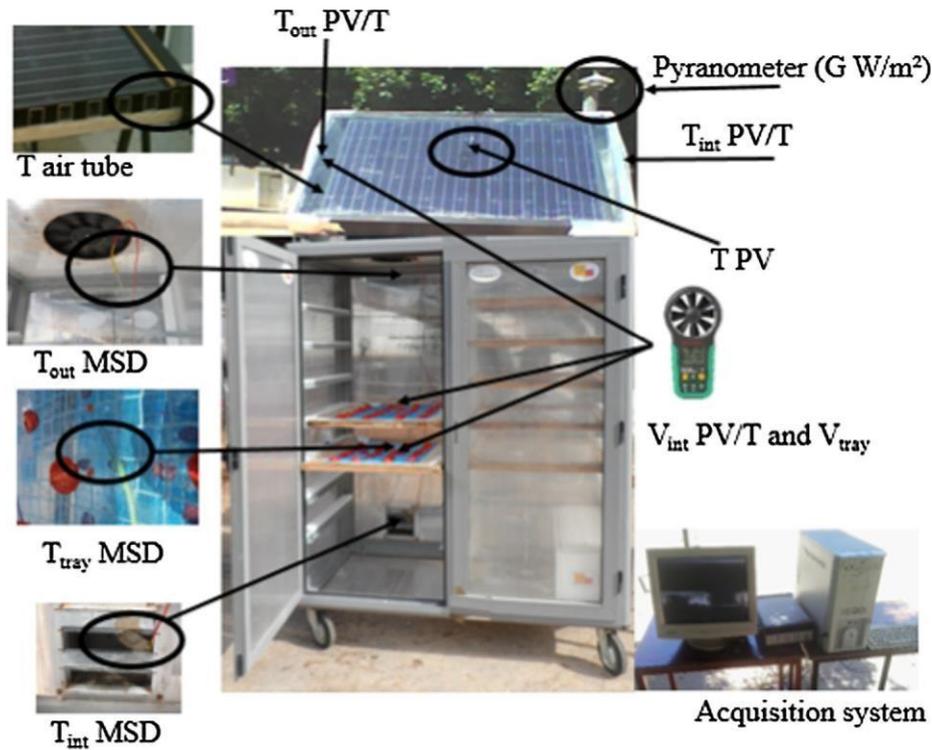


Fig.I.29 Vue de la configuration du séchoir solaire mixte.[42]

Wang et al., 2018 [43] ont présenté un séchoir solaire indirect à convection forcée avec source auxiliaire pour le séchage de la mangue. Le système se composait d'un ventilateur, d'un système de contrôle automatique, d'un capteur solaire à air en tube sous vide et d'une chambre de séchage. L'effet du séchage de la température de l'air sur les performances du système et le comportement de séchage des tranches de mangue a été étudié. L'efficacité thermique moyenne a été estimée et elle variait entre 30,9 % et 33,8 %. Le taux d'élimination spécifique de l'humidité a été estimé et il était de 1,67 kg d'eau / kWh à une température de 52 ° C. L'humidité a été réduite de 77,38% à 20% (base humide).

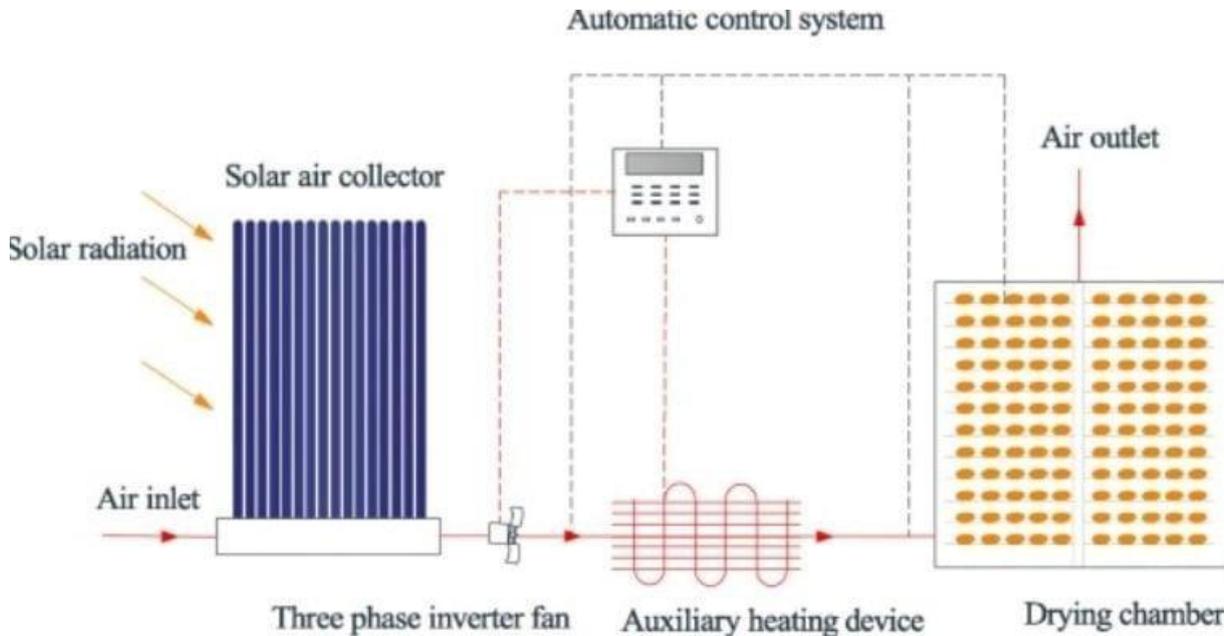


Fig.I.30 Schéma du système de séchage .[42]

Chapitre II : Stockage
thermique et matériaux à
changement de phase

II.1. Introduction :

Le stockage de l'énergie consiste à préserver ou emmagasiner une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Il est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agit d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes, L'énergie est stockée lorsqu'elle est abondante ou moins coûteuse ou sa disponibilité est supérieure aux besoins pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère» et au moment où la demande s'avère plus importante (Dumas, 2002).

Il existe de nombreuses technologies de stockage de chaleur sous diverses formes telles que l'énergie mécanique, l'énergie électrique et le stockage d'énergie utilisé dans notre étude qui le stockage thermique [55].

II.2. Le stockage thermique de l'énergie :

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, L'énergie thermique peut être stockée dans les liquides ou les solides par trois modes [55]:

- Latent.
- Sensible.
- Thermochimique.

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

- La durée de stockage.
- La densité énergétique (ou l'énergie spécifique)
- Les caractéristiques de charge et de décharge (stockage et récupération).

La densité énergétique conditionne la taille du système de stockage. Les différents types de stockage de chaleur sont représentés sur la figure II.2. Les types de stockage de chaleur existant se différencient selon l'application utilisée mais aussi par les réactions physico-chimiques et thermodynamiques dont ils sont le siège [56].

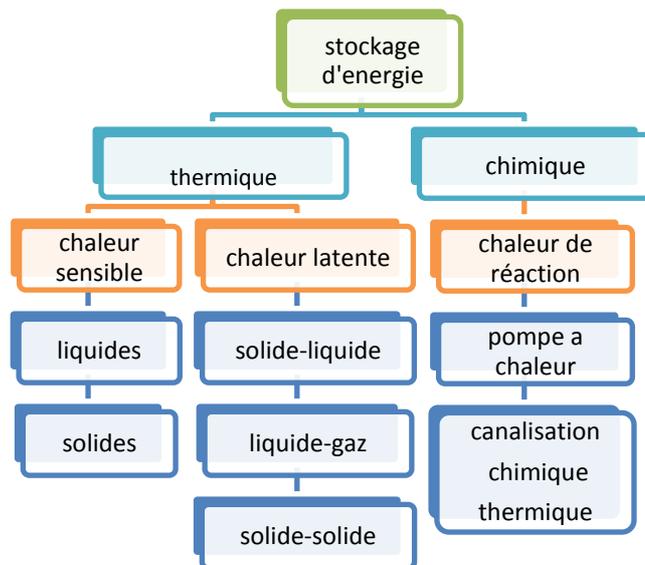


Figure II.1. 2 Différents types de stockage de chaleur [55]

II.2.1 Utilité du stockage thermique :

La nature intermittente de l'énergie solaire, qui est la principale source d'énergie dans le séchage solaire, est en effet l'un des problèmes principaux du système de séchage solaire. Le chauffage solaire fournit de l'air chaud uniquement pendant les heures d'ensoleillement.

Cependant, le séchage de nombreux produits agricoles (par exemple les céréales, les légumes et les aliments) est effectué à une température modérée et continue pendant quelques jours.

Il est donc indispensable d'apporter des solutions à ce problème. Ainsi, le stockage thermique devient nécessaire pour un séchage continu et fiable [23].

II.2.2. Stockage thermique sensible :

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

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

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} m(T) dT \quad \text{EqII.01}$$

Stockage thermique et matériaux à changement de phase

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

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

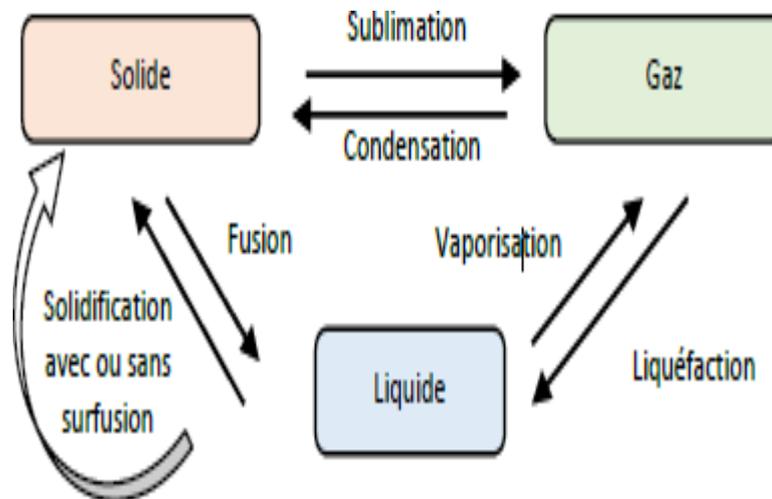
Thermal capacities of some common SES materials at 20° C°			
Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg.K)	Volumetric Thermal capacity (10 ⁶ J/m ³ K)
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.58
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

de par sa densité et sa forte chaleur spécifique. Ce tableau montre également la nécessité pour stocker l'énergie d'un matériau qui possède à la fois une bonne densité et une bonne capacité calorifique. Par exemple le fer qui possède pourtant la densité la plus élevée n'est qu'en 5ème position dans les choix de matériau de par sa faible capacité calorifique [44]

II.2.3. Stockage thermique latent :

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. La chaleur est stockée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau appelé matériau à changement de phase (PCM). Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état. Dans la littérature, les systèmes de stockage à chaleur latente, de grande échelle et à haute température sont rares voire inexistantes. Les PCM's sont souvent des matériaux chers (Tableau II.2) et peu disponibles.

Compte tenu de la faible quantité nécessaire pour parvenir à protéger le récepteur, le stockage latent est donc intéressant dans notre cas. Les diverses transformations existantes sont représentées sur la FigII.2. Chaque transformation se réalise à température constante.



FigureII.2 Diagramme de changement d'état d'un matériau

La chaleur nécessaire pour obtenir un changement d'état à température constante ; est très importante par rapport à celle nécessaire pour augmenter la température et stocker de la chaleur sensible. En considérant l'eau, il faut fournir 83 calories pour obtenir le changement d'état, autant que pour monter ensuite l'eau de 0°C à 83°C. Il est donc intéressant de stocker l'énergie sous forme de chaleur latente, qui permet d'atteindre la disponibilité de grandes quantités de chaleur avec des variations de température faibles

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

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

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

Tableau II.2 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil 2010)

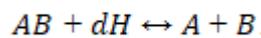
Matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité Thermique (w/(m.k))	Capacité calorifique (j/(kg.k))	Chaleur latente (j/kg)	Masse pour stocker 1 GJ (tonnes)	Masse de stockage relative
Métal	8940	400	385	205000	173($\Delta T=15k$)	40
Roch	2240	1.5	1000	-	67($\Delta T=15k$)	15
Eau	1000	1.6	4200	330000	16($\Delta T=15k$)	4
Pcm organiques	800	1	2000	190000	5,3	1.25
Paraffine	500	0.2	2000	170000	5	1.15
PCM ionorganiques	1600	2	2000	230000	4,35	1

On retrouve régulièrement le facteur 100 entre le C_p et la chaleur latente (ici de fusion).

En regardant la dernière colonne et sans parler de température de fusion, on remarque que les matériaux organiques, non organiques et les paraffines sont de bons candidats en termes de masse nécessaire pour stocker une même quantité d'énergie. Avant de rechercher plus précisément quel PCM nous allons utiliser pour protéger le récepteur, voyons quelle stratégie de développement aborder [45]

II.2.4 Stockage thermochimique :

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



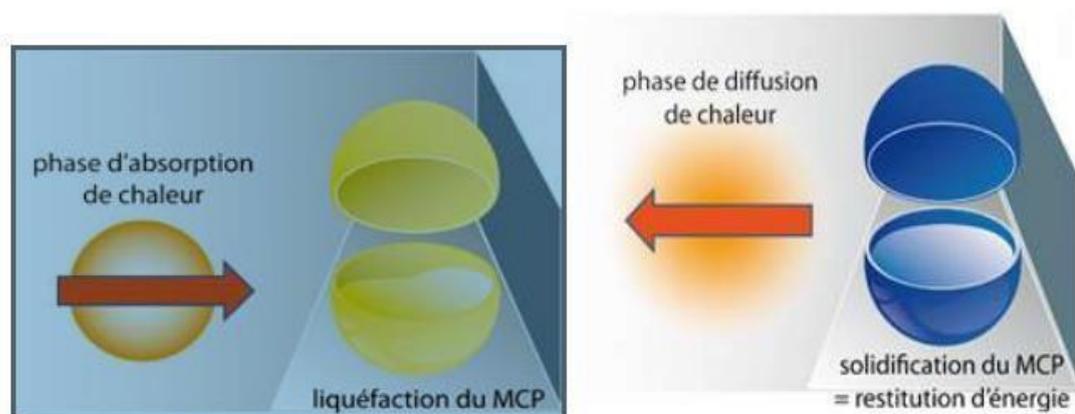
EqII.02

Pendant le processus, la chaleur fournie au couple de sorption AB le dissocie en absorbant la chaleur pour donner naissance à deux composés A et B qu'on peut stocker séparément: c'est le phénomène endothermique. Lorsque ces deux produits sont mis en contact, le phénomène exothermique se produit pour former à nouveau le composé AB en libérant de la chaleur [46]

II.3 MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE :

II.3.1 Définition :

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



FigII.3 Liquéfaction et solidification du MCP [47]

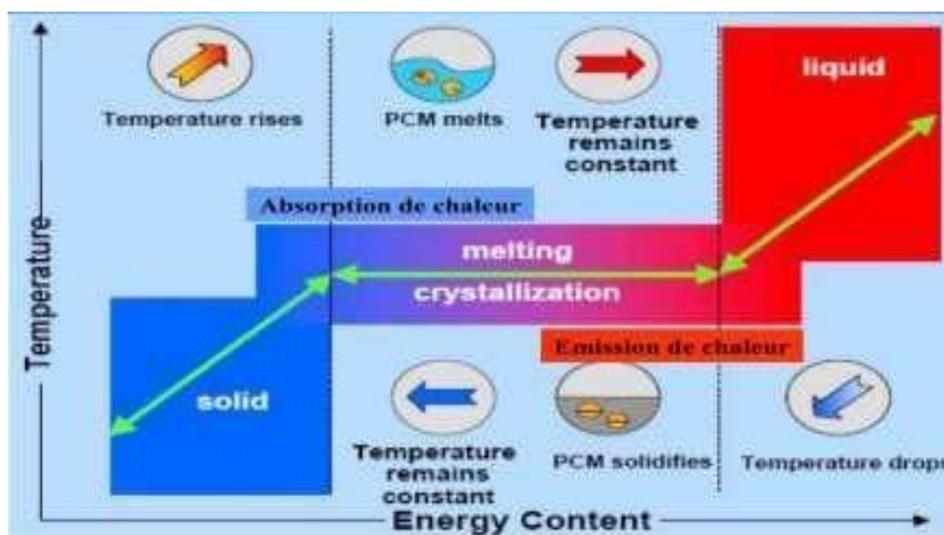
Les matériaux à changement de phase (MCP) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latent de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement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

Tableau II.3 les avantages et les inconvénients des types de changement de phase. [47]

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

II.3.2 Principe de fonctionnement du PCM :

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, les liaisons chimiques dans le matériau va commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide a l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégage l'énergie et revenir à l'état solide . [48]



FigII.4 principes de fonctionnement de PCM. [48]

II.3.3 Critère de sélection d'un bon MCP :

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP.

Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique. Cependant, il n'existe aucune méthode privilégiée. [49]

II.3.4 Propriétés d'un MCP:

a- Propriétés thermiques :

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

b- Propriétés physiques :

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

c- Propriétés chimiques :

- + Stabilité chimique prolongée
- + Compatibilité avec les matériaux du conteneur
- + Non toxique, non inflammable et non explosif
- + Pas de séparation de phase

d- Propriétés économiques :

- + Abondant
- + Peu coûteux

II.3.5 Classifications des MCP :

Dans l'année 1983, Abhat a donné une classification détaillée sur les substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique. La FigII.6 présente cette classification. Cette figure montre que les MCP solide-liquide sont principalement divisés en deux catégories : les matériaux organiques qui sont composés principalement d'acides gras et de paraffines ainsi que les matériaux inorganiques composés principalement d'hydrates de sel.

Chaque groupe possède ses propres intervalles de température de fusion et de chaleur latente qui dépendent des effets moléculaires, en termes de liaison chimique.

La FigII.7 montre la gamme de l'enthalpie de fusion et la température de fusion des MCP communs [50].

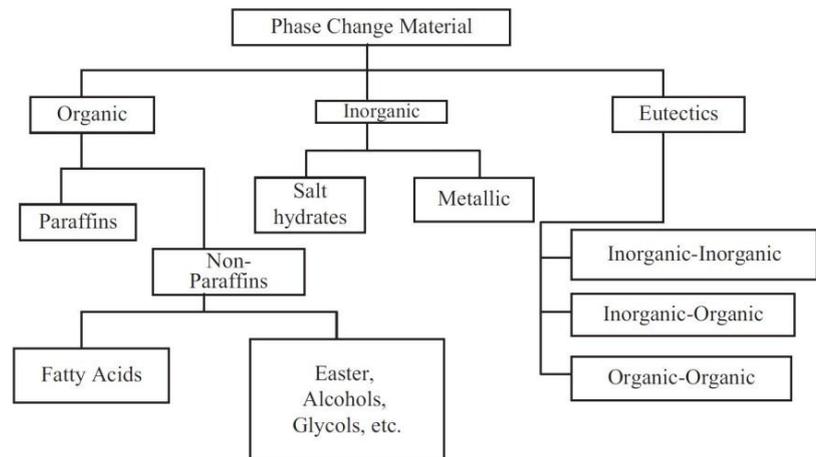


Fig II.8 Classification détaillée sur les substances utilisées pour le stockage de l'énergie thermique. [50]

II.3.5.1 Les composés organiques:

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

A. Paraffines

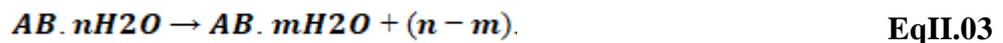
Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variable, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. [49]

II.3.5.2 Les composés inorganiques:

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

A. Hydrates de sels :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $AB \cdot nH_2O$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau selon la formule:



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre:



Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (T fusion = 28-30 °C).

On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100°C.

B. Métaux :

On peut citer notamment le Potassium (T fusion= 63.2 °C), le Bi58Sn42 (T fusion= 138 °C) ou encore le Lithium (T fusion= 186 °C).

Tableau II.4 différents PCM pour Métaux. [49]

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

A. Les eutectiques :

Les MCPs eutectiques sont composés de plusieurs MCPs purs, en générale, de mélanges de MCPs organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, Inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages : leur point de fusion sont similaires à celui d'une substance pure et leurs chaleurs latentes de fusion sont supérieures à celle des composés organiques purs [43].

Tableau II.5 différents PCM pour les eutectiques. [53]

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

A. PCM commerciaux :

De nombreuses entreprises (Climator, Cristopia, EPS Ltd., Mitsubishi Chemical Corporation, Rubitherm GmbH TEAP et Witco) sont engagées dans le développement de PCM pour plusieurs applications. Nous avons essayé de compiler les PCM disponibles dans le commerce pour la température entre 0 °C et 118 °C, et ceux-ci sont présentés dans le tableau 9. [53]

Tableau II.6. différents PCM commerciaux. [43]

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

Chapitre III : Matériels et méthodes

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

III.1.1 Description du prototype expérimental :

Dans cette partie, nous fournirons une épithète et des images illustratives du prototype testé dans le cadre du mémoire de Master 2 (Modèle III.1). Pensez aux séchoirs solaires de type indirect, ces deux séchoirs solaires sont dotés de la capacité d'étudier les variations thermiques et le séchage cinétique. Unité de séchage unique non instantanée pour la production de vent chaud : composée d'un modeste capteur solaire rotatif et d'une vitre de 5 mm d'épaisseur, avec un dessus incliné, superposés en aluminium de 0,8 mm d'aluminium peint en noir mat, dimensions 2 m x 1 m. Isolant thermique en polystyrène et dans cette position du polystyrène de 4 cm d'épaisseur est utilisé sur le contreplaqué et les parties latérales. La distance entre la paille et le verre est de 2,5 cm.

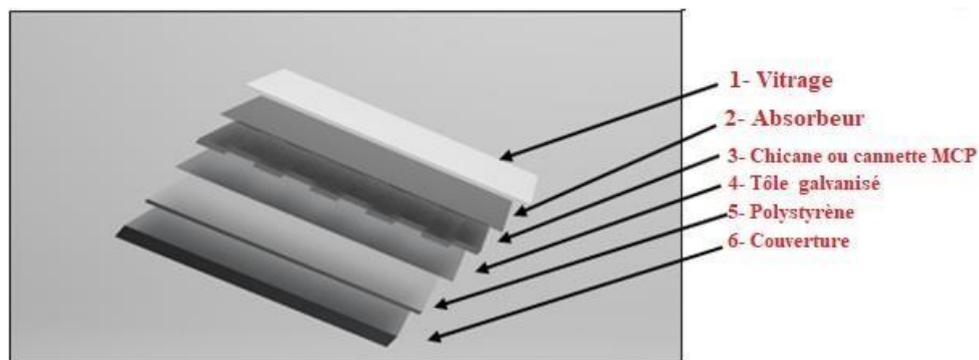


Fig. (III. 1) : Dessine technique des composants du capteur *S*

III.1.2 Capteur solaire à air avec chicanes OSF (Offset Strip Fins) :

Ce système dispose d'un capteur plan à air doté de chicanes, dont elles permettent de rendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et d'augmenter la surface de contact avec elle, afin d'améliorer le rendement thermique (FigIII.2).

Les dimensions et la forme des chicanes intégrées dans le capteur solaire à air avec chicanes (FigIII.3) [54].

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

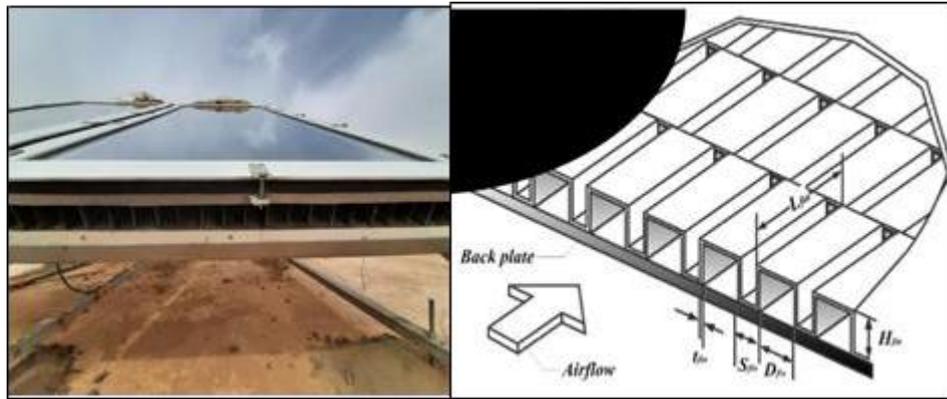


Fig. (III. 2) : capteurs solaires avec chicanes

III.1.3 Capteur solaire à air avec cannettes:

Ce système dispose d'un capteur plan à air doté des cannettes de 33 cl remplies de deux matériaux différents, le premier matériau est le Paraffine et le deuxième c'est le chlorure de calcium $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ils permettent de stocker l'énergie thermique, afin de l'utiliser ultérieurement pour améliorer le rendement thermique et rendre également l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante Fig.(III. 3).

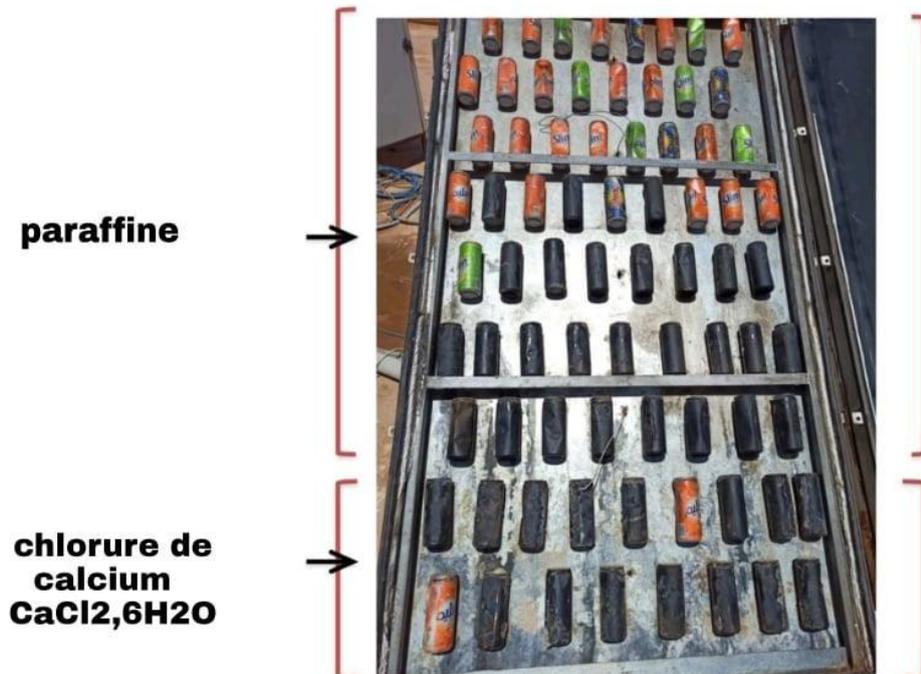


Fig.(III. 3) : capteur solaire avec cannettes



Fig. (III. 4) : capteurs solaires avec cannettes et avec chicanes

III.1.4 La chambre de séchage :

Elle est de hauteur 1.17 m, de longueur 0.55 m, et de largeur 0.55 m, Cette chambre comporte 6 claies (étagères) sur lesquelles est posé le produit à sécher. L'air chauffé pénètre par le haut et traverse les claies avec un écoulement à convection forcée généré par des ventilateurs qui permet de créer un écoulement forcé **Fig. (III. 5)**.



Fig.(III.5) : Photographie de la chambre de séchage (frigo)

III.1.5 Modification du séchoir solaire :

Fig.(III.6) explique l'état initial du séchoir solaire avant modification, nous avons remarqué que l'air à en sortant de la chambre de séchage est encore chaud et transporte beaucoup de chaleur, nous avons donc ajouté un tube en PVC noir de 10,2 cm de diamètre pour récupérer 75% de l'air qui sort de la chambre de séchage en contrôlant une vanne pour éliminer l'air humide, que nous avons dû installer comme indiqué sur **Fig.(III.7)** .



Fig. (III.6) : Avant modification



Fig. (III.7) : Après modification

III.1.6 Instrumentation des prototypes :

III. 1.6.1 Mesure des températures :

Chaque prototype de séchoir solaire indirect est équipé de thermocouples nickel-chrome-nickel-aluminium de Type K. Ces thermocouples, d'un diamètre de 0,05 mm, peuvent atteindre des températures de 1370 K et avec une précision de 0,1°C.

Ils sont utilisés pour surveiller la température à l'intérieur du séchoir solaire, tandis que d'autres sont placés à l'intérieur du matériau de conservation de la chaleur.

Nous plaçons l'un des thermocouples à l'intérieur du conduit de transfert de chaleur après avoir installé un ventilateur pour extraire l'air du capteur solaire. Leur localisation est indiquée sur la **Fig. (III.8)**.

Ensuite, nous installons quatre thermocouples dans la première étuve, à l'entrée, la seconde à la sortie, et le reste dans le produit pour indiquer la température de l'air fourni à la chambre de séchage de l'échantillon **Fig. (III.9)**. D'autres thermocouples sont placés sur le tube de récupération (III.13)

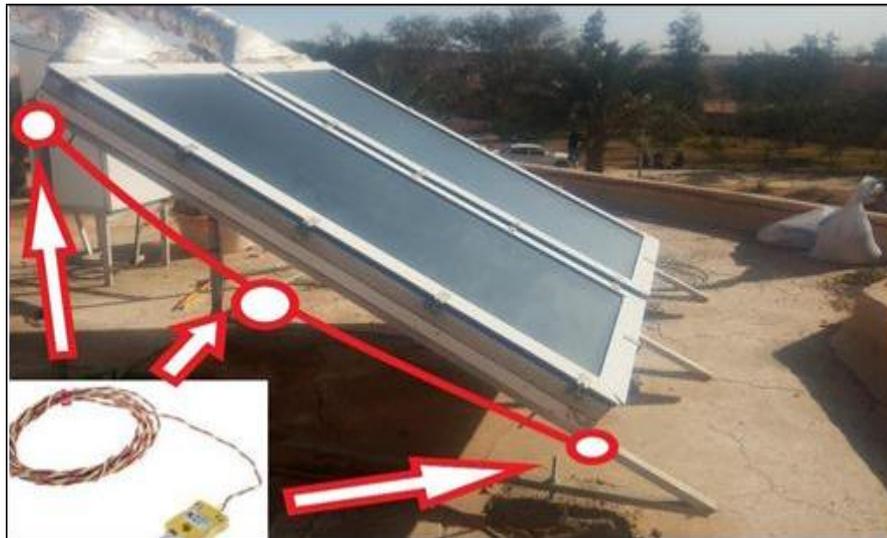


Fig. (III.8) : Position des thermocouples dans l'isolateur (avec chicanes et avec cannettes)

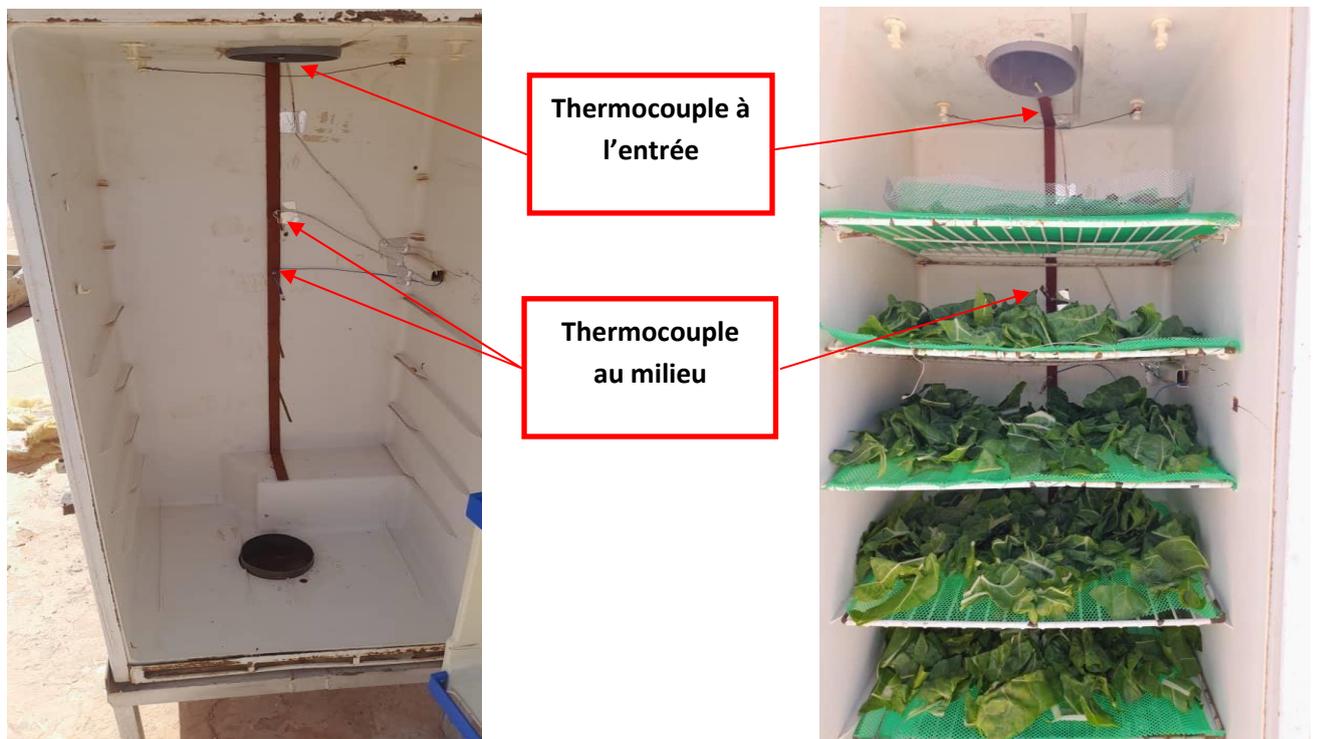


Fig. (III.9) : Position des thermocouples dans la chambre de séchage

III.1.6.2 Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :

Une station radiométrique comporte deux parties : une partie fixe qui est constituée d'un pyromètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global sur un plan horizontal et d'un pyromètre différentiel type EPPLEY pour mesurer l'irradiance sur un plan incliné de 32° et orienté vers le sud. Une partie mobile (système de poursuite solaire) qui est pourvue d'un pyréliomètre pointé vers le disque solaire, afin de mesurer le rayonnement direct, et d'un pyromètre type EKO, muni d'une boule pare soleil pour la mesure de l'éclairement diffusé sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo- hygrométrique « Techoel sonde thermo-igrometriche » avec un étalonnage de précision égale $\pm 1.5 \%$, sensibilité à la température ambiante égale 0.1 (°C/mV) et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à +60°C. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont relié à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x **Fig. (III.11)** . 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.



Fig. (III.11) : Photographie des Appareillages de mesures de rayonnement, température et d'humidité relative de l'air ambiant

III.1.6.3 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air de séchage :

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



Fig. (III.12) : Anemometer Testo 440 + thermo-hygromètre Testo 610

III.1.7 Acquisition et traitement des données :

L'Acquisitions de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22bit) un système de commutation 40 voies Pilotée par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données Fig.(III.13) .

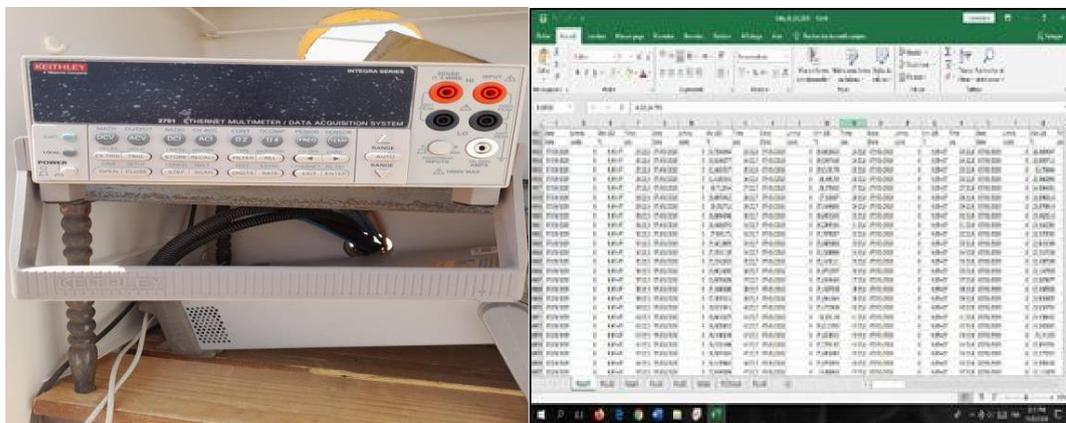


Fig. (III.13) : Photographie de système d'acquisition et de traitement des données

III.2 MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER :

A- Dessiccateur :

C'est un équipement de laboratoire 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) Fig.(III.14) .



Fig. (III.14) : Photographies de dessiccateur utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale

B- Etuve :

C'est un appareil de chauffage, il fonctionne à la pression atmosphérique et permet d'effectuer divers traitements thermiques. Dans notre travail on le réglé à 105 °C pendant 24 heures afin de déterminer la teneur en matière sèche des échantillons préparés **Fig.(III.15)** .



Fig. (III.15) : Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche

C- Balance

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

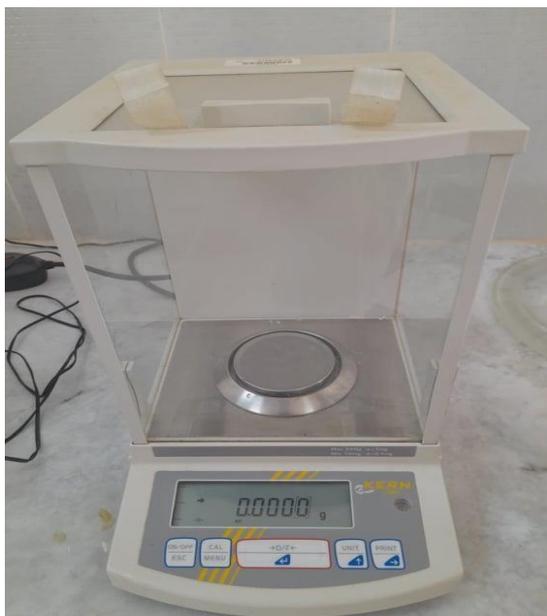


Fig. (III.16): Balance KERN ABT 220-4M: 220g/0,1m



Fig. (III.17) : Balance KERN PCB 3500-2: 3500g/

D- Agitateur Magnétique Chauffant :

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

E- Bêchers :

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



Fig. (III.18) : Becher utilisé au laboratoire

III.3 MATERIEL VEGETAL :

a- La bette:

("Beta vulgaris subsp") est une espèce végétale très nutritive avec de nombreux noms à travers le monde et fait partie de la famille des Betoideae. Son apport énergétique est de 19 calories par 100g. Elle contient environ 92.66% d'eau, 1.8% de protéines, 0.20% de lipides et 3.74% de glucides.

Les fibres contenues dans les bettes ont un rôle régulateur sur le transit intestinal et permettent également de lutter contre la constipation. Elles vont également réguler la glycémie, On retrouve également de la glutamine dans les blettes, il s'agit d'un acide aminé qui permet de freiner le vieillissement cellulaire et de régénérer les cellules de l'organisme.

La richesse en antioxydants des bêta-carotènes aide à entretenir l'ensemble des tissus du corps mais plus précisément les pigments des bâtonnets de la rétine et aide à conserver une bonne vue au fil des années.

Le potassium étant présent en bonne quantité, il permet d'aider à réguler la tension artérielle et sera donc un allié dans la prévention des maladies cardio-vasculaires.

Apporté en quantité suffisante, le fer permet de transporter l'oxygène dans le corps de façon équitable et efficace. Les blettes en sont riches et leur consommation permet d'éviter les anémies.



Fig. (III.19) : la bette

b- La 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 antitumorales, anti-inflammatoires et antibactériennes mais elles auraient également des propriétés neuroprotectrices 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.



Fig. (III.20) : La moringa

III.4. Protocole de séchage :

III.4.1 Préparation de l'échantillon bette :

Nous trions et lavons les blettes à l'eau froide du robinet, puis secouons les branches coupées pour éliminer les éventuels petits insectes qui pourraient s'y trouver, les répartissons uniformément sur les étagères de l'armoire de séchage (réfrigérateur) pour chaque séchoir et mettons la quantité dans les quatre paniers afin que nous pouvons les peser à différents intervalles de temps de séchage pour obtenir des courbes de séchage cinétique pour extraire les résultats et comparer les séchoirs solaires et à ciel ouvert, nous calculons la teneur en eau sur une base sèche et humide, et enfin traçons les courbes de teneur en eau en fonction de temps.

Nous Prélevons un petit échantillon des feuilles de blettes préparées, puis coupons ces branches en fines tranches de 1 à 2 mm d'épaisseur, ces dernières placées au four pour déterminer la teneur en eau initiale. Pour déterminer la cinétique de séchage, nous avons procédé avec le protocole suivant :



Fig. (III.21) : Préparation de la bette au laboratoire

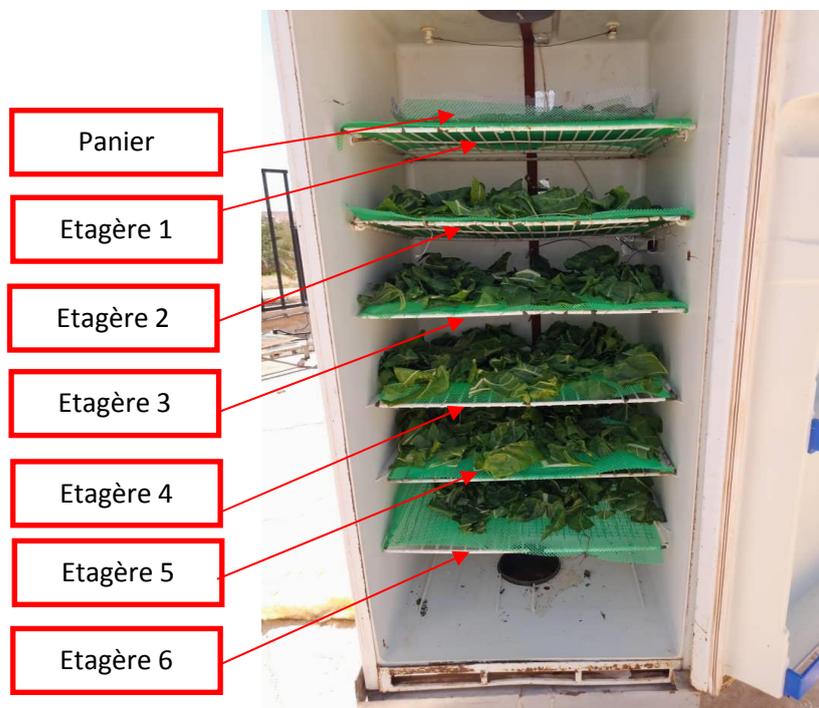


Fig. (III.22) : Quantités de bette à séchée dans le séchoir

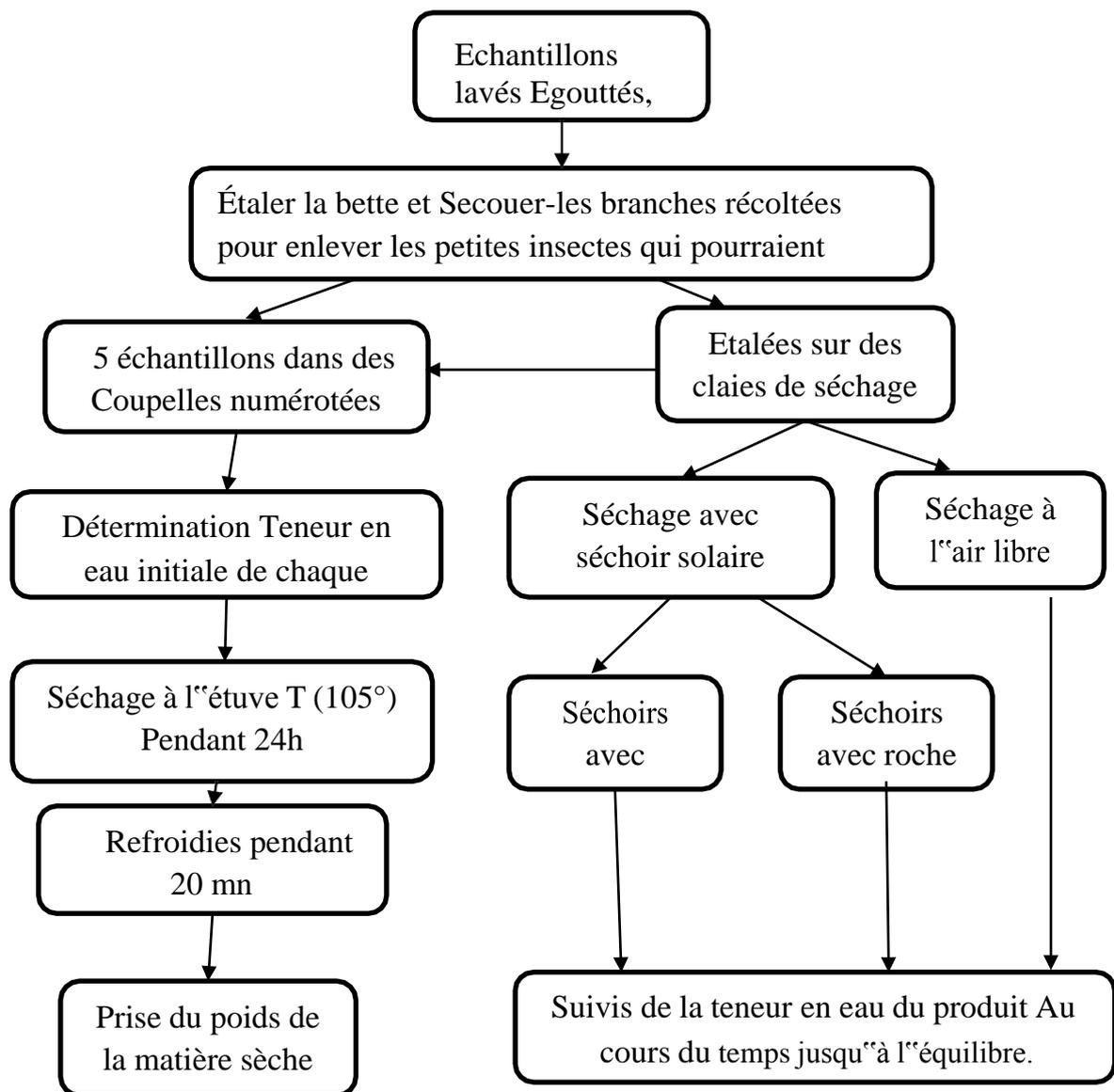


Fig. (III.23) : Schéma représentant le protocole de séchage de la bette

III.4.2. Préparation de l'échantillon de la moringa:

Nous trions et lavons les feuilles de moringa à l'eau froide du robinet, puis on secoue les branches coupées pour éliminer les éventuels petits insectes qui pourraient se trouver à l'intérieur, elles sont étalées sur les étagères de l'armoire de séchage (réfrigérateur) pour le séchage et nécessitent de la quantité en tout quatre paniers afin que nous puissions les peser à différents intervalles de temps de séchage pour obtenir les courbes de séchage Cinétique Pour extraire les résultats et comparer les séchoirs solaires et à ciel ouvert, nous calculons la teneur en eau sur une base sèche et humide, et enfin traçons la teneur en eau courbes en fonction du temps.

Prélevez un petit échantillon des feuilles de Moringa préparées, et mettez celles-ci dans un four pour déterminer la teneur en eau initiale. Pour déterminer la cinétique de séchage, nous avons procédé avec le protocole suivant



Fig. (III.24) : Préparation de la moringa au laboratoire



Fig. (III.25) : quantités de moringa à séchée dans la chambre de séchage

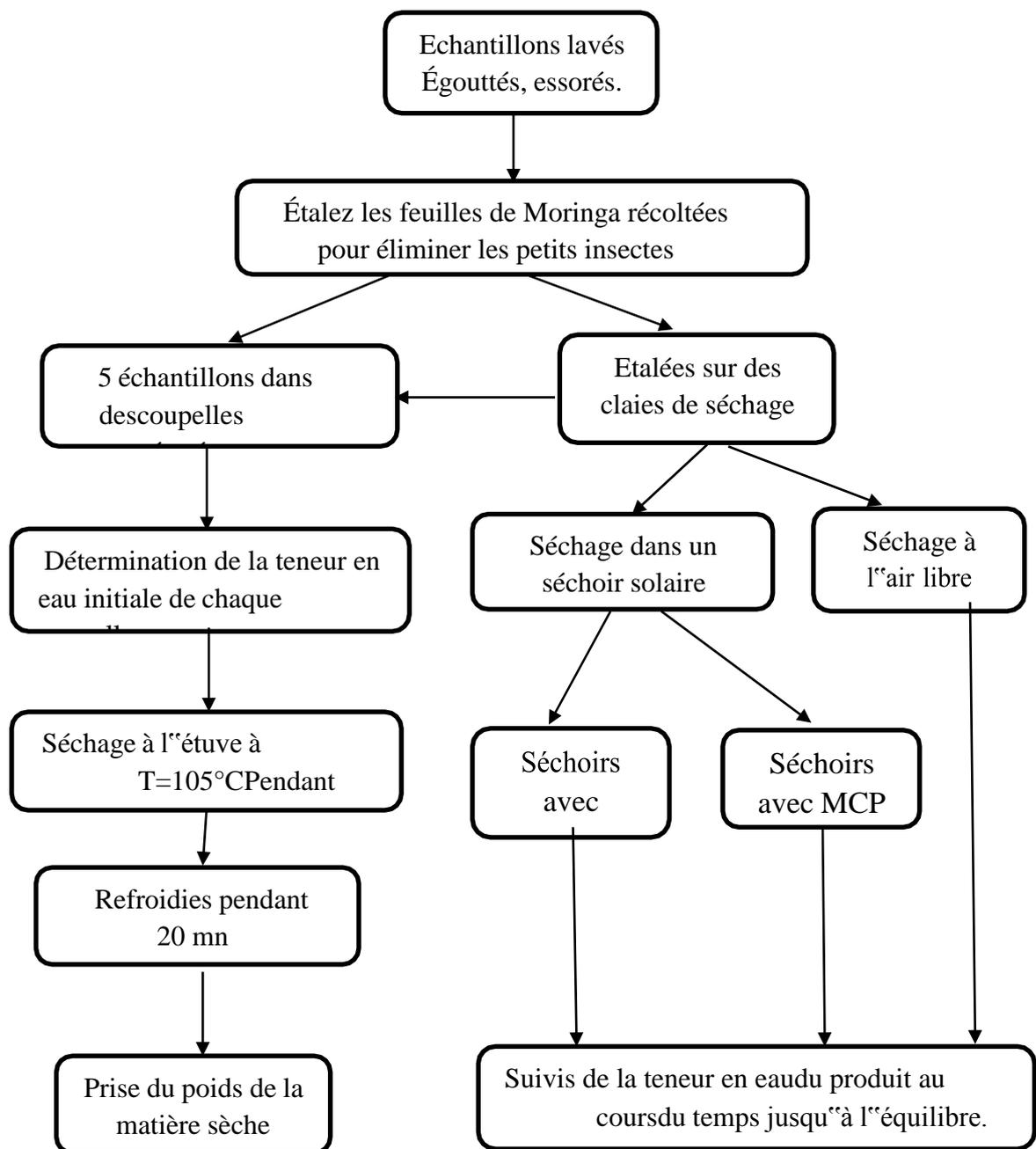


Fig. (III.26) : Schéma représentant le protocole de séchage de la moringa

III.4.3. Détermination de la teneur en eau initiale :

Des échantillons ont été prélevés afin de mesurer la teneur en eau à base humide et sèche.

Ils sont séchés à 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 :

$$W (\%) = \frac{m(\text{initiale}) - m(\text{finale})}{m(\text{initiale})} \%$$

EqIII.01

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

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

III.4.4 Préparation de matériaux à changement de phase d'hydrate de sel($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) pauvre en ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) :

Le chlorure de calcium, de formule CaCl_2 (masse molaire $M = 111 \text{ g/mol}$), se présente dans les conditions thermodynamiques classiques sous la forme d'un solide blanc (NaCl fondu ou anhydre). Il est également présent sous forme de chlorure de calcium cristallisé ou hydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (masse molaire $M = 219 \text{ g/mol}$), Facilement soluble dans l'eau et l'alcool. C'est un composé hygroscopique puissant, ce qui signifie qu'en présence d'eau, il réagit pour donner un hydrate en libérant de la chaleur. réaction du chlorure de calcium hydraté avec de l'eau; En pratique, On met 392 g de chlorure de calcium avec 200 g d'eau, puis on mélange le chlorure de calcium hydraté avec de l'eau dans un ballon fermé, ce qui assure une homogénéité et une agitation continue à une température de 120°C . **Fig.(III. 27, 28, 29)**, En fin de réaction, le produit préparé est versé dans des cannettes de 33 cl **Fig.(III.30)**.



Fig. (III.27) : pesé de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (391g)

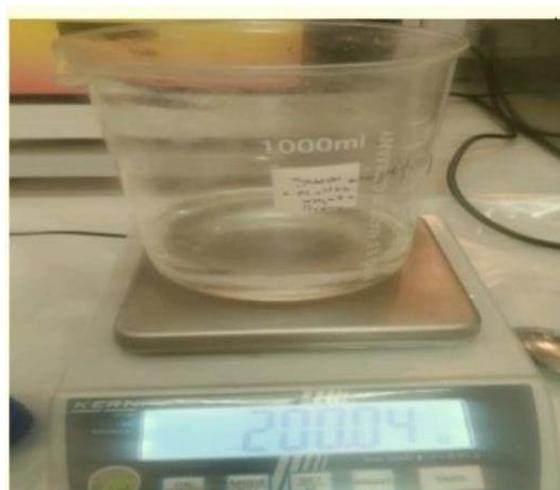


Fig. (III.28) : pesé de l'eau (200g)

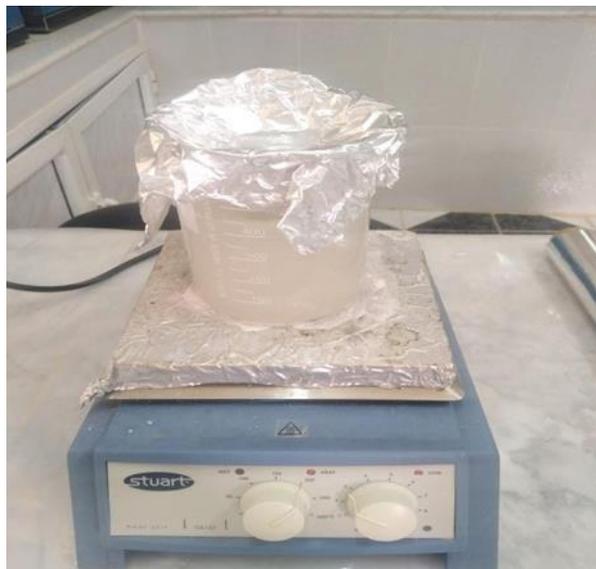


Fig. (III.29) : mélange de chlorure de calcium d'hydrate avec l'eau

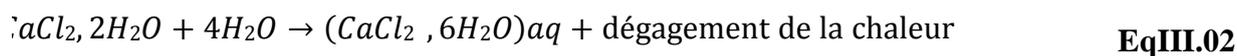


Fig. (III.30) : Matériau préparé pour le stockage de l'énergie thermique remplissage des cannettes par chlorure de calcium ($\text{CaCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$)

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

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

Ces expériences sont traduites selon les réactions suivantes :



III.4.5. Préparation de matériaux à changement de phase paraffine :

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

La quantité utilisée dans le capteur solaire est d'environ 11013,80 g



Fig. (III.31) : paraffine solide



Fig. (III.32) : dégivrer paraffine Verser dans les
Cannetes

III.5. Modélisation des cinétiques de séchage :

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

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{EqIII.03}$$

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:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad \text{EqIII.04}$$

Avec $M_{t+\Delta t}$ et M_t sont la teneur en eau à l'instant t et la teneur en eau à l'instant $t + \Delta t$ en kg d'eau / kg de matière sèche, respectivement, t est le temps de séchage en minute. Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage. Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite MR en fonction du temps. Ces formules contiennent des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats théoriques avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'investigation expérimental pour lequel elles ont été établies. Le Tableau III-2 regroupe quelques équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche minces d'un produit.

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi ces dix différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.2. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant le logiciel « Origin Pro 9.0». Le coefficient (R2) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage [Balbay et al., 2012]. En plus de (R2) les différents paramètres statistiques tels que le 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 [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

Le Tableau III.2 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	$MR = (Aexp - kt)$	[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	$MR = (-kt) + (1 - A)exp(-kbt)$	[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]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{exp,i})^2} \tag{EqIII.05}$$

Avec :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \tag{EqIII.06}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \tag{EqIII.07}$$

$$\overline{MR}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad \text{EqIII.08}$$

Avec MR_{exp} et $MR_{pré}$ 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.6.5 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 décrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire, dont l'équation est exprimée par [Vasic et al., 2016]:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad \text{EqIII.09}$$

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

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla^2 MR] \quad \text{EqIII.10}$$

La tranche de produit séché peut être considérée comme une plaque uniforme soumise à un régime graduel non stationnaire avec une distribution initiale uniforme et des concentrations égales à la surface. En supposant que la matrice est une plaque infinie indéformable (rétractable négligeable ou étendue) avec une répartition uniforme de l'humidité initiale, une résistance externe négligeable et une diffusivité constante, la solution analytique de la deuxième loi de Fick a été développée par Crank [Crank, 1975] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} ((\exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2)) \quad \text{EqIII.11}$$

Où : 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 :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad \text{EqIII.12}$$

L'équation (Eq III.12) peut être réarrangée et exprimée comme suit :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad \text{EqIII.13}$$

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

$$(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad \text{EqIII.14}$$

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Résultats et discussion :

Les expérimentations ont été conduites du 07 mars au 30 mai 2022 à la plate-forme expérimentale de séchage solaire (FigIV.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 indirect avec et sans recyclage. Les expériences ont été réalisées dans des conditions de fonctionnement réelles de la région de Ghardaïa. Les caractéristiques de séchage des feuilles de bettes et de moringa ont été étudiées sur trois jours consécutifs. Les performances thermiques des prototypes de séchoir solaire indirect sont mesurées en termes des températures dans différentes positions des prototypes. Le débit massique d'air est varié entre 17.10 kg/h et 70.97 kg/h pour chaque cas d'études.



Fig IV.1 – Photographie de la plate-forme d'expérience de séchage à l'URAER.

IV.1.2 Performances thermiques des prototypes de séchoir solaire indirect avec système destockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air et sans système

Les différentes expériences qui ont été faits sont les suivants :

- ✓ **Test N°01** : Avant d'intégrer le système de récupération, une comparaison de comportement thermique de prototype de séchoir solaire indirect avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente par rapport au prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes (Fig IV.2) ;
- ✓ **Test N°02** : Après l'intégration de système de récupération, comparer le comportement thermique de prototype de séchoir solaire indirect avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air par rapport au prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes (Fig IV.3) ;

IV.1.2.1. Test N°01 :

Nous commençons nos essais expérimentaux dans un premier temps, dans l'un des séchoirs solaires de type direct, nous avons intégré un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et dans le deuxième, nous avons intégré des chicanes (Fig IV.2). La Fig. IV.3 montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes.



Fig IV.2 : Prototypes de séchoir solaire indirect : avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente (gauche) et muni des chicanes (droite).

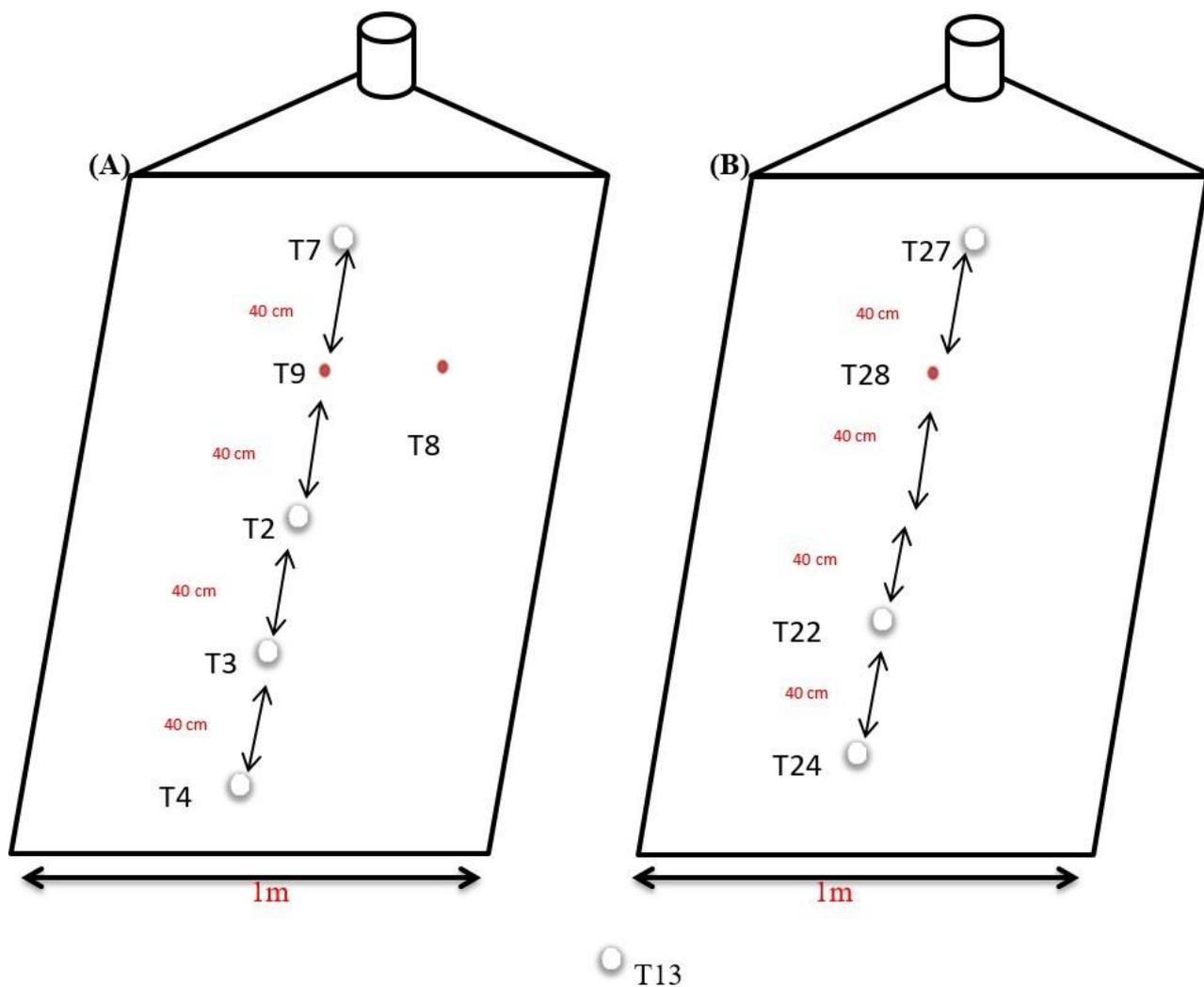
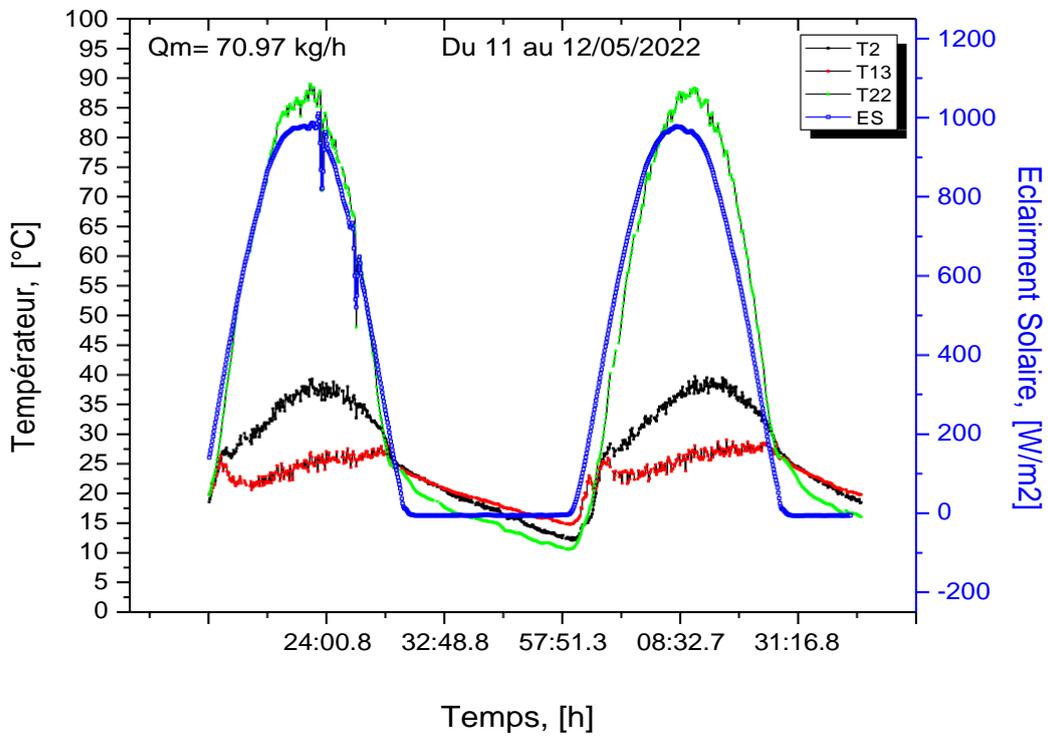
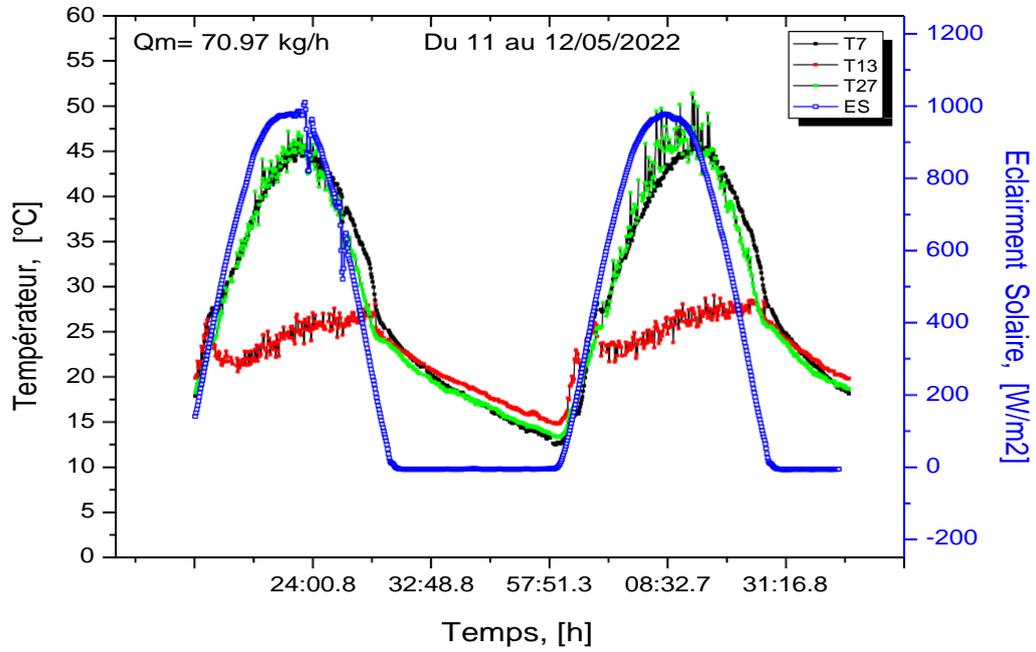


Fig IV.3 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect avec système de stockage d'énergie thermique (A) et avec chicanes (B).

✓ Débit maximum ($Q_m=70.97$ kg/h) :



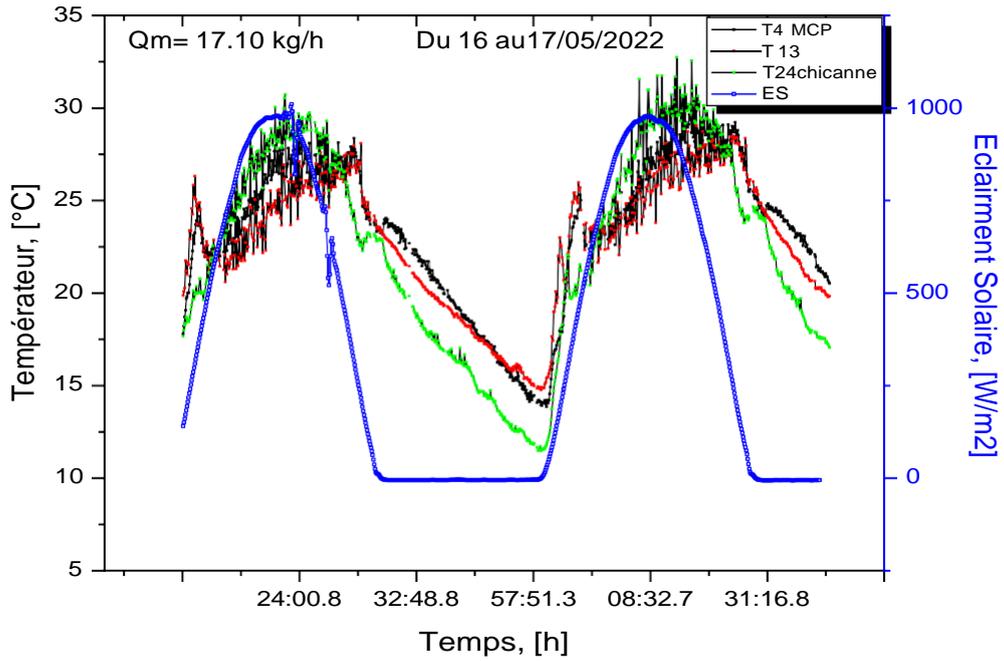
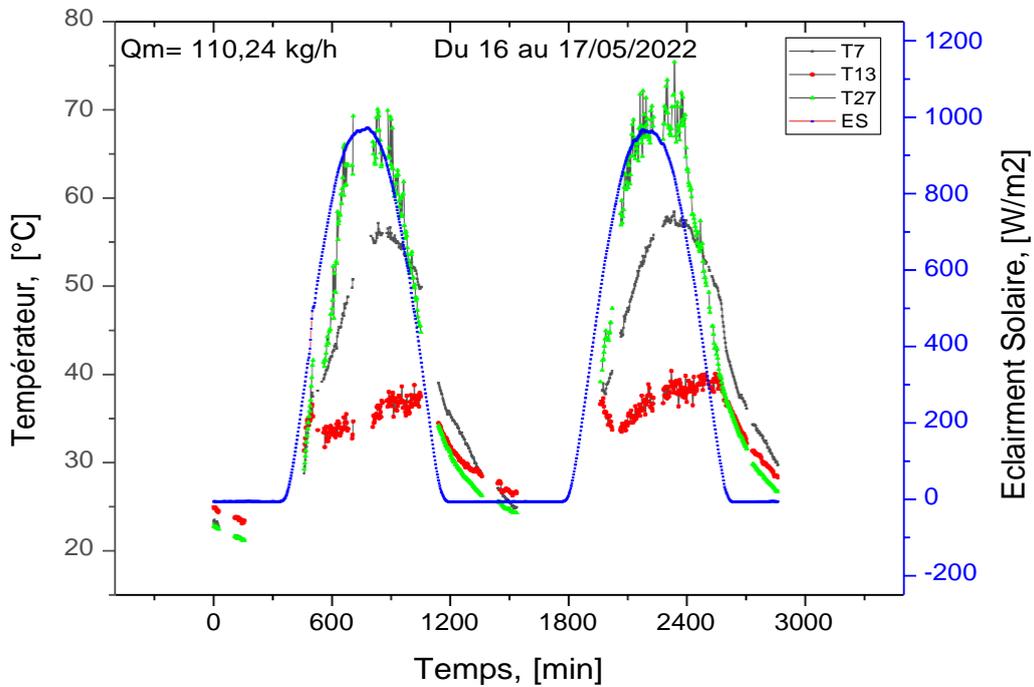


Fig. IV.4 Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27, (voir Fig IV.3) pour les journées du 11 au 12/05/2022

✓ Débit moyen (Qm=35.48 kg/h) :



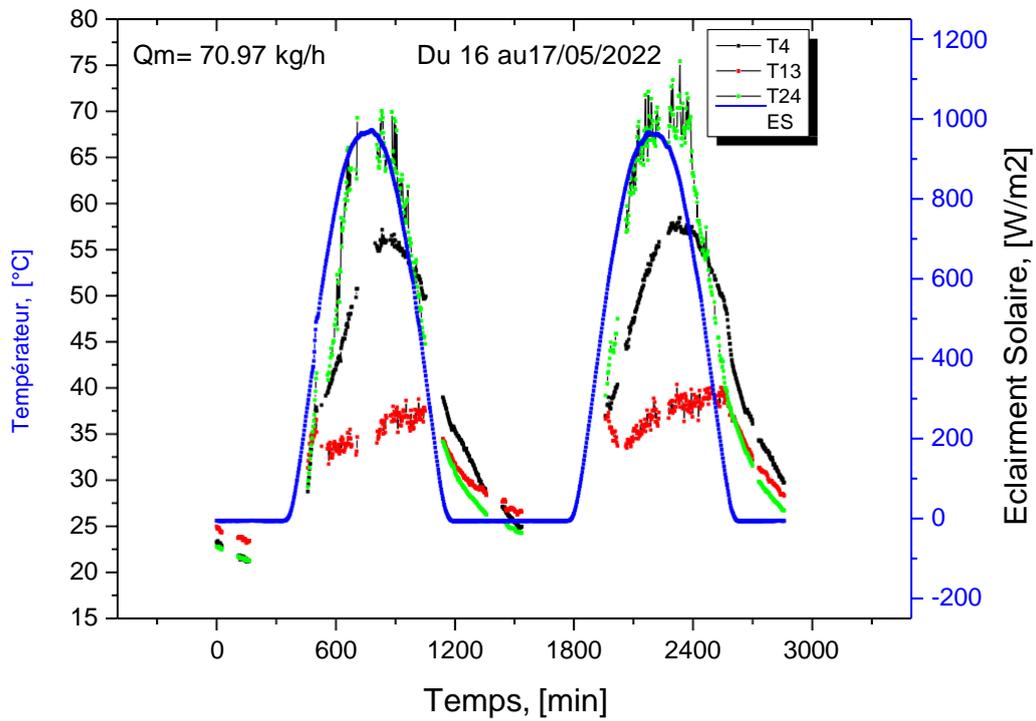
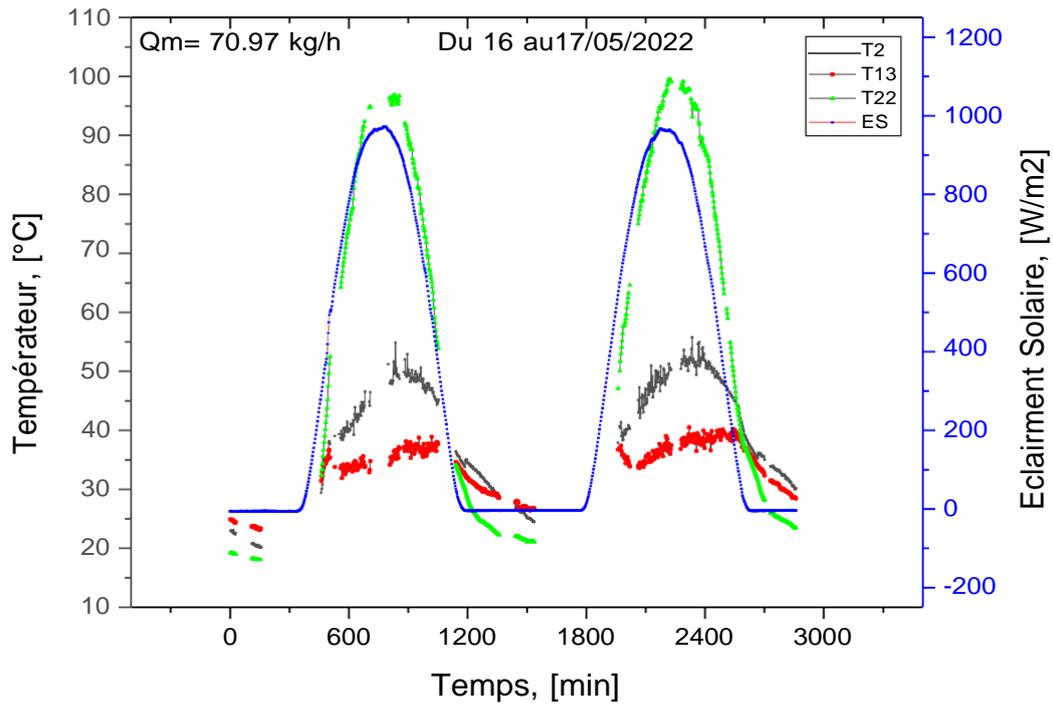
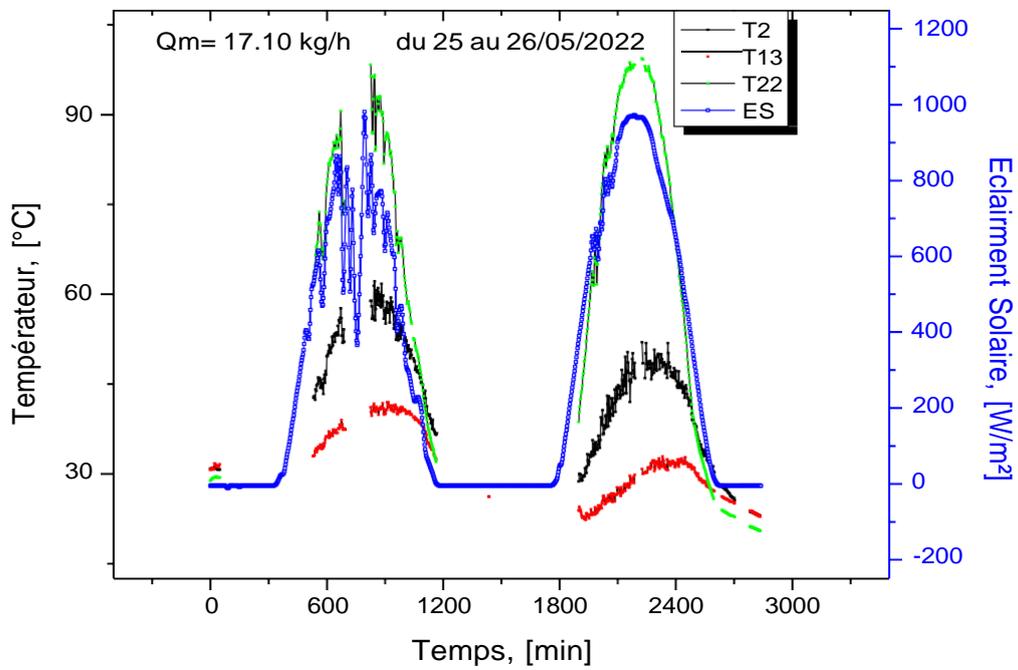
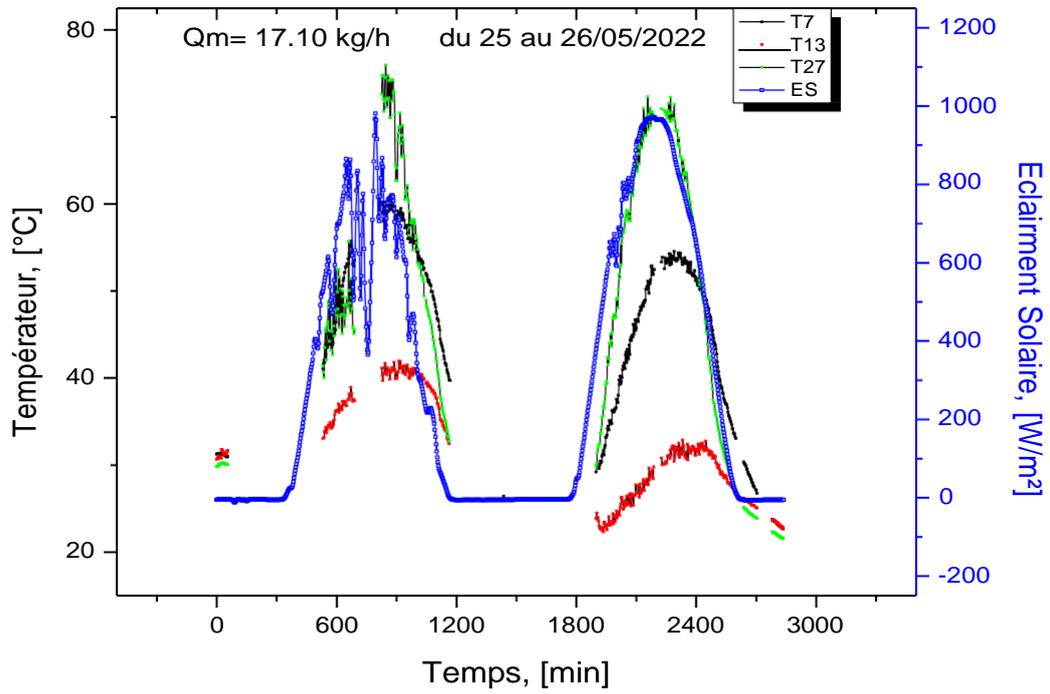


Fig IV.5: Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27 (voir Fig IV.3) pour les journées du 16 au 17/05/2022

✓ Débit minimum ($Q_m=17.10 \text{ Kg/h}$) :



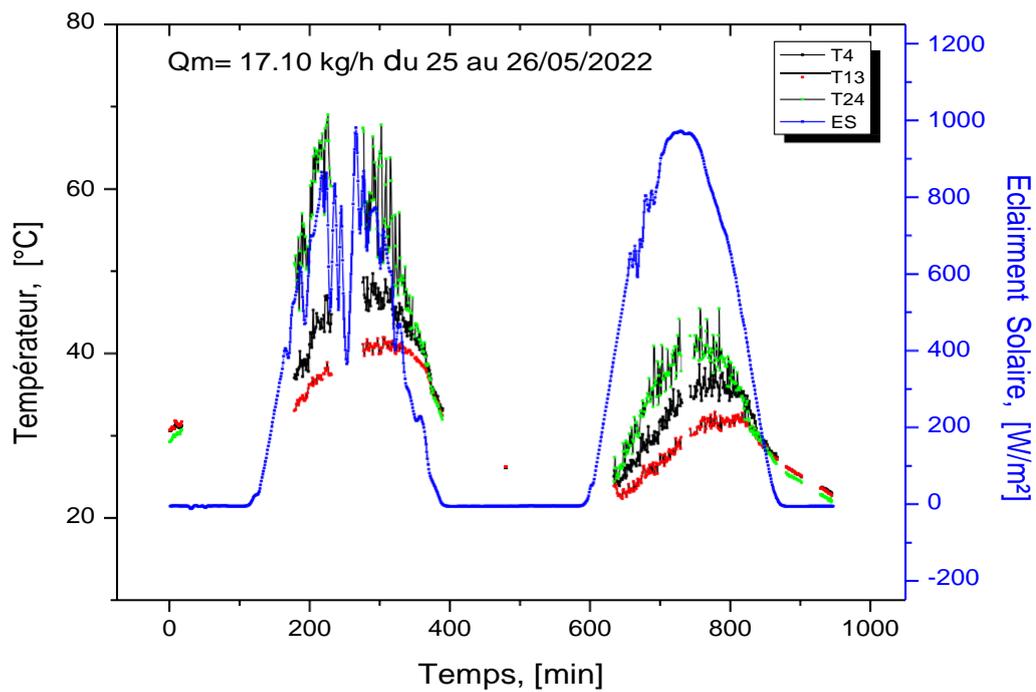


Fig IV.6: Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27, (voir Fig IV.3) pour les journées du 25 au 26/05/2022

IV.1.2.1. Test N°02 :

Dans un deuxième temps, dans le séchoir solaire indirect avec système de stockage d'énergie thermique, nous avons intégré le système de récupération de la chaleur développé dans ce travail de Master et dans l'autre séchoir solaire, nous avons intégré des chicanes (Fig IV.2). La (FigIV.4) montre l'évolution des températures dans différentes positions des prototypes indiqué dans le schéma (Fig IV.3).



Fig IV.7 : Prototypes de séchoir solaire indirect : avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente (gauche) et muni des chicanes (droite).

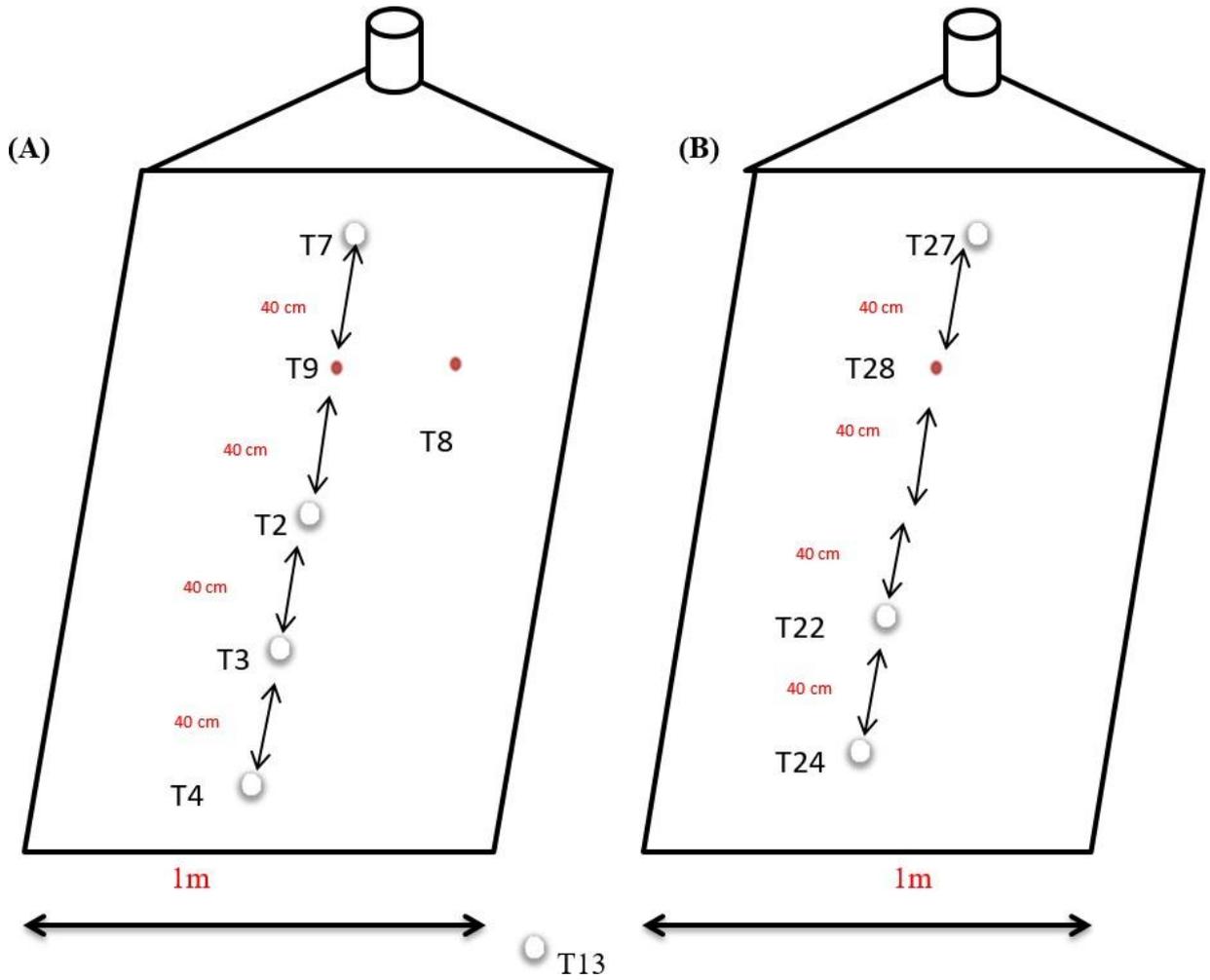
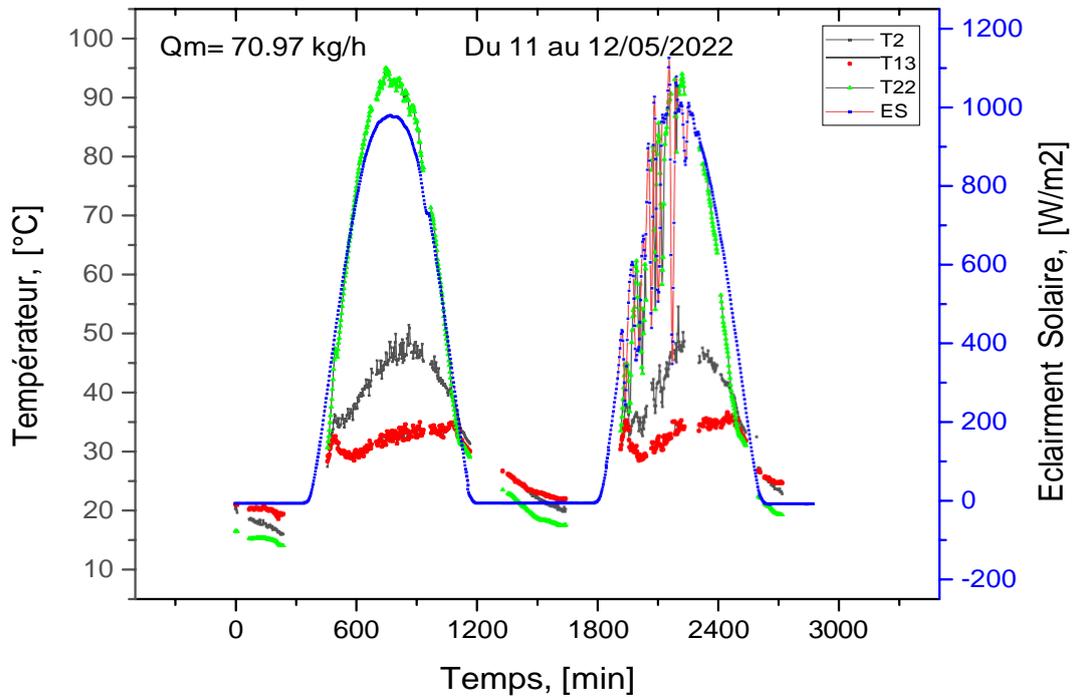
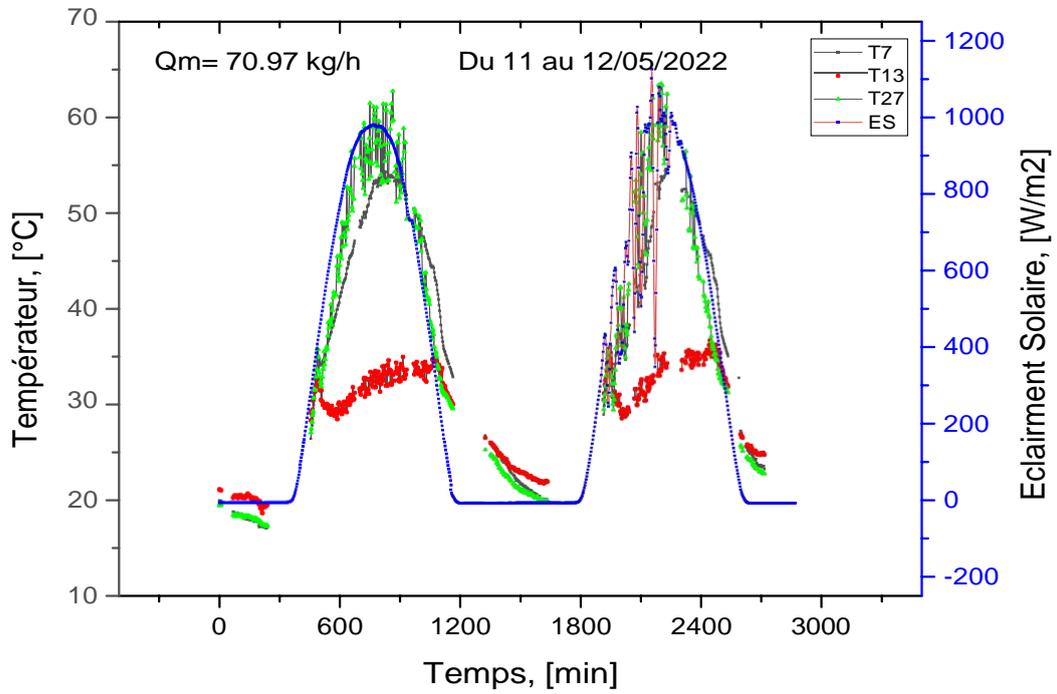


Fig IV.8 : différentes positions des thermocouples dans les prototypes de séchoir solaire de type indirect avec système de stockage d'énergie thermique (A) et avec chicanes (B).

✓ Débit maximum ($Q_m=70.97$ kg/h) :



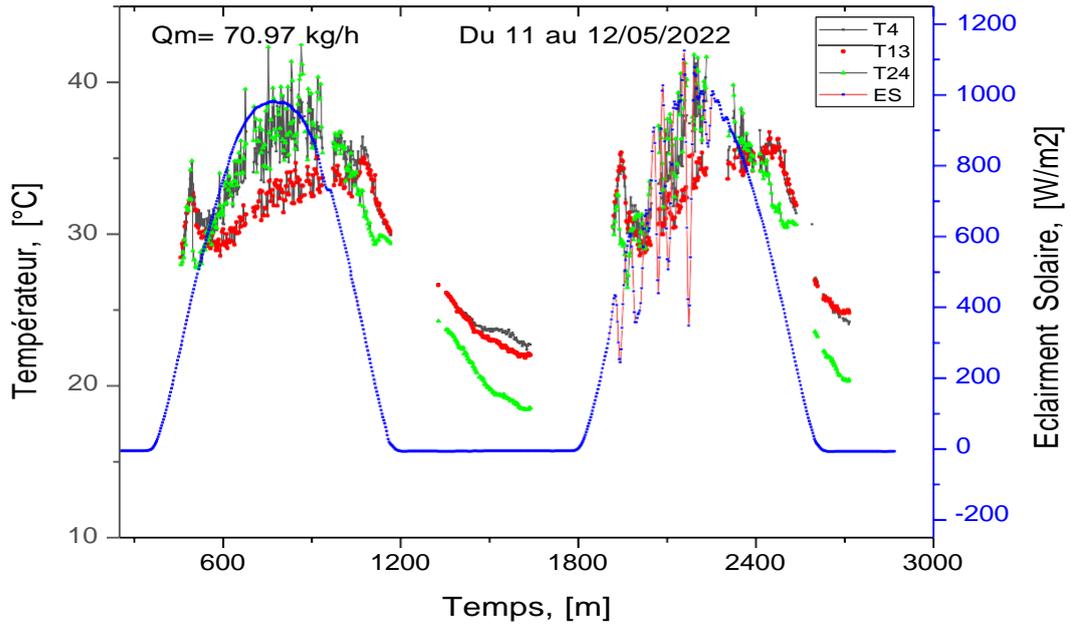
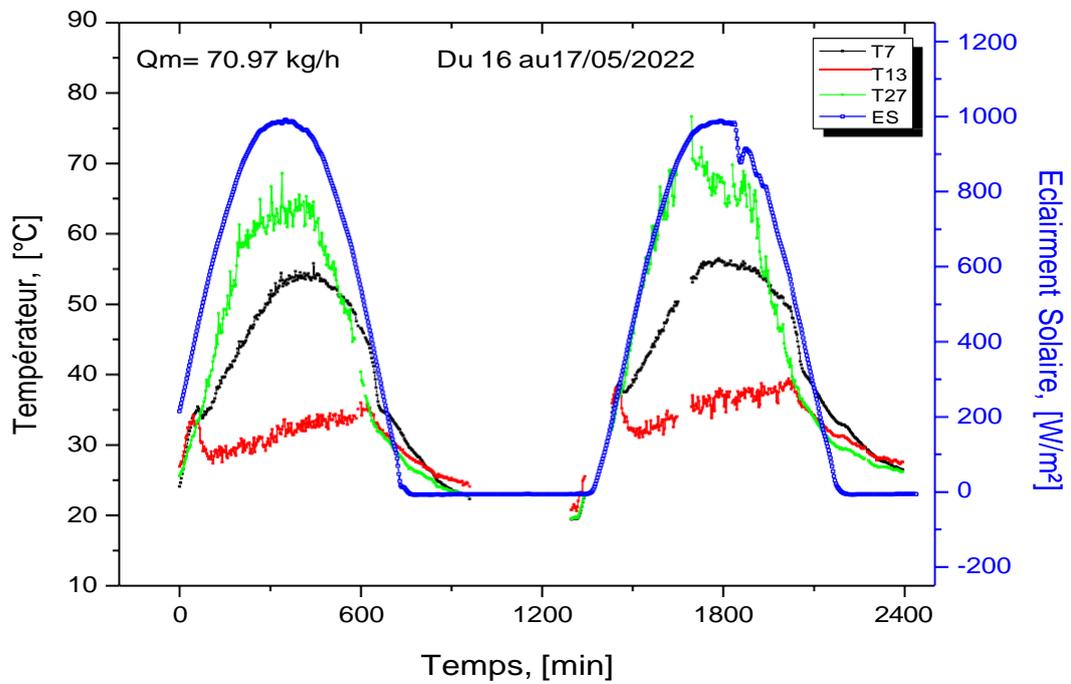


Fig IV.9: Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27, (voir FigIV.3) pour les journées du 11 au 12/05/2022

✓ Débit moyen ($Q_m=35.48$ kg/h) :



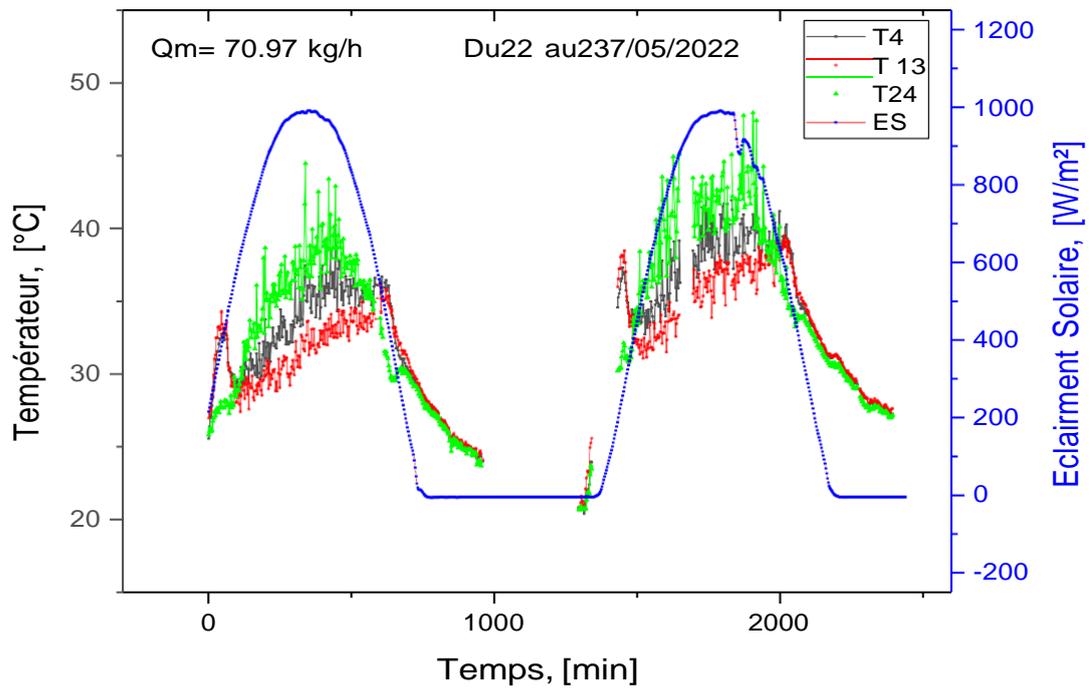
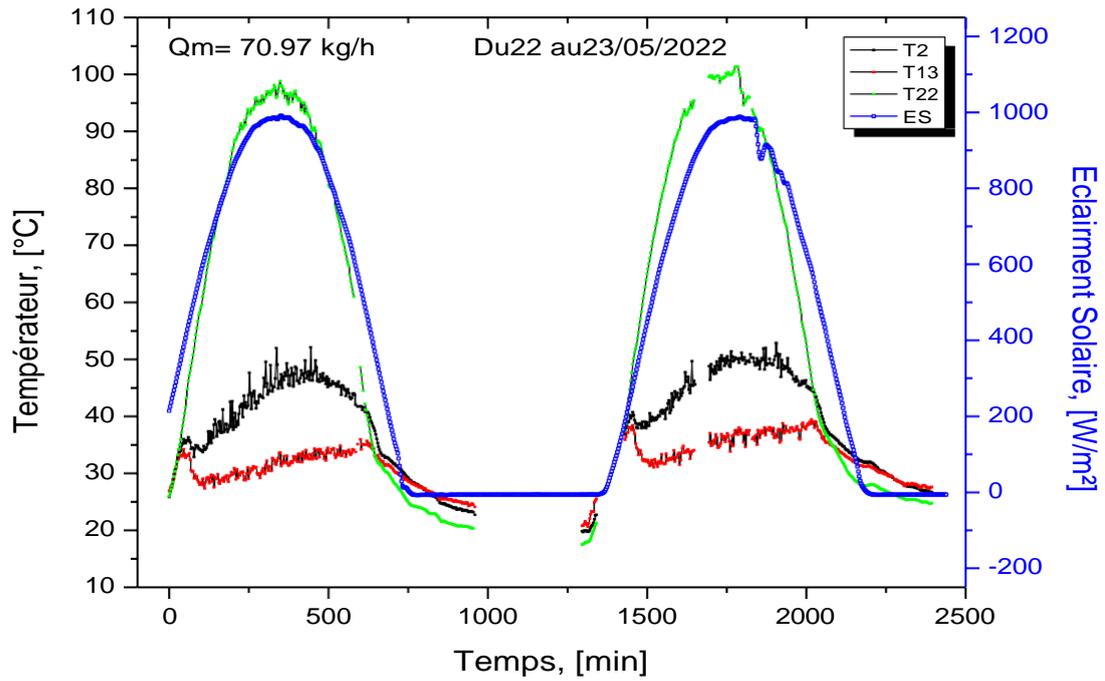
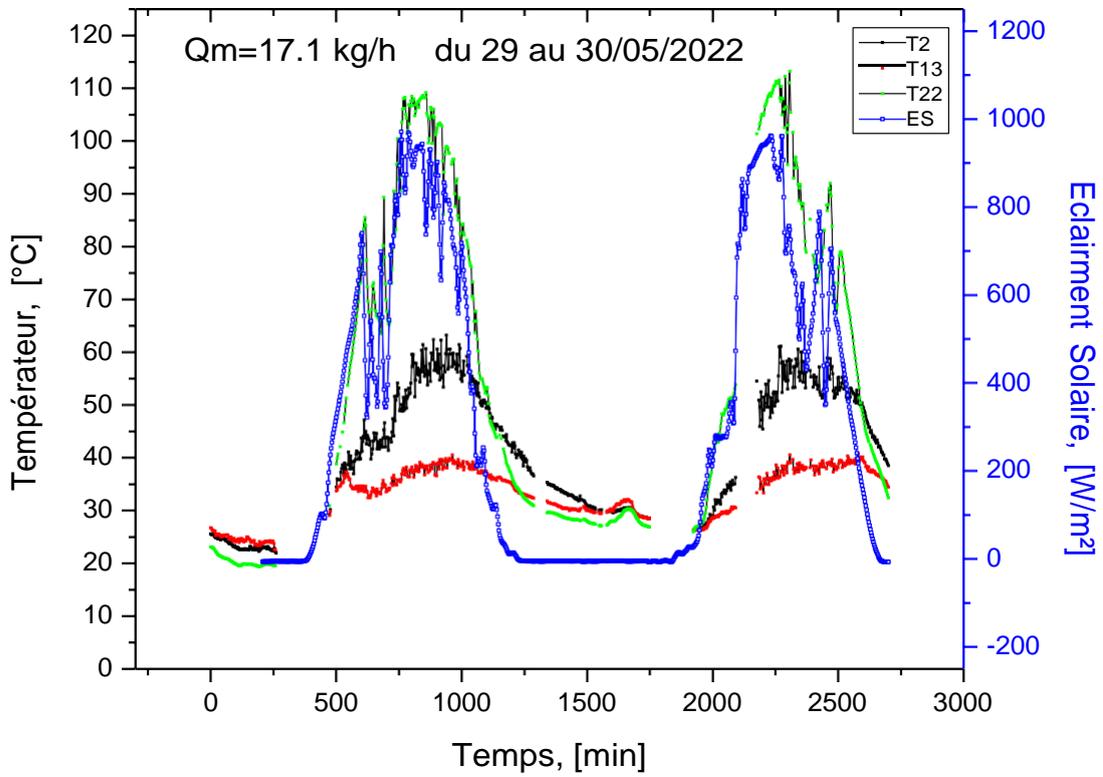
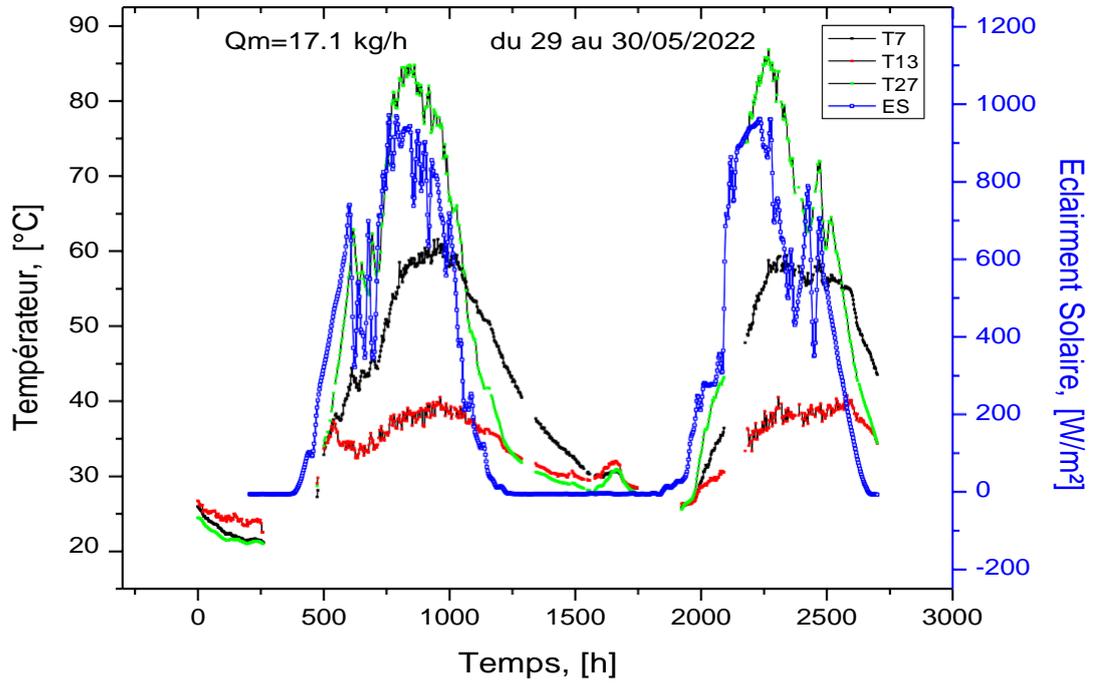


Fig IV.10: Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27, (voir Fig IV.3) pour les journées du 16 au 17/05/2022

✓ Débit Minimum ($Q_m=17.10$ kg/h) :



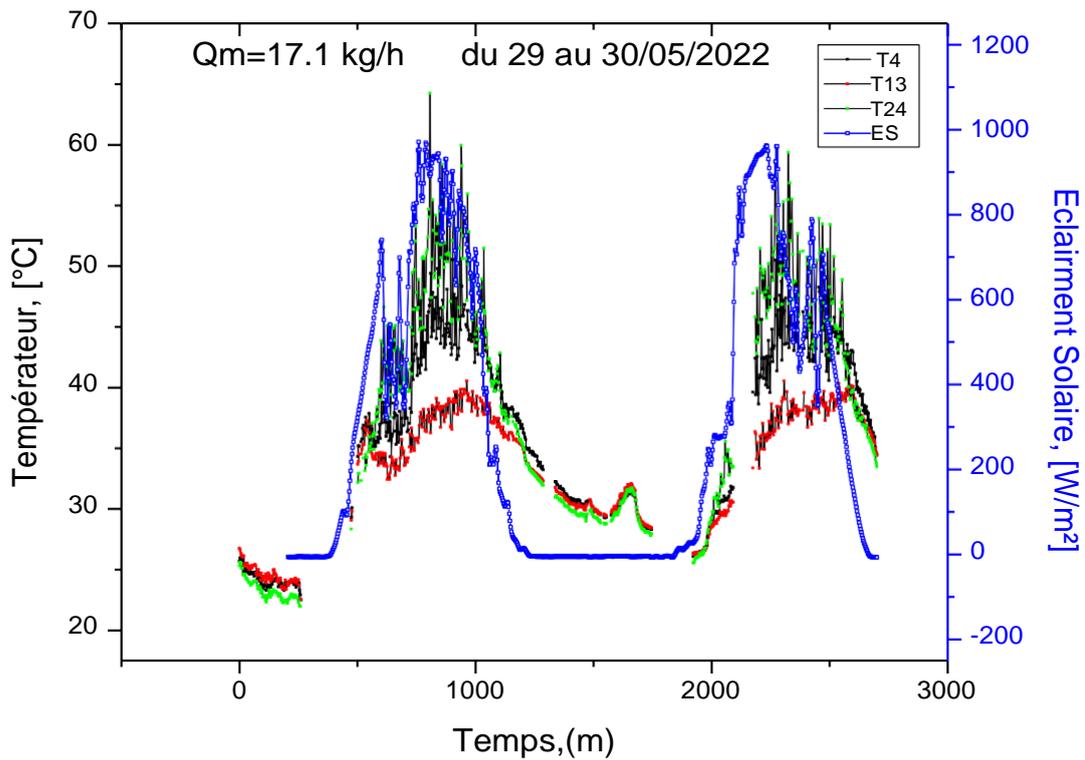


Fig IV.11: Evolution des températures T2, T4, T7, T13, T22, T24, T27, (voir Fig IV.3) pour les journées du 29 au 30/05/2022.

IV.1.3 Séchage des feuilles de bettes et de moringa dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect ainsi que à l'air libre :

IV.1.3.1 Cinétique de séchage des feuilles de moringa le 17 mai 2020:

Une quantité des échantillons de 136.22g pour le prototype de séchage solaire avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et de 135.53g pour prototype de séchage solaire muni des chicane et une quantité de 144.37g a été prélevé pour le séchage à l'air libre. La figure IV.12 montre la cinétique de séchage des feuilles de moringa en termes de teneur en eau à base sèche X en [kg H₂O/kg d.b.] en fonction de temps de séchage. Dans le prototype de séchage solaire muni des chicane, la perte en eau contenue dans les feuilles de moringa a été très rapide (chute de poids), tandis que dans le prototype de séchage solaire avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et dans le séchage solaire à l'air libre, la diminution de la masse des feuilles de moringa et moins rapide. La fig IV.13 présentent une vue photographique d'échantillons de produits frais, séchés à l'air libre et aux prototypes de séchoir solaire indirect.

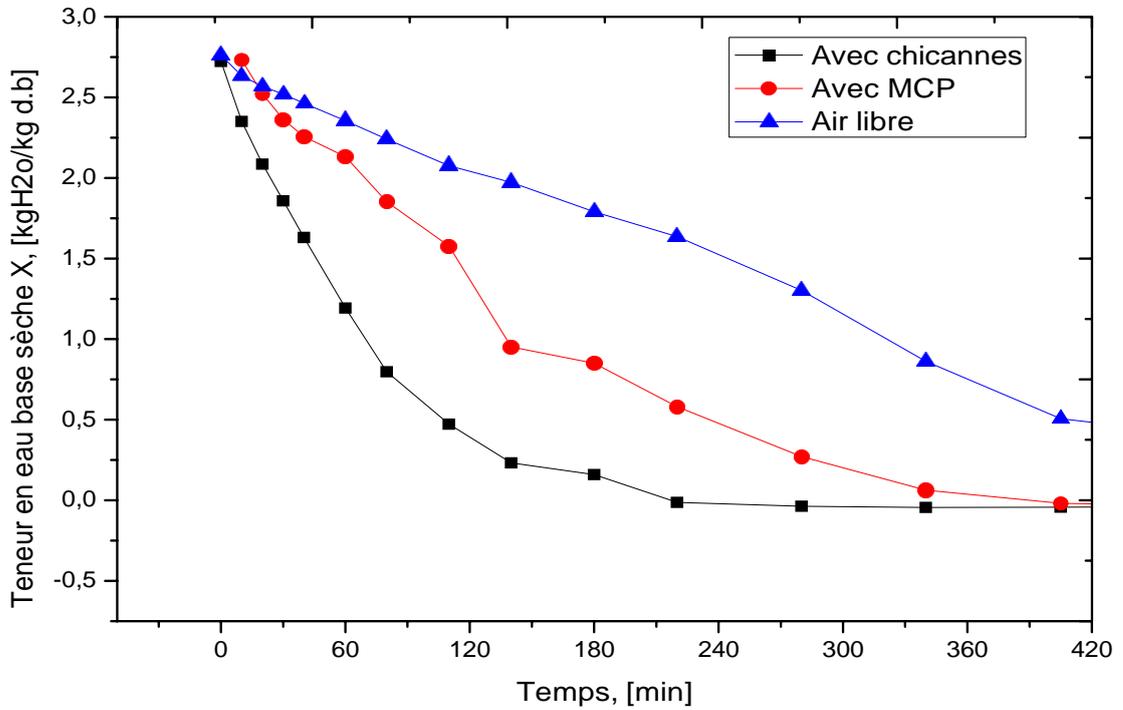


Fig IV.12 – Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les feuilles de moringa

IV.1.3.2 Cinétique de séchage des feuilles de bettes le 17 avril 2020:

Une quantité des échantillons de 172.22g pour le prototype de séchage solaire avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air et de 165.08g pour prototype de séchage solaire muni des chicannes et une quantité de 162.72g a été prélevé pour le séchage à l'air libre. La figure IV.14 montre la cinétique de séchage des feuilles de bettes en termes de teneur en eau à base sèche X en [kg H₂O/kg d.b.] en fonction de temps de séchage. Dans le prototype de séchage solaire muni des chicannes, la perte en eau contenue dans les feuilles de bettes a été égale à celle de prototype de séchage solaire avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air. Tandis que dans le séchage solaire à l'air libre, la diminution de la masse des feuilles de bettes et moins rapide.



Fig IV.13 Vue photographique d'échantillons des feuilles de bettes et de moringa frais, séchés à l'air libre et aux prototypes de séchoir solaire indirect muni des chicannes et avec MCP

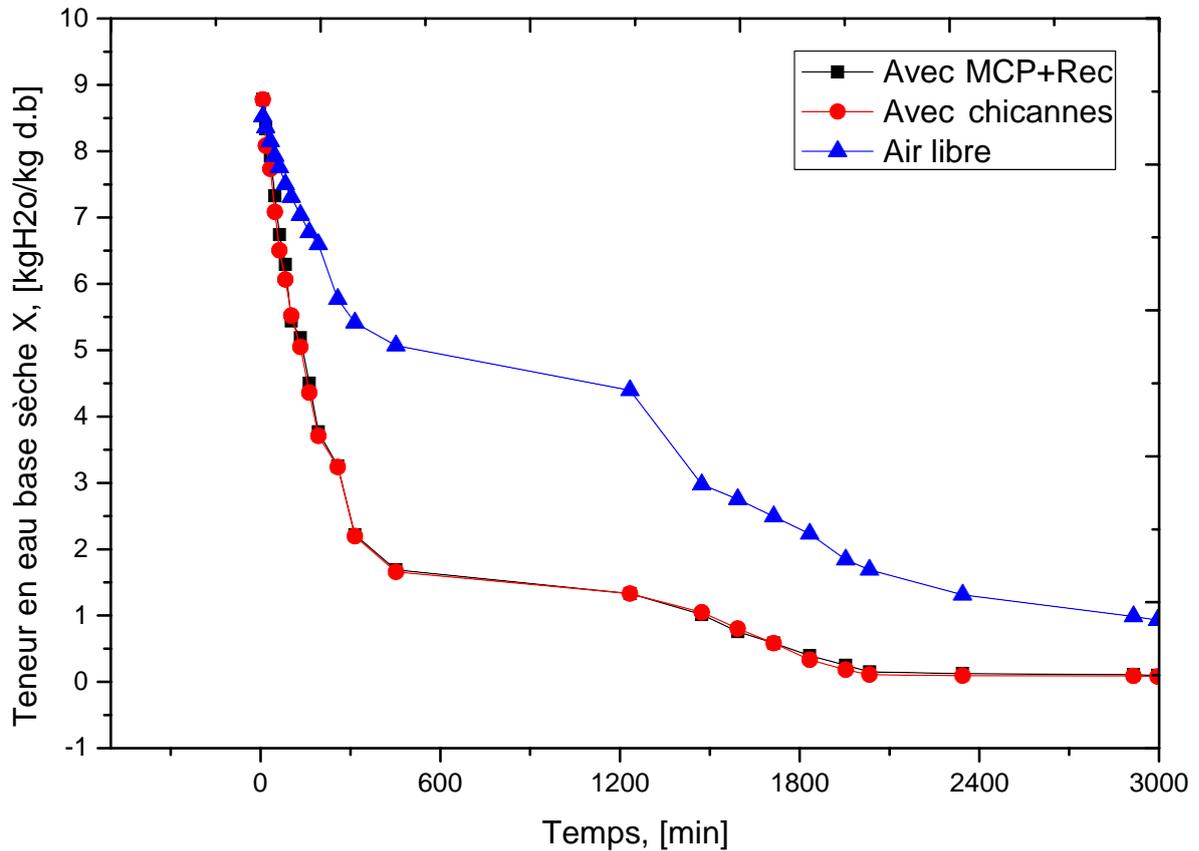


Fig IV.14 – Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les feuilles de bettes.

IV.1.4 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 (Tableaux IV.1 et IV.2). A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans les tableaux IV.1 et IV.2, 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 sélectionnés en jaune dans ces tableaux montrent les valeurs des modèles les mieux adaptés. Dans le cas de prototype de séchage solaire indirect muni des chicannes, comme le montre les tableaux IV.1 et IV.2, les modèles **Two-Terms** et **Diffusion Approximation** ont donné les meilleurs résultats de lissage des données expérimental pour les feuilles de bettes et de moringa respectivement. Ainsi, les modèles **Two-Terms** et **Midilli-Kucuk** ont donné les meilleurs résultats de lissage des données expérimental dans le cas de prototype de séchage solaire indirect avec système de stockage d'énergie thermique pour les feuilles de bettes et de moringa respectivement. Enfin le modèle de **Midilli-Kucuk** a donné le meilleur résultat de lissage des données expérimental pour les feuilles det de moringa dans le cas de séchage solaire à l'air libre.

Tableau IV.1 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les feuilles de bettes :

system	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMS E	3 ²	
			K ₁	K ₂	N	A	b				C
Avec chicanne	01	Newton	0.00517						0.99084	0.0338	0.00115
	02	Page	0.0094		0.8855				0.99076	0.03408	0.00116
	03	Henderson and Pabis	0.0051			0.97283			0.97841	0.05283	0.00279
	04	Modied Page	0.00515		0.88245				0.99076	0.03407	0.00116
	05	Logarithmic	0.00548			0.94637		0.032	0.99376	0.02866	8.21248E-4
	06	Midilli-Kucuk	0.00887		0.8999	0.99908	1.02724E-5		0.99239	0.03244	0.00105
	07	Diffusion Approximati On	8.75055E-4			0.16637	7.93755		0.99605	0.02279	5.19435E-4
	08	Verma et al	0.005	7.83037		0.96118			0.99026	0.0358	0.00128
	09	Two-Terms	0.00675	8.48473E-4		0.83335	0.15789		0.99613	0.02313	0.0107
	10	Two-Terms Exponential	0.00989			0.37189			0.99077	0.03406	0.00116
Avec MCP	01	Newton	0.00517						0.99084	0.03389	0.00115
	02	Page	0.00639		0.95717				0.9911	0.03414	0.00117
	03	Henderson and Pabis	0.00512			0.99454			0.99087	0.03458	0.0012
	04	Modied Page	0.00509		0.95283				0.99111	0.03414	0.00117
	05	Logarithmic	0.0055			0.96736		0.03306	0.99477	0.02679	7.1765E-4
	06	Midilli-Kucuk	0.00678		0.94953	1.00789	1.12065E-5		0.99305	0.03165	0.001
	07	Diffusion Approximati On	0.00516			1.58059E8	1		0.99084	0.03546	0.00126
	08	Verma et al	0.0051	8.36641		0.99221			0.99089	0.03537	0.00125
	09	Two-Terms	0.00656	7.78529E-4		0.86896	0.14216		0.99668	0.02188	4.78821E-4
	10	Two-Terms Exponential	0.00515			0.99845			0.99083	0.03466	0.0012

Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les feuilles de moringa :

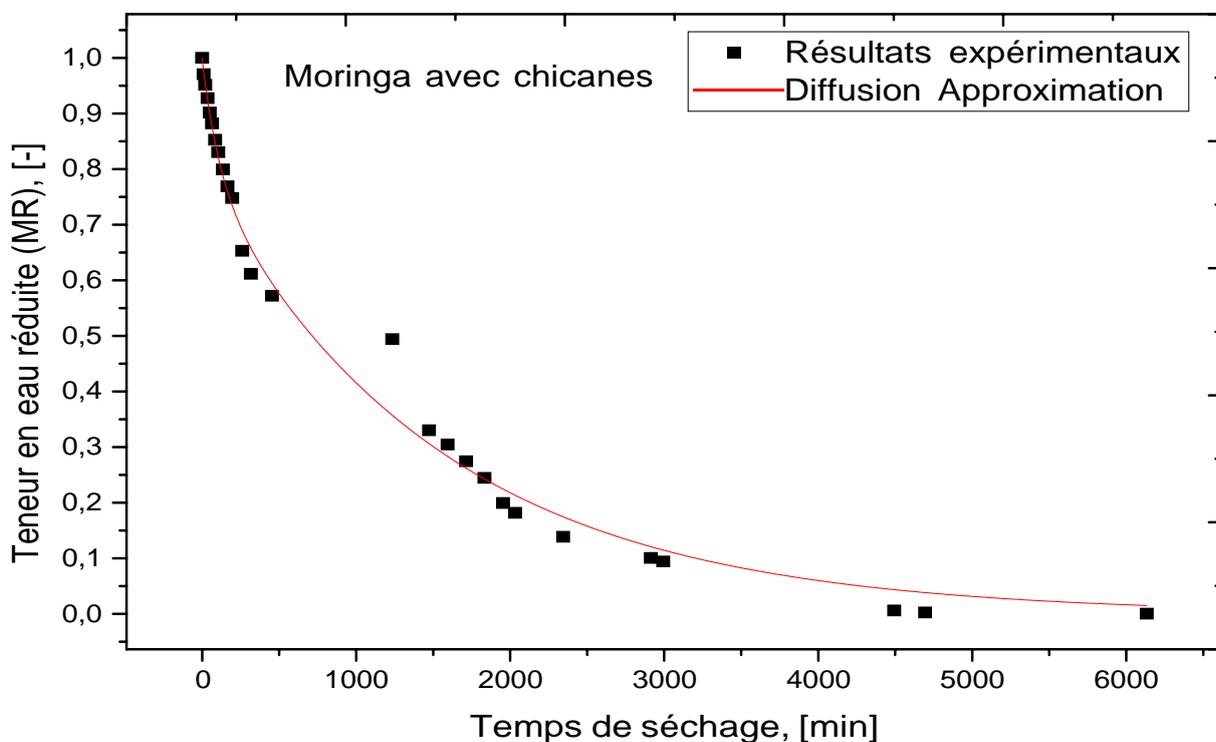
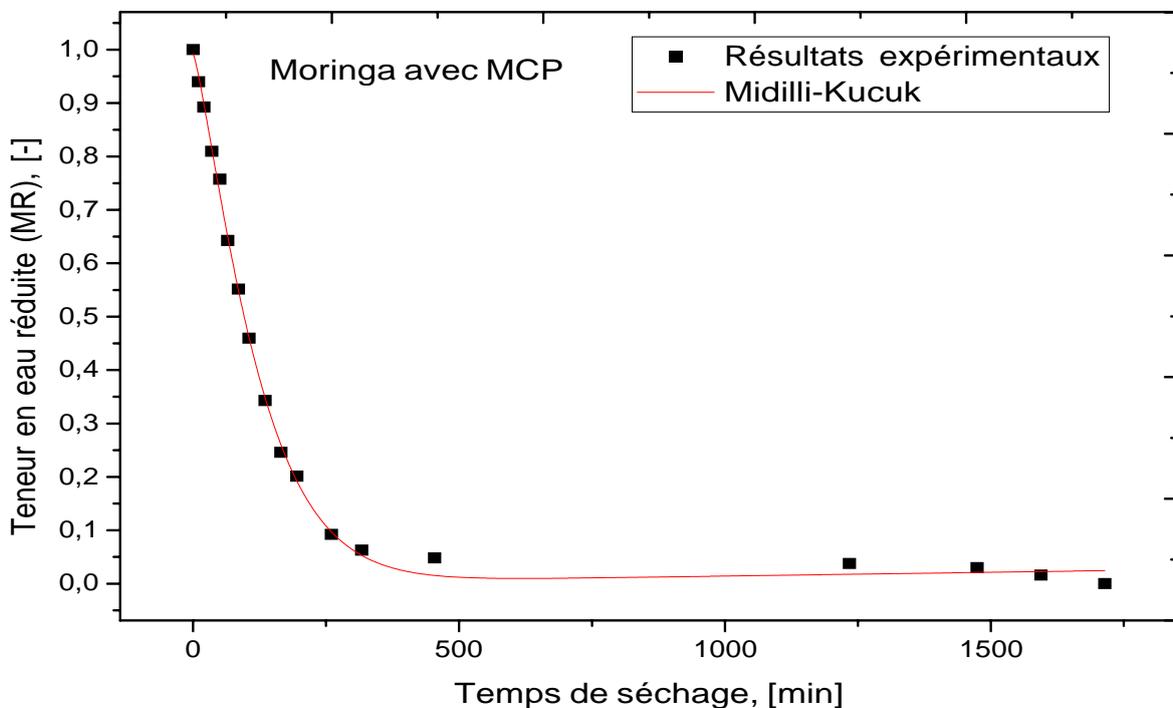
Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RM SE	3 ²	
			K ₁	K ₂	N	A	b				C
Avec chicanne	1	Newton	8.6926E-4						0.957	0.0727	0.00529
	2	Page	0.00631		0.72407				0.986	0.042	0.0018
	3	Henderson	7.55E-4			0.91489			0.978	0.052	0.0027
	4	Modied Page	9.15E-4		0.72596				0.985	0.042	0.0018
	5	Logarithmic	7.41E-4			0.9209		-0.007	0.978	0.05388	0.0029
	6	Midilli-Kucuk	0.00951		0.65483	1.0103	-1.63E-5		0.989	0.039	0.0015
	7	Diffusion Appro	0.00901			0.2068	0.0716		0.990	0.036	0.0013
	8	Verma et al	6.4545E-4	0.0089		0.79296			0.990	0.03613	0.00131
	9	Two-Terms	7.44E-4	602.6963		0.9050	0.0949		0.980	0.05	0.00268
	10	Two-Terms Exponential	0.00563			0.13333			0.980	0.05017	0.00256
Avec MCP	01	Newton	0.00753						0.991	0.032	0.0010
	02	Page	0.0028		1.20829				0.997	0.0187	3.50974E-4
	03	Henderson and Pabis	0.00796			1.04149			0.993	0.02993	8.54054E-4
	04	Modied Page	0.00772		1.20589				0.997	0.0187	3.50886E-4
	05	Logarithmic	0.0081			1.03437		0.008	0.994	0.029	8.84E-4
	06	Midilli-Kucuk	0.00243		1.23737	0.991	1.42E-5		0.998	0.01637	2.62222E-4
	07	Diffusion Approximation	0.00753			1	1		0.991	0.03578	0.00123
	08	Verma et al	0.00821	8.18629		1.06532			0.995	0.02713	7.30734E-4
	09	Two-Terms	-0.00128	0.00801		0.0021	1.03997		0.994	0.03034	9.09192E-4
	10	Two-Terms Exponential	0.01091			1.76465			0.997	0.0177	3.22689E-4

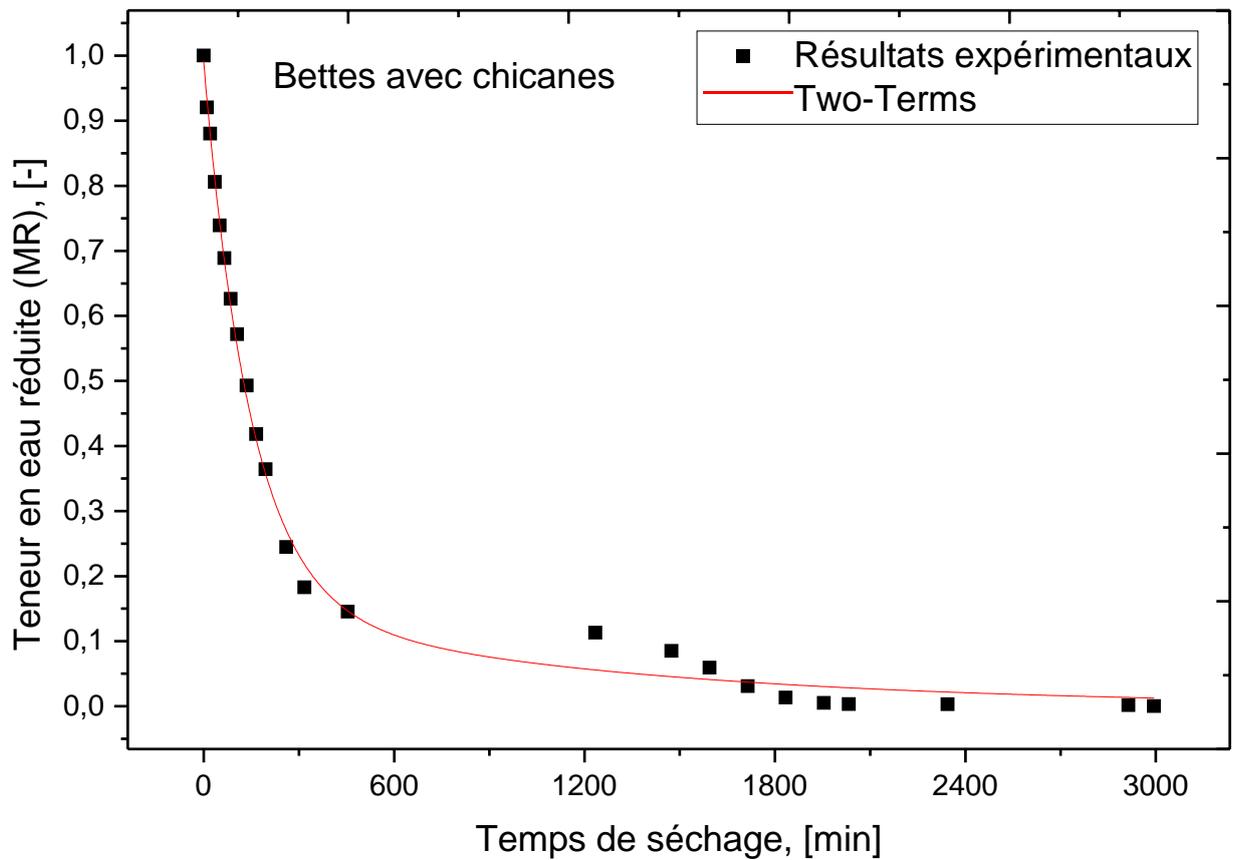
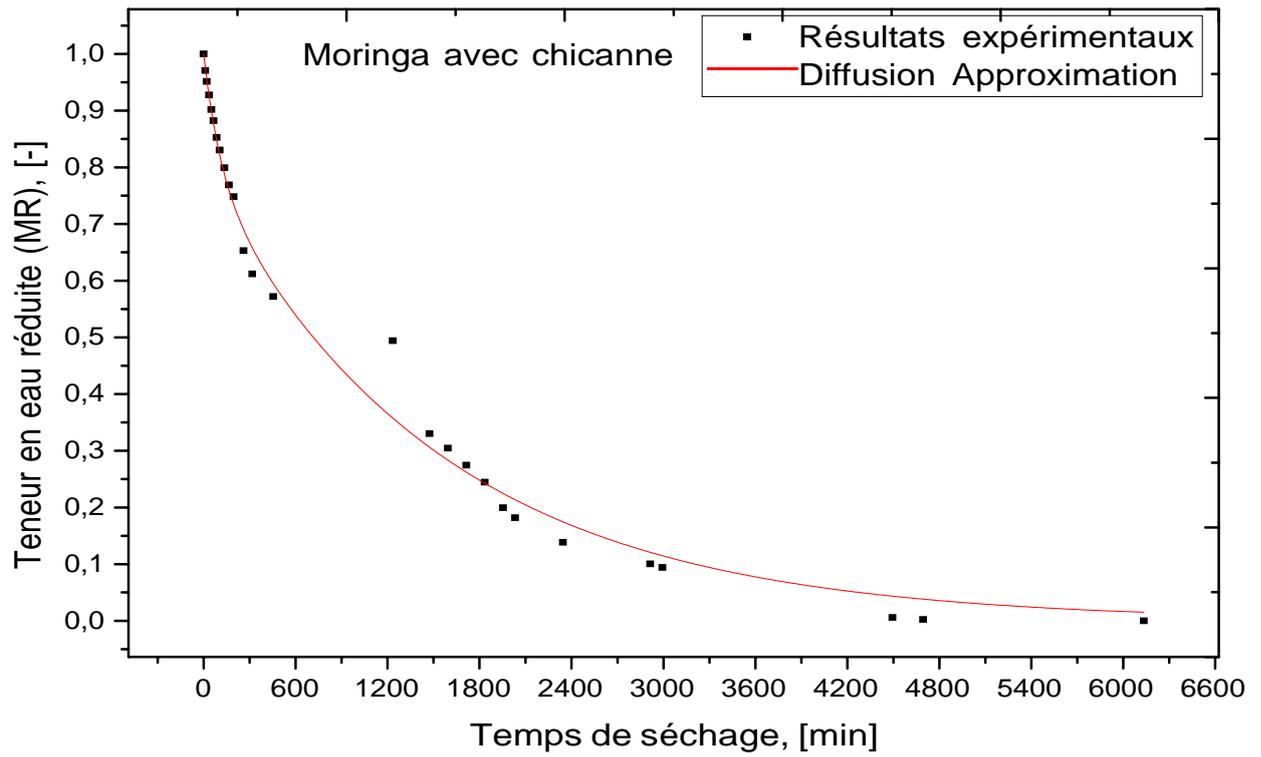
Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour les feuilles de moringa :

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMS E	3 ²	
			K ₁	K ₂	N	A	b				C
Air libre	01	Newton	0,003					0,982	0,049	0,002	0,003
	02	Page	7,17E-4	1,259				0,991	0,037	0,001	7,17E-4
	03	Henderson	0,003		1,019			0,985	0,048	0,002	0,003
	04	Modied Page	7,17E-4	1,259				0,992	0,036	0,001	7,17E-4
	05	Logarithmic	0,003		1,045		-0,0289	0,986	0,048	0,002	0,003
	06	Midilli-Kucuk	1,771E-4	1,493	0,95	-5,668E-8		0,995	0,0295	8,708E-4	1,771E-4
	07	Diffusion Approximati	0,006		-29,955	0,977		0,992	0,036	0,001	0,006
	08	Verma et al	0,003	8,451		0,001			0,983	0,051	0,003
	09	Two-Terms	0,003	0,003		0,51	0,5095		0,983	0,053	0,003
	10	Two-Terms Exponential	0,005		1,783			0,991	0,036	0,001	0,005

IV.1.5 Modélisation mathématique des cinétiques de séchage en couches minces des feuilles debettes et de moringa

Les données expérimentales en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues dans les conditions météorologiques de la zone semi-aride du Ghardaïa ont été converties en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). La variation de la teneur en eau réduite expérimentales avec le temps est modélisée par les meilleurs modèles empiriques obtenus sont présentées aux figures VI.15.





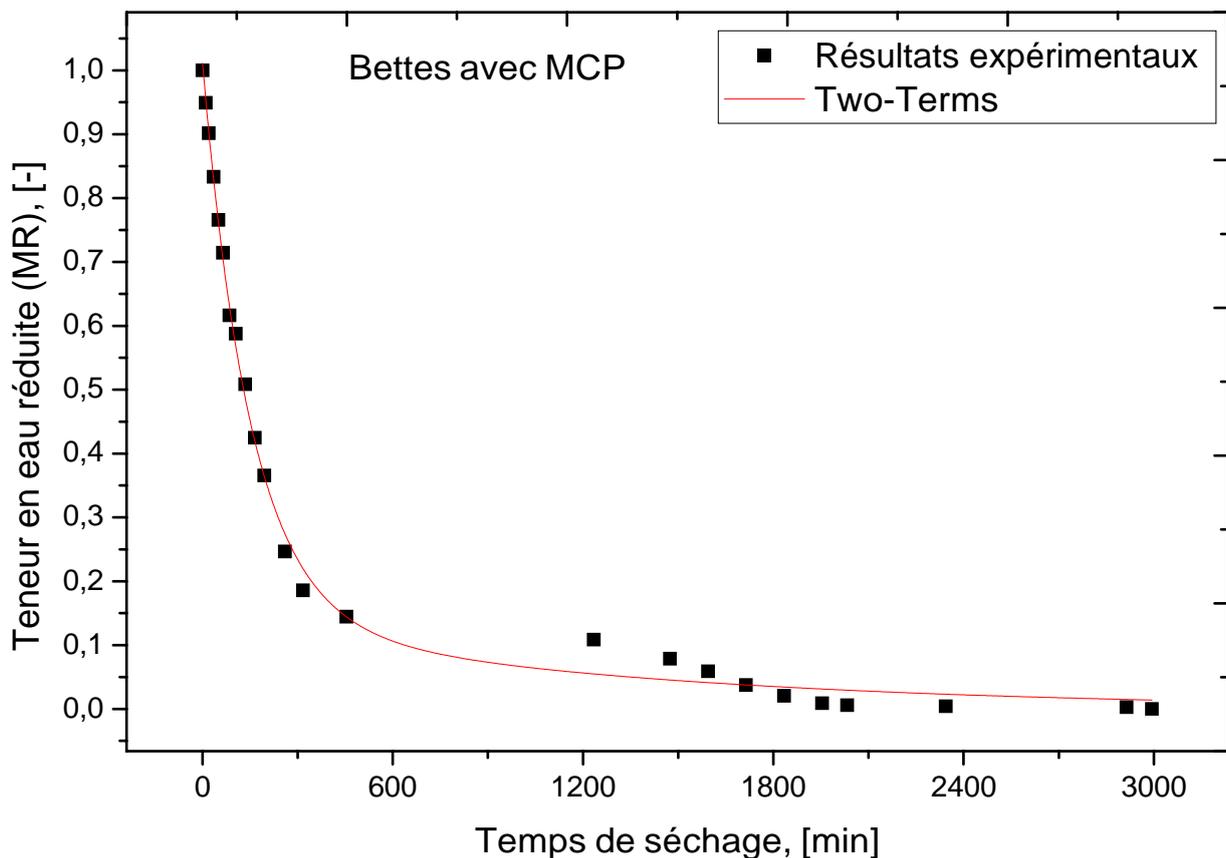


Figure IV.15 Teneur en eau réduite (MR) versus le temps de séchage, on compare les valeurs expérimentales avec les courbes d'ajustement à travers les meilleurs modèles empiriques obtenus : Two-Terms, Midilli-Kucuk et Diffusion Approximation pour les feuilles de bettes et de moringa.

IV.1.6 Détermination de la diffusivité effective de l'eau des feuilles de bettes 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 la figure VI.15, avec L la demi épaisseur des échantillons des feuilles de bettes et de moringa.

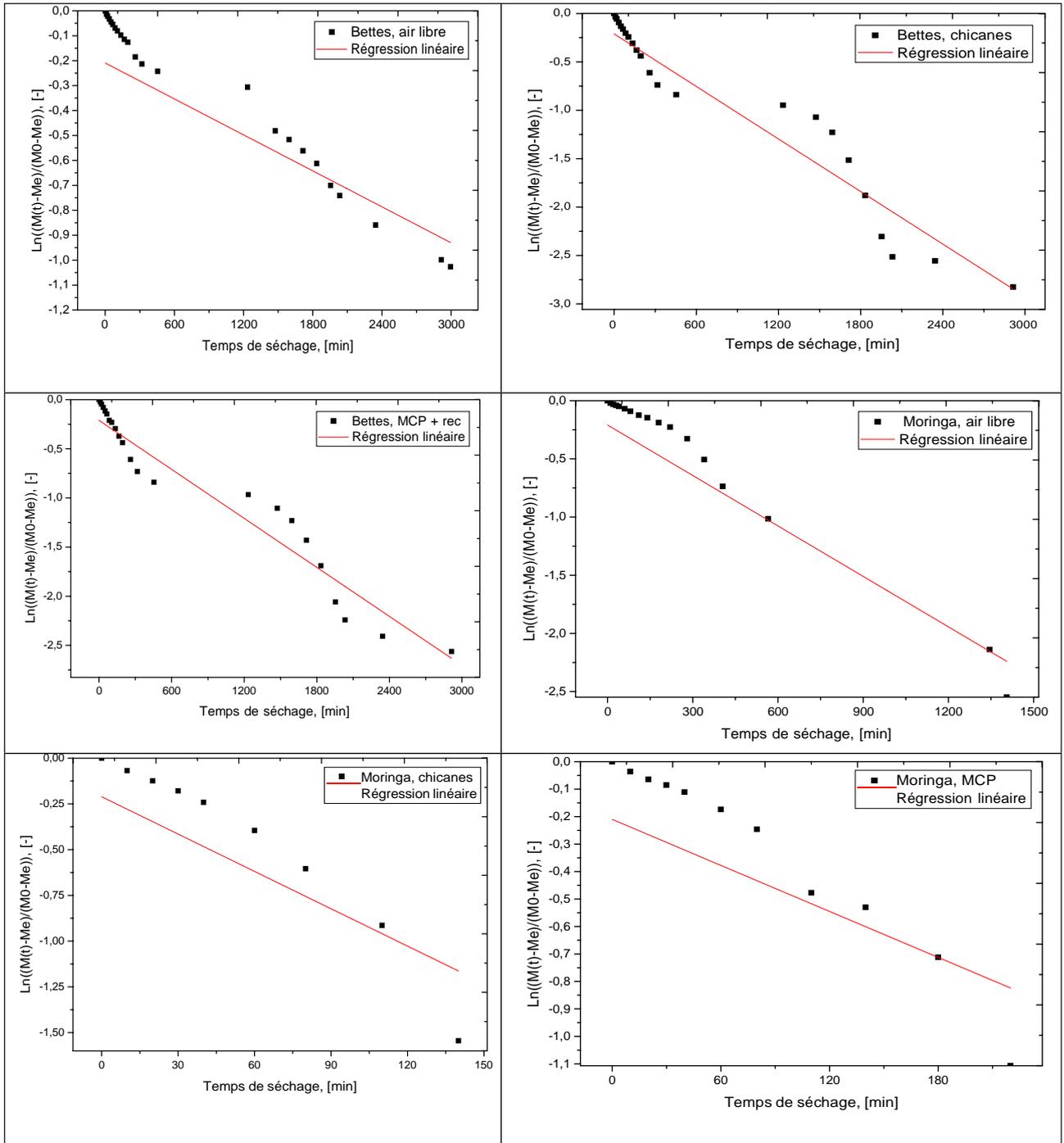


Figure IV.12 Logarithme de la teneur en eau réduite ($\text{Ln}(MR)$) versus le temps de séchage, on compare les valeurs expérimentales avec les courbes d'ajustement à travers le modèle linéaire pour les feuilles de bettes et de moringa séchées sous différents procédés de séchage solaire.

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.3 et VI.4 pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives (D_{eff}) lors du séchage des échantillons des feuilles de bettes et de moringa ont varié de $1.47366459E-10$ à $1.41039151E-9$ m^2/s dans les deux prototypes de séchoir solaire indirect ainsi que pour le séchage solaire à air libre.

La diffusivité effective de l'humidité dans les feuilles de moringa séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes ($1.41039151E-9$ m^2/s) était supérieure à celle des feuilles de

moringa séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente ($1.13074491E-9$). Ainsi que la diffusivité effective de l'humidité dans l'air libre ($0.5876631E-9$ m²/s), a été notée comme la limite la plus basse par rapport aux autres prototypes de séchoir solaire indirect. Ainsi, la diffusivité effective de des échantillons des feuilles de bettes suit le même ordre" de classement.

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

Procédés de séchage	Diffusivité	R ²	RMSE	X ²
Avec chicanne	1.41039151E-9	0,59357	0.72725	0.5289
Avec MCP	1.13074491E-9	0.84021	0.19405	0.03766
Air libre	0.5876631E-9	0,93541	0,23035	0,05306

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

Procédés de séchage	Diffusivité	R ²	RMSE	X ²
Avec chicanne	3.66611008E-10	0.96597	0.24158	0.05836
Avec MCP	3.36794196E-10	0.97207	0.20269	0.04109
Air libre	1.47366459E-10	0.88246	0.29326	0.086

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives :

L'intégration d'un système de recirculation de l'air de séchage dans le prototype de séchage solaire indirect avec matériaux de stockage thermique par chaleur latente (paraffine wax + Calcium chlorure hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)) 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'examen des deux prototypes de séchoirs solaires indirects avec chicanes et avec système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente et recirculation d'air. Dans ce volet, l'étude a porté sur la conception et la réalisation d'un système de recirculation d'air d'échappement et son intégration dans le séchoir solaire indirect avec stockage d'énergie thermique par chaleur latente. L'étude a évalué les performances du séchoir solaire en fonction de son profil de température. Le deuxième volet porte sur l'étude de la cinétique de séchage des échantillons des feuilles de bettes et de moringa dans des conditions météorologiques variables de la région de Ghardaïa (semi-aride). Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de Master ne traitent qu'une première étape dans l'étude des matériaux de stockage thermique par chaleur sensible et latente intégrés dans le prototype de séchage solaire indirect pour le séchage solaire des produits agroalimentaires. D'autres travaux de recherche expérimentaux ou théoriques méritent donc d'être réalisés au futur dans le but d'augmenter la durée de stockage thermique et d'améliorer les performances de prototype de séchage solaire indirect avec recirculation de l'air d'échappement. 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 indirect. Enfin, une étude expérimentale combinée à la simulation numérique s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation du prototype de séchage solaire indirect avec recirculation de l'air et de nous permet de mieux comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent au cours du séchage.

Références

Bibliographie

REFERENCES:

- [1] M. Agovino, M. Casaccia, M. Ciommi, M. Ferrara, and K. Marchesano, "Agriculture, climate change and sustainability: The case of EU-28" *Ecological Indicators*, 105, pp. 525-543, 2019
- [2] A. K. Babu, G. Kumaresan, V. A. A. Raj, and R. Velraj, "Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, pp. 536-556, 2018
- [3] M. Sandali, A. Boubekri, and D. Mennouche, D. "Improvement of the Thermal Performance of Solar Drying Systems Using Different Techniques: A Review" *Journal of Solar Energy Engineering*, 141(5), 2019
- [4] R. O. Lamidi, L. Jiang, P. B. Pathare, Y. Wang, and A. P. Roskilly "Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review" *Applied energy*, 233, pp. 367-385, 2019
- [5] A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat, and A. Guizani, "Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM" *Journal of cleaner production*, 148, pp. 37-48, 2017
- [6] A. A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, and H. G. ElGohary, H. G. "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer" *Energy Conversion and Management*, 43(16), pp. 2251-2266, 2002.
- [7] K. Sopian, Supranto, M. Y. Othman, W. R. Daud, and B. Yatim, "Double-pass solar collectors with porous media suitable for highertemperature solar-assisted drying systems" *Journal of Energy Engineering*, 133(1), pp. 13-18, 2007
- [8] S. F. Dina, H. Ambarita, F. H. Napitupulu, and H. Kawai, "Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans" *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, pp. 32-40, 2015
- [9] P. N. Sarsavadia, "Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion" *Renewable energy*, 32(15), pp. 2529-2547, 2007
- [10] B. M. A. Amer, M. A. Hossain, and K. Gottschalk, "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana" *Energy conversion and management*, 51(4), pp. 813-820, 2010
- [12] M. Mokhtarian, H. Tavakolipour, and A. K. Ashtari, "Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts" *LWT*, 75, pp. 202-209, 2017
- [13] A. Reyes, A. Mahn, and F. Vásquez, "Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material" *Energy Conversion and management*, 83, pp. 241-248, 2014
- [14] Boussalia Amar ; 27/06/2010 contribution a l'etude de sechage solaire de produits agricoles locaux. universite mentouri – constantine
- [15] Amel 2011.le séchage solaire des produits agricoles. Bulletin des énergies Renouvelables, à publication du centre de développement des énergies renouvelables, CDER N° 21. https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_07.pdf
- [16] G. Youcef ,,"Séchage solaire du raisin, variété sultanine"" thèse de magister 2005. Institut National Agronomique Alger. Algérie
- [17] B. Abdellouahab, Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée mémoire de magistère énergétique, Université Abou-Bekr belkaid-Tlemcen, 06 Juillet 2011

- [18] Warda Belachi ,Application du Sechge Solaire Pour La Conservation des Produits Agro Alimentaires, Université Kasdi Merbah Ouargla15 / 02 / 2009
- [19] A. Slimane“étude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et desertiques ” thèse de doctorat le 13/07/2010, universite hadj lakhdar batna Algérie.
- [20] A. Mouafki, Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [21]. Aumporn Orawan. contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. universite de perpignan via domitia. 7 décembre 2017 (e) (K1)
- [22] B. Amar ‘Contribution a L'etude de Sechge Solaire de produits Agricolles Locaux’’ thèse de magister le 27/06/2010.Universite Mentouri–Constantine Algérie.
- [23] K.Souheyla“ Etude numérique du comportement thermique d’un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d’“énergie” thèse de doctorat le 23 juin2018, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie
- [24] Parikh D, Agrawal GD. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. Int J Res 2011;1:224–31.
- [25] Maiti S, Patel P, Vyas K, Eswaran K, Ghosh PK. Performance evaluation of a small scale indirect solar dryer with static reflectors during non-summer months in the Saurashtra region of western India. Sol Energy 2011;85:2686–96.
- [26] Pangavhane DR, Sawhney RL. Review of research and development work on solar dryers for grape drying. Energy Convers Manag 2002;43:45–61.
- [27] Stiling J, Li S, Stroeve P, Thompson J, Mjawa B, Kornbluth K, et al. Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. Energy Sustain Dev 2012;16:224–30.
- [28] Lingayat A, Chandramohan VP, Raju VRK. Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. Energy Procedia 2017;109:409–16.
- [29] Tedesco FC, Bühler AJ, Wortmann S. Design, construction, and analysis of a passive indirect solar dryer with chimney. J Sol Energy Eng 2018;141(3):0:031015.
- [30] Bennamoun L. Integration of photovoltaic cells in solar drying systems. Dry Technol 2013;31:1284–96
- [31] Kadam DM, Samuel DVK. Convective flat-plate solar heat collector for cauliflower drying. Biosyst Eng 2006;93:189–98.
- [32] El-Beltagy A, Gamea GR, Amer Essa A. Solar drying characteristics of strawberry. J Food Eng 2007;78:456–64.
- [33] Hossain MA, Amer Bmaa, Gottschalk K. Hybrid solar dryer for quality dried tomato. Dry Technol 2008;26:1591–601.
- [34] P. L. Singh, “Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer,” Applied Energy, vol. 88, no. 5. Elsevier BV, pp. 1720–1726, May 2011. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.11.016
- [35] Umayal Sundari A, Neelamegam P, Subramanian CV. An experimental study and analysis on solar drying of bitter gourd using an evacuated tube air collector in Thanjavur, Tamil Nadu. India. Conf Pap Energy 2013;2013:1–4.
- [36] Boughali S, Benmoussa H, Bouchekima B, Mennouche D, Bouguettaia H, Bechki D. Crop drying by indirect active hybrid solar - electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. Sol Energy 2009;83:2223–32
- [37] Midilli A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying

system. *Int J Energy Res* 2001;25:715–25.

[38] A. A. El-Sebaï et S. M. Shalaby, « Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint », *Energy Conversion and Management*, vol. 74. Elsevier BV, p. 109-116, oct. 2013. doi: 10.1016/j.enconman.2013.05.006

[39] M. Mohanraj, « Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions », *Energy for Sustainable Development*, vol. 23. Elsevier BV, p. 165-169, déc. 2014. doi: 10.1016/j.esd.2014.09.001.

[40] R. Daghigh et A. Shafieian, « Energy-exergy analysis of a multipurpose evacuated tube heat pipe solar water heating-drying system », *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 78. Elsevier BV, p. 266-277, nov. 2016. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.06.010.

[41] M. Condorí, G. Duran, R. Echazú, et F. Altobelli, « Semi-industrial drying of vegetables using an array of large solar air collectors », *Energy for Sustainable Development*, vol. 37. Elsevier BV, p. 1-9, avr. 2017. doi: 10.1016/j.esd.2016.11.004.

[42] M. Fterich, H. Chouikhi, H. Bentaher, et A. Maalej, « Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV/T air collector », *Solar Energy*, vol. 171. Elsevier BV, p. 751-760, sept. 2018. doi: 10.1016/j.solener.2018.06.051.

[43] W. Wang, M. Li, R. H. E. Hassanien, Y. Wang, et L. Yang, « Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango », *Applied Thermal Engineering*, vol. 134. Elsevier BV, p. 310-321, avr. 2018. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.115. [34] Erick César L-V, Ana Lilia C-M, Octavio G-V, Isaac PF, Rogelio BO. Thermal performance

[44] T. Dufour « Optimisation énergétique et environnementale de l'intégration des matériaux de stockage dans les systèmes de réfrigération » thèse de doctorat le 11 décembre 2017. Université Pierre et Marie Curie France.

[45] V. David « stockage thermique de protection à chaleur latente intégrée à un récepteur solaire à air pressurisé » thèse de doctorat le 29 janvier 2016. Université de Perpignan Via Domitia. France.

[46] k.nitedem Eric Serge « stockage thermique à base de matériaux locaux pour centrale solaire concentration : cas du pilote csp4 africa » thèse de doctorat le 8 décembre 2017. Université de Perpignan via Domitia, France.

[47] S. Blaise Ekomy, Ango « Contribution au stockage d'énergie thermique e² bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase » l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011

[48] B. Meriem « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique » diplôme de Master. 2016 Université M'Hamed Bougara Boudmerdes Algérie.

[49] A. Soupart-Caron. « Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de Phase » thèse de doctorat le 11 décembre 2015. UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES France.

[50] S. Youcef Oussama « Étude de la convection naturelle dans une enceinte avec des parois contenant des matériaux à changement de phase » thèse de doctorat le 02 mai 2019. Université Abdelhamid ibn Badis De Mostaganem Algérie

[51] A. Gontard, K. Gryska, L. Lallemand « Amélioration de la conductivité Thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.

[52] Eduard Oró Prim « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », Universitat de Lleida, 2013.

[53] S.D. Sharma et K. Sagara « Latent Heat storage materials and system: a Review »

Références Bibliographie

International Journal of Green Energyt 2005.

- [54] Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., & Wang, P. (2014). Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate. *Applied Energy*, 113, 1349-1362.
- [55] L. M. Bal, S. Satya, S. N. Naik, et V. Meda, « Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 1. Elsevier BV, p. 876-880, janv. 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.006.
- [56] A. Orawan « Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase » thèse de doctorat le 7 décembre 2017, Université de Perpignan Via Domitia, France .