

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة غرداية



حاضنة الاعمال لجامعة غرداية

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق

مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر في الهندسة الكيميائية في اطار القرار الوزاري

1275 شهادة تخرج - مؤسسة ناشئة / براءة اختراع

بعنوان:

Etude expérimentale d'un procédé de séchage solaire des
plantes médicinales et aromatiques de la région de Ghardaïa

تحت اشراف:

عبد الوهاب بن صديق
داود جمال

من اعداد الطالبين:

أحمد الشريف كرامي
فاروق حمايمي

الموسم الجامعي : 2022/ 2023



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



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

.../.../...

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de génie des procédés

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie des procédés

Spécialité: Génie chimique

Thème

**Etude expérimentale d'un procédé de séchage solaire des
plantes médicinales et aromatiques de la région de Ghardaïa**

Présenté par :

HAMAÏMI Farouk & KRAMI Ahmed Cherif

Soutenue publiquement le : .../06/2023

Devant le jury composé de :

TRABELSI Amel	MMA	Univ. Ghardaïa	Président
RAACHE Imane	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Laghouiter Oum Kelthoum	MCB	Univ. Ghardaïa	Invité
BENSEDDIK Abdelouahab	MRA	URAER	Encadrant
DAOUED Djamel	Directeur de Recherche	URAER	Co-Encadrant

Année universitaire: 2022/2023

Remerciements

Nous remercions sincèrement Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années académiques pour parvenir à ce succès. Ce travail a été possible grâce aux nombreuses personnes, qui se sont investies soit par leurs contributions scientifiques, soit par leurs encouragements et à qui nous avons le plaisir d'exprimer en quelques lignes toute notre gratitude.

*Nous adressons nos sincères remerciements au directeur de ce mémoire,
Monsieur*

Dr. Benseddik Abdelouahab

Dr. Kherrafi Mohammad Abdelbassit

Pour avoir accepté de superviser ce travail et apporté sa vision avisée, ses aides énormes, ses conseils, ses suggestions, ses encouragements continus et le temps qu'il nous a accordé pour nous faire bénéficier de ses connaissances scientifiques, et de ses conseils avisés, qui ont alimenté nos idées.

Nous tenons à remercier l'équipe du Laboratoire Systèmes Energétiques pour l'Agriculture pour leur aide continue et leurs efforts à notre égard afin de mener à bien nos travaux.

Nous adressons également nos sincères remerciements à

Dr. Badji Ahmed et M. Ben AbdeRahmane MahfouD,

Qui ont été à nos côtés dans la mise en œuvre et la réalisation du projet dans ce domaine.

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

Chers membres de la famille, parents et amis, nous vous remercions tous pour vos soutiens continus, vos participations et vos encouragements tout au long des années scolaires.

Dédicace

Dans le parcours de la vie scolaire, les efforts et la réussite scolaire culminent dans un moment exceptionnel et distinctif, qui est notre moment de fin d'études.

Je rends hommage et gratitude à mes parents bien-aimés, qui ont été le principal pilier de ma vie et une source constante de soutien et d'inspiration. Je ne peux pas ignorer les grands efforts qu'ils ont déployés pour me soutenir et me guider vers le succès. Je tiens également à exprimer ma gratitude à mes frères et sœurs qui ont été des compagnons inspirants et une source de force pour moi.

A mes sœurs :

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès; Hanan, Souad, Miada, Zahiya et Khaira, je vous aime tellement.

A mes frères ;

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès; Muhammad, Jalal, Bassem. Je t'aime tellement.

A mes amis ;

Krami Azeddine, Krami Ousama, Khadayesh Jamal, Bin Alia Muhammad, Sebagag Slimane et Sebagag AbdeRazak. Merci pour toutes ces années que nous avons partagées ensemble, je t'aime

Ahmed Cherif

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents :

Aucun remerciement ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel, ma reconnaissance et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter.

A mes sœurs :

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès ; khaoula , messaouda , je vous aime beaucoup.

A mes frères ;

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès ; Khaled, Noureddine , je vous aime beaucoup.

A mes amis ;

Midou , yakoub ,yasser , taïer , krimo , hamada , belkheir ,sgheir, souheil , abdennour , abdelaziz ,merci pour toutes les années que nous avons partagé ensemble, je vous adore.

A mon binôm :

Merci pour ton aide, je te souhaite tout le bonheur et de la santé.

Farouk

Résumé

Ce travail a été réalisé au sein de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables. Ce travail vise à comparer les performances expérimentales d'un séchoir solaire indirect, construit en (argile et foin) et équipé d'un capteur solaire avec un séchoir solaire direct similaire sans capteur. Les deux séchoirs solaires ont été conçus, construits et testés dans les conditions météorologiques de la région de Ghardaïa en utilisant des matériaux locaux et peu coûteux. Des tests expérimentaux ont été réalisés avec différentes configurations de charge et de non-charge pour la menthe et le moringa. Les résultats montrent qu'un gain de température de 15°C a été obtenu dans les séchoirs développés pour maintenir des conditions de séchage souhaitables pour les plantes médicinales et aromatiques. Le séchage de la menthe et du moringa a varié entre 520 et 2675 min pour les différents produits séchés dans cette étude. En outre, les deux termes exponentiel et Midilli-Kucuk ont fourni le meilleur ajustement de modèle pour la cinétique de séchage du moringa et de la menthe, respectivement. La diffusivité effective de la teneur en eau a varié de 2,65343E-08 à 3,55234E-09 m²/s au cours des expériences.

Mots-clés : Séchoirs solaires ; Argile ; Foin ; Performance ; Moringa ; Menthe.

ملخص

تم تنفيذ هذا العمل ضمن وحدة البحوث التطبيقية في الطاقات المتجددة. كان الهدف هو مقارنة الأداء التجريبي لمجفف شمسي غير مباشر مصنوع من (الطين و التبن) ومجهز بمجمع شمسي بمجفف شمسي مباشر مماثل بدون مجمع. تم تصميم المجففات الشمسية وبنائها واختبارها في الظروف الجوية لمنطقة غرداية باستخدام مواد محلية وغير مكلفة. تم إجراء الاختبارات التجريبية بتكوينات مختلفة للتحميل وعدم التحميل للنعناع والمورينجا. أظهرت النتائج أنه تم الحصول على زيادة في درجة الحرارة بمقدار 15 درجة مئوية في المجففات المطورة للحفاظ على ظروف التجفيف المرغوبة للنباتات الطبية والعطرية. تراوح تجفيف النعناع والمورينجا بين 520 و 2675 دقيقة للمنتجات المجففة المختلفة في هذه الدراسة. علاوة على ذلك ، فإن النماذج Exponential و Midilli-Kucuk يوفران أفضل نموذج مناسب لحركية تجفيف المورينجا والنعناع ، على التوالي. تفاوتت فعالية محتوى الماء من E-08.65343 إلى E-09 m² / s3.55234 أثناء التجارب.

الكلمات المفتاحية: مجففات شمسية ؛ الطين ؛ التبن ؛ تحسين ؛ المورينجا ؛ نعناع.

Abstract

This work was undertaken in the applied research unit in renewable energies. The aim was to compare the experimental performance of an indirect solar dryer built from (clay and straw) and fitted with a solar collector with a similar direct solar dryer without a collector. Both solar dryers were designed, constructed and tested under meteorological condition of the region of Ghardaia using local and low cost materials. Experimental tests were carried out with different load and no-load configurations for mint and moringa. The results show that a temperature gain of 15°C was achieved in the dryers developed to maintain a desirable drying conditions for medicinal and aromatic plants. Drying mint and moringa varied between 520 and 2675 min for different products dried in this study. Also, two terms exponential and Midilli-Kucuk provided the best model fit for drying kinetics moringa and mint, respectively. Effective moisture diffusivity ranged from 2.65343E-08 to 3.55234E-09 m²/s during the experiences.

Keywords: Solar dryers ; Clay ; straw ; Performance ; Moringa ; Mint.

Sommaire:

Chapiter I:

Introduction générale	1
I.1. Introduction :	3
I.2. Méthodes de séchage des herbes :	3
I.2.1. Séchage solaire :	4
I.2.2. Séchage à l'ombre :	4
I.2.3. Séchage solaire assisté :	6
I.2.4. Séchage à l'air chaud :	7
I.2.4.1. Effet de la température et de l'humidité de l'air sur la qualité des herbes séchées :	7
I.2.5. Lyophilisation (séchage à froid) :	9
I.2.6. Séchage par micro-ondes :	9
I.2.7. Séchage sous vide par micro-ondes :	10
I.2.8. Séchage assisté par pompe à chaleur :	10
I.2.9. Méthodes de séchage hybrides :	11
I.3. Caractéristiques de qualité des herbes séchées :	12
I.3.1. Composés aromatiques :	12
I.3.2. Couleur des herbes séchées :	12
I.3.3. Prétraitements pour le séchage des herbes :	13
I.3.3.1. Blanchiment :	13
I.3.3.2. Champ électrique pulsé (CEP)	13
I.3.3.3. Ultrason	14
I.4. Séchage solaire:	15
I.4.1. Séchoir naturel:	15
I.4.2. Classification des séchoirs solaires :	16
I.4.3. Mode d'écoulement d'air :	17
I.4.3.1. Séchoir solaire passif :	17
I.4.3.2. Séchoir solaire actif :	18
I.4.4. Types des séchoirs solaires :	19
I.4.4.1 Séchoir solaire direct :	19
I.4.4.2 Séchoir solaire indirect :	20
I.4.4.3 Séchoir solaire mixte :	21
I.4.4.4. Séchoir solaire hybride :	22

Chapiter II:

II.1. Travaux antérieurs :.....	23
II.2. Travaux expérimentaux :.....	23

Chapiter III:

III.1 Dispositif expérimental :.....	38
III.2 Description des prototypes développés :	39
III.2.1 Schéma de principe initial des séchoirs solaires	40
III. 3. Composant de prototype :	41
III. 3.1. Armoire de séchage :	41
III.3.2. Capteur solaire :.....	42
III.3.3. Ventilateur :	44
III.4. Instrumentation des prototypes :.....	44
III.4.1. Mesure des températures :	44
III.4.2. Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :	46
III.4.3 Mesure de la vitesse d'air de séchage :	47
III.4.4. Acquisition et traitement des données :	47
III.5. Matériel utilisé dans le laboratoire de l'URAER :.....	48
III.6. Matériels végétaux	50
III.6.1. Moringa :.....	50
III.6.2. Menthe :.....	51
III.7. Protocole de séchage :.....	52
III.7.1. Préparation des échantillons de Moringa :.....	52
III.7.2. Préparation des échantillons de menthe :.....	54
III.8. Modélisation des cinétiques de séchage :	56
III.9. Détermination de la diffusivité effective de l'eau dans le produit :.....	58

Chapiter IV:

IV.1. Comportement thermique des séchoirs solaire direct et indirect :.....	60
IV.2. Performance des séchoirs solaires direct et indirect (Avec et sans produit) :	61
IV.2.1. Direct:	61
IV.2.2. Indirect:.....	62
IV.3. Séchage solaire dans les prototypes de séchoir solaire direct et indirect :	62
IV.3.1. Séchage de le moringa et la menthe :	62
IV.3.2. Vitesse de séchage :.....	64
IV.4. Modèles empiriques du processus de séchage en couche mince :.....	65

IV.5. Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la menthe :.....	69
Conclusion générale	71
Références bibliographiques	73

Liste des figures

Figure I. 1. Séchoir naturel	16
Figure I. 2. Classification des séchoirs solaires	17
Figure I. 3. Schéma d'un séchoir solaire passif	18
Figure I. 4. Schéma d'un séchoir solaire actif	19
Figure I. 5. Le principe d'un séchoir solaire indirect	20
Figure I. 6. Le principe d'un séchoir solaire indirect	21
Figure I. 7. Le principe d'un séchoir solaire mixte	22
Figure I. 8. Séchoir solaire hybride	22
Figure II. 1. Séchoir solaire de type serre	23
Figure II. 2. Représentation schématique du séchoir solaire	24
Figure II. 3. Système de séchage solaire intégré au toit	25
Figure II. 4. Illustration du séchoir solaire	26
Figure II. 5. (a) Diagramme schématique du montage expérimental et (b) une photographie du montage expérimental.....	26
Figure II. 6. Photographie du séchoir solaire direct	27
Figure II. 7. Séchoir solaire transpiré non vitré	28
Figure II. 8. Récipient pour sécher les plantes médicinales à l'air libre	28
Figure II. 9. Schéma de base du séchoir pour plantes médicinales	29
Figure II. 10. Séchoir solaire tunnel à effet de serre.....	30
Figure II. 11. Photographie de la configuration expérimentale du système MPSAHC.....	31
Figure II. 12. Montage expérimental	31
Figure II. 13. Image des séchoirs solaires	32
Figure II. 14. Image du séchoir solaire indirect	32
Figure II. 15. Configuration expérimentale d'un séchoir tunnel solaire amélioré par un système PV	33
Figure II. 16. Schéma de principe des composants du système de séchoir solaire hybride	34
Figure II. 17. DPSAD avec et sans énergie infrarouge	35
Figure II. 18. Vue photographique d'un séchoir solaire à convection forcée en mode mixte	36
Figure II. 19. Séchoir solaire indirect	37
Figure II. 20. Schéma de principe du séchoir solaire à grande échelle	38
Figure II. 21. Photographie d'un séchoir solaire indirect actif solaire PV	38
Figure III. 1. Schéma de principe préliminaire d'un séchoir solaire direct.....	40
Figure III. 2. Schéma de principe initial d'un séchoir solaire indirect.....	40
Figure III. 3. Prototypes de séchoir solaire de type indirect.....	41
Figure III. 4. Prototypes de séchoir solaire de type direct.....	41
Figure III. 5. Photographie de la chambre de séchage.....	42
Figure III. 6. Étapes de construction de capteur solaire	43
Figure III. 7. Photographie de ventilateur.....	44
Figure III. 8. Instrumentation des séchoirs solaires	46
Figure III. 9. Photo de l'équipement de mesure du rayonnement, de la température et de l'humidité relative de l'air entourant l'unité d'énergies renouvelables (URAER)	47
Figure III. 10. Anémomètre Testo 440	47
Figure III. 11. Photographie de système d'acquisition et de traitement des données.....	48

Figure III. 12. Photographies de dessiccateur utilisé dans le processus pour déterminer la teneur en eau initiale.....	49
Figure III. 13. Photographies du l'etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche	49
Figure III. 14. Balance KERN ABT	Figure III. 15. Balance KERN PCB 3500-2.....
50	50
Figure III. 16. Le moringa	51
Figure III. 17. La menthe.....	52
Figure III. 18. Préparation de le moringa au laboratoire	53
Figure III. 19. Photographie de Moringa pendant le séchage.....	53
Figure III. 20. Préparation de la menthe au laboratoire.....	54
Figure III. 21. Photographie de Menthe pendant le séchage	55
Figure IV. 1. Variations de la température ambiante et du rayonnement global au cours des journées d'essai	61
Figure IV. 2. Variation de la température au centre et sortie de séchoir solaire direct	61
Figure IV. 3. Variation de la température au centre et sortie de capteur solaire	62
Figure IV. 4. Variation de la température au centre et sortie de séchoir solaire indirect	62
Figure IV. 5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour le Moringa.....	63
Figure IV. 6. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la Menthe	64
Figure IV. 7. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (kg water/kg db)	65
Figure IV. 8. Variation de la teneur en eau réduit en fonction de le temps séchage, modélisé par les modèles empiriques les plus approprié (moringa)	67
Figure IV. 9. Variation de la teneur en eau réduit en fonction du temps séchage, modélisé par les modèles empiriques les plus approprié (menthe)	69

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Effets des prétraitements sur la qualité des herbes séchées.....	14
Tableau III. 1. Equations empiriques pour décrire la cinétique de séchage solaire en couches minces d'un produit.....	56
Tableau IV. 1. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage pour le Moringa	66
Tableau IV. 2. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage pour la Menthe	67
Tableau IV. 3. Résultats statistiques de la diffusivité effective moyenne de le Moringa et le Menthe	69

Introduction générale

Les énergies renouvelables jouent un rôle clé dans l'extension de la technologie agricole aux pays en développement, permettant d'augmenter la productivité des agriculteurs. Les infrastructures limitées de stockage, de transformation et de commercialisation entraînent d'importants gaspillages de fruits et légumes, représentant en moyenne entre 10 et 40 % de la production. La réduction des pertes post-récolte est essentielle pour augmenter la disponibilité alimentaire. Parmi les techniques traditionnelles de conservation, le séchage est particulièrement adapté aux pays en développement, offrant une méthode efficace pour réduire les pertes et compenser les pénuries d'approvisionnement. Les autres techniques comprennent la réfrigération, la congélation, le salage, le sucrage, le fumage, le marinage, la mise en conserve et la mise en bouteille. L'utilisation des énergies renouvelables facilite l'adoption de ces méthodes et contribue à une utilisation durable des ressources agricoles [1].

La déshydratation est la plus ancienne méthode de conservation des plantes médicinales et un processus post-récolte crucial pour réduire la croissance fongique et bactérienne. Dans les pays en développement, les méthodes traditionnelles, en particulier le séchage à l'air libre, sont couramment utilisées. Toutefois, cette technique peu coûteuse entraîne des pertes importantes en raison de la réabsorption de l'humidité dans des conditions climatiques défavorables et de la contamination par les animaux, les rongeurs, les oiseaux, les insectes et la poussière. Elle manque de contrôle scientifique, car les conditions environnementales fluctuent, et les agriculteurs non qualifiés la supervisent. L'exposition directe à la lumière du soleil affecte les composés des huiles essentielles, endommageant la couleur, la texture, l'arôme et la capacité de réhydratation, ce qui se traduit par des produits de qualité médiocre [2]. Pour surmonter ces limites, des méthodes de séchage solaire ont été mises au point. Dans cette approche, le produit est placé dans une armoire à l'intérieur d'un collecteur solaire, qui augmente la température de l'air avant d'entrer dans la chambre de séchage. Le séchage solaire permet d'obtenir des températures plus élevées et des taux d'humidité plus faibles que les méthodes traditionnelles à intensité solaire égale. Il réduit les pertes post-récolte et améliore considérablement la productivité. La déshydratation des plantes médicinales à l'aide de l'énergie solaire devient une solution essentielle aux problèmes de santé mondiaux. Par ailleurs, les méthodes de séchage artificiel peuvent améliorer la qualité du produit en maintenant efficacement les spécifications de séchage souhaitées, mais elles consomment une quantité substantielle d'énergie, ce qui entraîne une augmentation des coûts d'exploitation [2].

La menthe et le Moringa sont des plantes aux caractéristiques et aux usages distincts. La menthe, qui appartient au genre *Mentha*, est une herbe envahissante connue pour ses propriétés

Introduction générale

aromatiques et médicinales. Elle est largement utilisée dans la fabrication et la cuisine, pour traiter diverses affections. Le Moringa, ou Moringa oleifera, est une plante tropicale appréciée pour ses bienfaits nutritionnels et son adaptabilité. Ses feuilles sont riches en vitamines et en minéraux, ce qui en fait un complément précieux à l'alimentation. La menthe et le Moringa offrent chacun des avantages uniques, qu'il s'agisse d'aromatiser les plats ou de fournir des nutriments essentiels à la santé générale [3].

L'objectif de ce travail est de comparer les performances expérimentales d'un séchoir solaire indirect en argile et d'un séchoir solaire direct similaire. Les deux séchoirs solaires ont été conçus, construits et testés dans les mêmes conditions météorologiques. Les séchoirs développés étaient destinés aux plantes aromatiques et médicinales. Ce mémoire est structuré selon les points suivants:

- Le premier chapitre donne un aperçu général sur les séchoirs solaires, les méthodes de séchage et les caractéristiques de qualité des herbes.
- Dans le deuxième chapitre, une recherche bibliographique présente les travaux expérimentaux réalisés dans le domaine du séchage solaire, notamment les séchoirs solaires directs et indirects pour les herbes médicinales et aromatiques.

I.1. Introduction :

Le séchage est la méthode la plus courante et fondamentale pour conserver les plantes médicinales et aromatiques après la récolte. Il permet une préservation rapide des qualités médicinales et aromatiques de la matière végétale de manière simple. Même, il y a 4000 ans, dans l'Égypte ancienne, on distinguait déjà la qualité entre les plantes médicinales et aromatiques séchées au soleil et celles séchées à l'ombre. Cependant, à l'époque moderne, des facteurs tels que l'échelle de production, la disponibilité de nouvelles technologies et les normes de qualité pharmaceutique doivent être prises en compte pour le séchage des plantes médicinales et aromatiques [4].

Le séchage naturel, c'est-à-dire le séchage sans utiliser d'énergie supplémentaire sur le terrain ou dans des hangars, ne doit être envisagé que pour de petites quantités. Pour une production à grande échelle, l'utilisation de techniques de séchage est indispensable. Afin de conserver les principes actifs des plantes médicinales et aromatiques, il est recommandé d'utiliser des températures de séchage relativement basses, ce qui entraîne une durée de séchage plus longue. En effet, le processus de séchage représente de 30 à 50 % des coûts totaux de production des plantes médicinales. Il est donc crucial d'identifier les facteurs qui contribuent à ces coûts élevés [5].

En outre, les performances de séchage ont un impact déterminant sur la qualité du produit final et par conséquent, sur sa valeur. Ainsi, des décisions de gestion cruciales doivent être prises pour parvenir à une combinaison optimale de la conception du séchoir, de la méthode opérationnelle, de la consommation d'énergie et du maintien de la qualité du produit. Des recherches sont nécessaires pour fournir des informations permettant de prendre des décisions éclairées pour atteindre des conditions de séchage optimales.

Dans cette optique, le développement de nouvelles techniques de séchage assisté par l'énergie solaire a attiré l'attention des chercheurs, car l'énergie solaire est gratuite et abondante.

I.2. Méthodes de séchage des herbes :

L'influence de la méthode de séchage sur la qualité des herbes séchées est un facteur clé à prendre en compte. Plusieurs méthodes couramment utilisées sont largement connues, telles que le séchage au soleil, le séchage à l'ombre, la lyophilisation et le séchage à l'air chaud. Parmi celles-ci, le séchage à l'air chaud dans une fourchette de température de 40 à 60 °C est souvent employé dans les études de laboratoire sur le séchage des herbes [6].

Cependant, les effets néfastes d'une température élevée sur la qualité des produits séchés ont conduit à la recherche de méthodes alternatives, offrant des avantages par rapport aux méthodes conventionnelles. Des efforts ont été déployés pour développer des techniques de séchage alternatives telles que le séchage solaire assisté, le séchage par micro-ondes, le séchage sous vide par micro-ondes, le séchage assisté par infrarouge, le séchage par pompe à chaleur et le séchage par contact, qui sont déjà utilisées dans l'industrie [7].

I.2.1. Séchage solaire :

La méthode traditionnelle de séchage solaire, employée depuis des temps anciens et encore utilisée de nos jours, permet de sécher divers produits agricoles, notamment les plantes médicinales et les herbes aromatiques, principalement dans les régions tropicales et subtropicales. Lors de ce processus, les herbes fraîches sont disposées sur des séchoirs bien ventilés et exposées directement aux rayons du soleil [8].

Cependant, il convient de souligner que le séchage solaire peut ne pas convenir à certains types d'herbes en raison de son impact négatif sur la qualité du produit final. En effet, cette méthode entraîne une dégradation significative de la couleur et de l'arôme des herbes séchées [9].

Par exemple, lorsqu'il s'agit de camomille romaine, la quantité de composés volatils majeurs tels que l'iso-butyrate d'iso-butyle, l'iso-butyrate de 3-méthyle-butyle et le tiglate de propyle présents dans la camomille romaine séchée au soleil est inférieure à celle des échantillons séchés à l'air chaud (à une température de 40°C) [10]. De même, pour la citronnelle (*Cymbopogon*), on a observé que la quantité totale d'huile essentielle était moindre dans la citronnelle séchée au soleil par rapport à celle séchée à l'air chaud. Quant au basilic (*Ocimum basilicum L.*), le séchage au soleil entraîne une plus grande diminution de la teneur en huile essentielle par rapport au séchage à l'ombre et au séchage à l'air chaud à 40°C. De plus, le séchage au soleil entraîne des dommages plus importants à la surface des feuilles de *Vernonia amygdalina*, avec un rétrécissement des trichomes glandulaires et une diminution plus élevée de la teneur en minéraux par rapport au séchage à l'ombre [11-12].

I.2.2. Séchage à l'ombre :

L'utilisation de l'ombre comme méthode de séchage des herbes repose également sur l'énergie solaire pour fournir de la chaleur. Le processus est similaire à celui du séchage au soleil, à la différence que les herbes sont placées à l'abri de la lumière directe du soleil dans une pièce bien ventilée, avec une humidité faible (par exemple, 22-27% pour *Lippia citriodora*) [13].

Pendant le processus de séchage à l'ombre, l'air ventilé est préchauffé grâce à l'énergie solaire avant de passer à travers les herbes. Cette méthode de séchage présente certains avantages par rapport au séchage au soleil, notamment en préservant les composés sensibles à la lumière et en réduisant les réactions chimiques induites par la lumière, comme l'oxydation. Toutefois, le temps de séchage à l'ombre est plus long que celui du séchage au soleil, qui est déjà considéré comme un processus long [14].

Des études utilisant cette méthode de séchage ont démontré qu'elle permet de préserver la teneur en huile essentielle et la couleur des herbes séchées mieux que d'autres méthodes, telles que le séchage à l'air chaud, le séchage au soleil, le séchage par micro-ondes et la lyophilisation, pour de nombreux types d'herbes. Par exemple, pour le romarin, le séchage à l'ombre préservait mieux la teneur en huile essentielle par rapport au séchage au four à 45°C et au séchage au soleil. Pour le *Tanacetum parthenium*, le séchage à l'ombre était préférable au séchage au four à 40°C et au séchage au soleil. Pour le thym, le séchage à l'ombre surpassait la lyophilisation. Le basilic préservait mieux ses propriétés lors du séchage à l'ombre par rapport au séchage au four à 40 et 60°C ainsi qu'au séchage au soleil. La menthe et la mélisse obtenaient de meilleurs résultats en termes de préservation des trichomes lors du séchage à l'ombre par rapport au séchage par convection à 40°C. Enfin, la sauge conservait davantage ses composés bioactifs lors du séchage à l'ombre par rapport au séchage par convection à 40°C [11-12].

Le séchage à l'ombre préserve également l'intégrité des trichomes. Par exemple, il a été constaté que le séchage à l'ombre provoquait moins de dommages aux trichomes des feuilles séchées de *Lippia Citriodora* par rapport au séchage au four à 60°C et au séchage sous vide à 40°C [15].

En ce qui concerne les composés bioactifs, le séchage à l'ombre a également montré une bonne rétention dans certaines herbes séchées, telles que le misai kucing (*Orthosiphon aristatus*). Le séchage au soleil et le séchage à l'air du misai kucing (40°C) ont été comparés [16], il a été constaté que le produit séché à l'ombre présentait la teneur totale en phénols la plus élevée. De plus, le séchage à l'ombre était la seule méthode de séchage capable de maintenir la teneur en acide rosmarinique proche de celle des herbes fraîches. Cependant, le séchage à l'ombre entraînait une perte significative des propriétés fonctionnelles de certains types d'herbes. Par exemple, l'activité antioxydante totale (AAT) de la menthe poivrée et de la mélisse diminuait de manière significative après le séchage à l'ombre (à une température de séchage de 25 à 32°C pendant 10 jours, et une perte d'acide ascorbique et de caroténoïdes était observée dans les échantillons séchés [17].

De plus, des teneurs plus faibles en composés aromatiques ont été signalées dans certaines herbes séchées à l'ombre par rapport à d'autres méthodes de séchage. Par exemple, dans le cas du thym, il est séché à l'ombre, il présentait une teneur en huile essentielle plus faible que celle du séchage à l'air chaud à 50 et 70°C, du séchage au soleil et de la lyophilisation. Néanmoins, le séchage à l'ombre reste populaire dans les zones rurales ou les petites entreprises en raison de son faible coût d'investissement et de la qualité des produits séchés [18].

I.2.3. Séchage solaire assisté :

Le séchage assisté par énergie solaire est une évolution d'une méthode de séchage bien connue, à savoir le séchage au soleil. La recherche s'est intéressée au développement de nouvelles techniques de séchage utilisant l'énergie solaire, qui est une source d'énergie gratuite. L'objectif de ces développements est d'améliorer l'efficacité énergétique du processus de séchage et de résoudre les problèmes majeurs associés au séchage au soleil traditionnel [19].

Le séchage solaire peut être regroupé en trois catégories principales :

- Le séchage solaire direct.
- Le séchage solaire indirect ou convectif.
- Le séchage solaire mixte ou hybride.

Ces dernières années, de nombreuses études ont été menées sur le développement de séchoirs solaires pour les herbes. Il existe différents types de séchoirs solaires utilisant des techniques telles que la convection forcée dans un tunnel, la convection forcée dans une serre, le lit fluidisé assisté par énergie solaire et les capteurs solaires. Ces séchoirs ont été utilisés pour sécher diverses herbes, notamment le thym, la menthe, la menthe poivrée, le thé de Java (Orthosiphon), le persil, le romarin, le safran et le misai kucing [20-21].

Par exemple, l'utilisation d'un séchoir solaire à serre tunnel pour les feuilles de menthe poivrée a permis de réduire le temps de séchage de 23 à 25% par rapport à un séchoir à serre classique. Un séchoir solaire combinant un capteur solaire et un système de pompe à chaleur a été utilisé pour obtenir des feuilles de menthe séchées de qualité similaire à celles séchées au soleil, en réduisant les dommages thermiques, le rétrécissement et les altérations de goût. Un séchoir solaire intégrant un capteur solaire, un échangeur de chaleur, un réflecteur et des chambres de séchage principales et secondaires, ainsi qu'un chauffe-eau supplémentaire, a permis de réduire de 50% le temps de séchage de la camomille par rapport au séchage direct au soleil, tout en préservant une teneur en huile volatile plus élevée [22]. De plus, l'utilisation d'un séchoir solaire de type bac intégré à un capteur solaire a permis d'obtenir des fleurs de roselle et de citronnelle séchées de meilleure qualité

par rapport à un séchoir solaire classique [23].

I.2.4. Séchage à l'air chaud :

Comme évoqué précédemment, les méthodes de séchage à base d'énergie solaire présentent une limite significative en termes de temps de séchage excessivement longs. Dans l'industrie, la méthode de séchage des herbes la plus couramment utilisée et populaire est le séchage par convection, également connu sous le nom de séchage au four ou de séchage à air chaud, en particulier dans les régions non tropicales où l'ensoleillement n'est pas suffisant pour le séchage à l'air libre ou à l'ombre [24].

L'un des principaux avantages du séchage à air chaud est sa capacité à contrôler précisément le processus. Les producteurs alimentaires ont un contrôle total sur les paramètres tels que la température de séchage, le temps de séchage et la vitesse de l'air, leur permettant ainsi d'ajuster ces paramètres pour obtenir les propriétés souhaitées du produit [24].

De nombreux paramètres de traitement pour différents types d'herbes ont été étudiés et optimisés afin d'améliorer la qualité des produits séchés. Cependant, après le séchage à l'air chaud, on observe généralement une faible teneur en composés volatils [24].

Le séchage à l'air chaud peut entraîner une perte significative de l'arôme des herbes et une température de séchage élevée peut entraîner la dégradation des pigments. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des températures de séchage plus basses, généralement entre 35 et 50°C, pour préserver les composés thermosensibles présents dans les produits séchés. Lors du processus de séchage, le flux d'air chaud à travers les matériaux favorise l'évaporation de l'humidité et des composés volatils, créant ainsi un environnement favorable aux réactions d'oxydation [24].

En outre, le séchage à l'air chaud présente d'autres inconvénients majeurs tels qu'un retrait important des produits et une consommation d'énergie élevée. Étant l'une des méthodes de transformation alimentaire les plus énergivores, des efforts sont déployés pour réduire la consommation d'énergie, améliorer l'efficacité du processus et raccourcir le temps de séchage [24].

I.2.4.1. Effet de la température et de l'humidité de l'air sur la qualité des herbes séchées :

Il est recommandé d'opter pour un séchage des herbes à l'air chaud à une température

comprise entre 40 et 60°C. Cependant, ces températures de séchage peuvent altérer l'arôme des herbes culinaires séchées de manière indésirable [25]. Des résultats similaires ont été constatés pour divers types d'herbes, tels que la menthe poivrée (lorsque les températures de séchage passent de 30 à 70°C), les feuilles de combava (de 50 à 70°C), *Achillea fragrantissima* (de 35 à 45°C) et la sauge (de 30 à 60 °C) [26].

Des températures de séchage supérieures à 60°C entraînent la perte de la plupart des composés volatils, présents dans les produits séchés de nombreux types d'herbes (*Allium schoenoprasum* L., *Anethum graveolens* L., *Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm., *Artemisia dracuncululus* L., *Coriandrum sativum* L., *Levisticum officinale* Koch, *Mentha spicata* L., *Origanum majorana* L., *Petroselinum crispum* (Mill.) Nym. ex AW Hill, *Salvia officinalis* L., *Satureja hortensis* L. et *Thymus vulgaris* L.) [27].

De plus, l'augmentation de la température de séchage à l'air chaud entraîne de nombreux autres changements indésirables dans les produits séchés, tels que l'affaissement des tissus, la perte de composés bioactifs et une altération accrue de la couleur. Dans le cas de *Moringa Oleifera*, les feuilles séchées à 40°C conservent mieux leur couleur que celles séchées à 50 et 60 °C [28].

Sur le plan structurel, dans le cas de *Vernonia amygdalina*, le séchage des feuilles à 60 °C entraîne des dommages significatifs aux surfaces épidermiques des feuilles, une réduction des trichomes et une déformation plus importante de la paroi cellulaire par rapport au séchage à 40 et 50°C [29].

L'augmentation de la température de séchage réduit également la capacité antioxydante de nombreux types d'herbes, tels que le romarin (*Rosmarinus officinalis*), l'agripaume (*Leonuruscardia*) et la menthe poivrée (*Mentha piperita*) (comparaison des températures de séchage de 40 et 70°C), la reine des prés (*Filipendula ulmaria*) et le saule (*Salix alba*) (comparaison des teneurs totales en phénols, salicylates et quercétine aux températures de séchage de 30 et 70 °C) [30].

Cependant, certaines études rapportent que l'augmentation de la température de séchage conduit à une concentration plus élevée de certains composés aromatiques. C'est le cas de la verveine citronnée (*Aloysia citrodora*), où une concentration plus élevée de composés volatils a été obtenue à une température de séchage de 50°C par rapport à des températures de 30 et 40°C [31]. Des résultats similaires ont été observés pour les feuilles de thym séchées à l'air chaud à 30, 38 et 45°C. L'effet positif de l'augmentation de la température de séchage a également été constaté en ce qui concerne la teneur en composés phytochimiques dans le séchage des infusions (contenant

plusieurs types d'herbes, dont *Centella asiatica*, *Mentha arvensis* et *Polygonum moins*), montrant que la teneur en composés phytochimiques (y compris la chlorophylle, l'acide ascorbique, la niacine, la riboflavine et les caroténoïdes) du thé séché obtenu à 70°C était supérieure à celle du thé séché à 50°C [32].

I.2.5. Lyophilisation (séchage à froid) :

La lyophilisation est fréquemment recommandée par diverses études comme une méthode de séchage appropriée pour préserver l'arôme frais des herbes en raison de sa faible température de fonctionnement. Il a été largement constaté que ce processus de séchage permet d'obtenir des herbes séchées, présentant un arôme supérieur par rapport à d'autres méthodes de séchage dans de nombreux types d'herbes, tels que la menthe verte, où la réduction des composés aromatiques est moindre par rapport aux feuilles séchées à l'air chaud. Des résultats similaires ont été obtenus avec les feuilles de basilic lorsque la lyophilisation a été comparée au séchage à l'air chaud à 50°C [33].

La lyophilisation s'est avérée plus efficace pour préserver le rendement et la composition chimique de l'huile essentielle des feuilles de *basilic violet* et vert par rapport au séchage au soleil, au séchage à l'ombre, au séchage à l'air chaud à 40 et 60°C, ainsi qu'au séchage aux micro-ondes à 500 et 700 W. Cependant, la lyophilisation peut entraîner une perte significative des composés aromatiques des herbes séchées. Par exemple, la lyophilisation du persil a été associée à la perte de composants volatils majeurs tels que le p-mentha-1,3,8-triène et l'apiole [34].

Dans le cas du basilic doux lyophilisé (*Ocimum basilicum L.*), une perte d'arôme a été observée par un panel sensoriel. Étant donné le coût d'investissement élevé du processus de lyophilisation, le séchage à l'air chaud a été suggéré comme étant la meilleure méthode de séchage pour le basilic doux. Des résultats similaires ont été observés pour les feuilles de laurier (*Laurus nobilis*) [35].

I.2.6. Séchage par micro-ondes :

Le séchage par micro-ondes est une technique de séchage couramment utilisée dans l'industrie de la transformation des herbes. Cette méthode permet une évaporation rapide de l'eau contenue dans les aliments, ce qui se traduit par des temps de séchage relativement courts par rapport à d'autres méthodes de séchage, telles que le séchage par convection, le séchage à l'ombre, le séchage au soleil et la lyophilisation. De plus, le séchage par micro-ondes présente l'avantage d'une consommation d'énergie réduite lors du processus de séchage [36].

Les produits séchés par micro-ondes ont démontré une réduction moindre du volume, une

meilleure conservation de la couleur et une capacité de réhydratation améliorée par rapport au séchage à l'air chaud. La qualité des produits séchés par micro-ondes est influencée par divers paramètres de séchage tels que la puissance des micro-ondes (exprimée en watts), la durée de séchage, la teneur en humidité initiale du produit et les propriétés diélectriques des matériaux. Par exemple, l'augmentation de la puissance des micro-ondes de 360 à 900 W a permis de réduire le temps de séchage du persil de 64%, et le persil séché par micro-ondes a conservé une bonne couleur avec une teinte légèrement plus foncée que celle du persil frais [37].

I.2.7. Séchage sous vide par micro-ondes :

Récemment, l'attention s'est portée sur la combinaison du séchage par micro-ondes et du processus sous vide. Cette approche consiste à utiliser l'irradiation par micro-ondes comme source de chaleur pour augmenter la température des matériaux alimentaires dans une chambre de séchage sous pression atmosphérique réduite. Le vide créé agit comme une force motrice pour l'évaporation de l'eau, ce qui permet d'obtenir des taux de séchage plus rapides par rapport aux méthodes de séchage par convection et par micro-ondes classiques [37].

En comparaison avec le séchage à l'air chaud, la combinaison du séchage par micro-ondes et sous vide peut réduire le temps de séchage de 70 à 90 % tout en produisant des produits de meilleure qualité. Par exemple, le niveau de thymol présent dans le *Lippia brelandier* séché sous vide par micro-ondes était 1,3 fois plus élevé que celui obtenu par séchage à l'air [38].

I.2.8. Séchage assisté par pompe à chaleur :

Le séchage assisté par pompe à chaleur constitue une avancée dans la technique de séchage, visant à accroître l'efficacité du séchage par convection traditionnel. Il implique l'utilisation d'une pompe à chaleur en tandem avec une unité de séchage d'air pour augmenter la température initiale de l'air entrant. Ce système peut être désigné comme un "séchoir à pompe à chaleur" ou un "séchoir assisté par pompe à chaleur". Adapté au séchage industriel des herbes, il offre une grande flexibilité en termes de vitesse de l'air et de températures de séchage [39].

Un autre avantage majeur des séchoirs à pompe à chaleur réside dans leur capacité à déshumidifier l'air sortant de l'unité de séchage. Cet effet déshumidifiant se produit lorsque la température de l'évaporateur est inférieure au point de rosée de l'air à l'entrée de l'évaporateur [39].

Le séchage par pompe à chaleur présente plusieurs avantages en termes de qualité des produits séchés, notamment sa capacité à contrôler les propriétés de l'air tout au long du processus. Par exemple, lors du séchage solaire du thé java avec une pompe à chaleur (*Orthosiphon aristatus*),

une meilleure maîtrise de l'humidité relative de la chambre de séchage a été observée par rapport aux séchoirs solaires classiques, en particulier la nuit. Le système de déshumidification a réduit l'humidité relative de la chambre de séchage de 10 à 15 % et a maintenu l'humidité relative maximale à 65 %. De plus, le taux de séchage dans la serre solaire intégrant la pompe à chaleur était de 3 à 4 fois supérieur à celui d'un séchoir à serre conventionnel [40].

Une étude portant sur l'effet du séchage par pompe à chaleur sur la qualité d'*Andrographis paniculata* a révélé que le séchage par pompe à chaleur (avec fonction de déshumidification, appelé séchoir déshumidificateur à pompe à chaleur) à des températures de séchage de 40, 50 et 60 °C entraînait des niveaux plus élevés de composés bioactifs tels que l'andrographolide, le néo-andrographolide et les phénols totaux, par rapport aux échantillons séchés à l'air chaud aux mêmes températures de séchage. De plus, le séchage par pompe à chaleur préservait mieux la structure cellulaire d'origine du parenchyme des produits séchés par rapport au séchage à l'air [41].

Dans une étude comparative portant sur l'effet du séchage par pompe à chaleur (à l'aide d'un séchoir déshumidificateur à pompe à chaleur), du séchage par convection et de la lyophilisation sur la qualité du thé java, il a été constaté que le thé java séché par pompe à chaleur à une température de séchage de 60 °C présentait une bonne rétention de la teneur totale en phénols et de l'activité antioxydante, comparable aux produits lyophilisés [41]. De plus, le système de séchoir déshumidificateur à pompe à chaleur réduisait le temps de séchage de 44,8 % par rapport au séchage par convection à la même température de séchage. La microstructure des produits séchés à l'aide du séchoir déshumidificateur à pompe à chaleur révélait une structure cellulaire plus complète et plus régulière que celle des produits séchés par convection [42].

En somme, le séchage par pompe à chaleur présente des résultats prometteurs pour améliorer la teneur en composés bioactifs et les propriétés structurales des produits séchés [42].

I.2.9. Méthodes de séchage hybrides :

Les méthodes de séchage hybrides sont le fruit de la combinaison de deux ou plusieurs techniques de séchage afin de résoudre les problèmes liés au séchage en une seule étape. Dans cette étude, nous avons examiné le séchage assisté par pompe à chaleur, le séchage assisté par énergie solaire, le séchage par micro-ondes et sous vide, ainsi que le séchage par radiofréquence. Ces techniques ont récemment capté l'attention des chercheurs en raison de leur capacité à réduire les temps de traitement, à minimiser la dégradation de la qualité et à maintenir l'efficacité du processus [42].

Actuellement, les trois méthodes qui suscitent le plus d'intérêt sont probablement le

séchage assisté par énergie solaire, le séchage assisté par micro-ondes et le séchage assisté par pompe à chaleur. Cependant, les informations concernant les effets de ces technologies hybrides sur la qualité des herbes séchées restent limitées [43].

I.3. Caractéristiques de qualité des herbes séchées :

Les herbes culinaires séchées sont très appréciées et les consommateurs ont donc des attentes élevées quant à la qualité de ces produits. Les spécifications de qualité pour les herbes séchées ont été établies principalement afin de garantir la sécurité chimique et microbiologique des produits. Cela inclut des critères tels que la teneur en humidité, la densité apparente, la présence de matières étrangères, le niveau d'excréments, la présence d'aflatoxines et de métaux lourds. Parmi ces caractéristiques de qualité, la couleur et l'arôme sont probablement les plus importants, car ils influencent directement sur l'acceptation des produits par les consommateurs [44].

I.3.1. Composés aromatiques :

L'arôme des herbes est principalement attribué à leur huile essentielle, même si elle est présente en petites quantités. Selon l'organisation internationale de normalisation (ISO), l'huile essentielle est définie comme un produit extrait de matières premières d'origine végétale par distillation à la vapeur, procédés mécaniques à partir de l'épicarpe des agrumes, ou par voie sèche. Les huiles essentielles ont de nombreuses applications dans des domaines tels que la pharmacie, la cosmétique, ainsi que les industries médicales et alimentaires [24].

Dans les herbes fraîches, les huiles essentielles sont stockées à la surface des feuilles dans des structures spécialisées appelées trichomes, qui sont des appendices unicellulaires ou multicellulaires situés sur les cellules épidermiques et se développent vers l'extérieur à partir de la surface des organes végétaux tels que les feuilles, les racines ou les écorces [45].

Lors du processus de séchage, la préservation des huiles essentielles dans les feuilles séchées dépend de l'intégrité des glandes sébacées présentes dans le produit séché. Par conséquent, préserver l'intégrité des trichomes ou minimiser les dommages, qui leur sont causés pendant le séchage pourrait améliorer le rendement en huiles essentielles ainsi que la qualité aromatique des herbes séchées. Les composés volatils présents dans les herbes peuvent également être liés sous forme de glycosidique, car ils sont solubles dans l'eau et peuvent s'accumuler dans les tissus végétaux [20].

I.3.2. Couleur des herbes séchées :

De nombreuses études sur le séchage des herbes ont été axées sur l'amélioration de la

couleur des produits séchés ou la réduction des changements de couleur tout au long du processus de séchage et du stockage. La dégradation de la couleur des herbes séchées est principalement due à la dégradation des pigments tels que la chlorophylle et l'anthocyanine. Dans le cas des herbes vertes, la dégradation des chlorophylles est le changement le plus couramment observé lors du processus de séchage [46].

I.3.3. Prétraitements pour le séchage des herbes :

Les prétraitements effectués avant le séchage sont des stratégies de transformation, qui visent à obtenir des herbes séchées de haute qualité, à réduire le temps de séchage et à minimiser la consommation d'énergie. Il est important que ces prétraitements n'apportent qu'une modification minimale aux paramètres du processus de séchage afin de limiter les coûts supplémentaires. (Le tableau I.1) résume les études examinées dans cette section sur l'impact des prétraitements sur la qualité des herbes séchées. Plusieurs prétraitements ont été rapportés comme bénéfiques pour le séchage des herbes, tels que le blanchiment, l'application d'un champ électrique pulsé et le traitement par ultrasons [47].

I.3.3.1. Blanchiment :

Le blanchiment des herbes avant le séchage présente plusieurs avantages, tels que la réduction de la dégradation des couleurs et l'accélération du processus de séchage. Différentes herbes, comme le basilic, le persil et l'aneth, ont montré des taux de séchage plus rapides et une meilleure rétention de la couleur lorsqu'elles étaient blanchies. Cependant, des pertes de teneur en huile essentielle et des effets négatifs sur les propriétés antioxydantes et aromatiques peuvent également être observées. Des techniques de blanchiment variées, telles que l'eau, la vapeur et les micro-ondes, peuvent être utilisées. Le blanchiment sous vide s'est avéré efficace pour maintenir la qualité des composés bioactifs dans les herbes séchées. L'ajout d'agents chimiques, comme le métabisulfite de potassium, peut améliorer la rétention de certains composés. La combinaison de différentes méthodes de séchage avec le blanchiment peut également avoir des effets spécifiques sur la qualité des herbes séchées [48].

I.3.3.2. Champ électrique pulsé (CEP)

Le champ électrique pulsé (CEP) est une méthode non thermique, qui a suscité beaucoup d'intérêt dans la transformation des aliments, y compris le séchage des herbes. Des études ont montré que l'application du CEP peut provoquer une perméabilisation irréversible des cellules végétales, entraînant une augmentation du coefficient de diffusion de l'humidité et une réduction du temps de séchage. De plus, des études ont examiné l'effet de la perméabilisation réversible des

cellules de garde des feuilles de basilic, ce qui a permis d'améliorer la vitesse de séchage, la couleur, l'arôme et la capacité de réhydratation des échantillons traités. Différentes méthodes de séchage ont été étudiées, telles que le séchage à l'air chaud, le séchage sous vide et la lyophilisation. Cependant, il a été observé que les trichomes des échantillons lyophilisés ont été endommagés dans les feuilles traitées au CEP [49].

I.3.3.3. Ultrason

Les ultrasons sont utilisés comme prétraitement non thermique dans le séchage des aliments, y compris les herbes. L'application d'ultrasons de haute puissance favorise un transfert de masse accru sans chauffage significatif. Ce traitement induit la formation de micropores à la surface des matériaux, améliorant ainsi le taux de séchage des herbes. Des études ont montré que le persil traité aux ultrasons présente une teneur plus élevée en composés phénoliques, en chlorophylle et en lutéine. Cependant, le blanchiment à la vapeur reste la méthode de prétraitement préférentielle en termes de contenu en polyphénols et d'activité antioxydante. Les ultrasons ont également été utilisés avec succès comme prétraitement dans le séchage des feuilles de coriandre et de thym, réduisant le temps de séchage et améliorant l'inactivation des micro-organismes [50].

Tableau I. 1. Effets des prétraitements sur la qualité des herbes séchées [48,49,50].

Prétraitement	Couleur	Teneur en chlorophylle	Huile essentielle	Arôme profil compos	Propriétés structurelles	Contenu bioactif
Blanchiment	Couleur améliorée rétention de séché aneth combinaison avec séchage à air chaud, séchage	Amélioré chlorophylle contenu de nombreux produits secs comme le basilic et	Diminution de l'essentiel teneur en huile de l'aneth en combinaison à air chaud séchage, vide	Dégradation de arôme au basilic lorsqu'ils sont combinés à air chaud, micro-ondes, et lyophilisation.	Améliorer la paroi cellulaire intégrité de séché Feuilles de Java séchées avec pompe à chaleur déshumidifi	Préserve le bioactif des composés tels sous forme de lutéine dans persil séché avec

Chapitre I : Généralités sur les séchoirs solaires

	sous vide, et congeler séchage. Amélioré aussi au basilic, coriandre, et persil séché avec de l'air chaud.	persil dans combinaison avec séchage à air chaud.	séchage, et lyophilisation.		er séchage mais augmenter le dommages dus au séchage la structuration de trichomes au basilic séché avec air chaud.	comment-air et la sinensetine et eupatoire en Java thé séché avec convection séchage, chaleur pompe déshumidifié séchage, mixte-mode solaire séchage, et lyophilisation.
Électrique pulsé champ (PEF)	Couleur améliorée rétention de séché basilic piquant séchage à l'air.	Pas de données disponibles	Amélioré le préservation de trichomes au basilic air chaud préalable et séchage sous vide.	Rétention accrue d'arôme composés de basilic séché avec air chaud (uniquement avec réversible perméabilisation	Cellule diminuée effondrement du basilic lorsqu'ils sont combinés à air chaud et séchage sous vide.	Pas de données disponibles
Ultrason	Pas de données disponibles	Amélioré chlorophylle rétention dans persil séché à air chaud	Pas de données disponibles	Pas de données disponibles	Pas de données disponibles	Bioactif préservé composés, tels sous forme de lutéine dans persil séché à air chaud

I.4. Séchage solaire:

I.4.1. Séchoir naturel:

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement. Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes,

pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles [51].

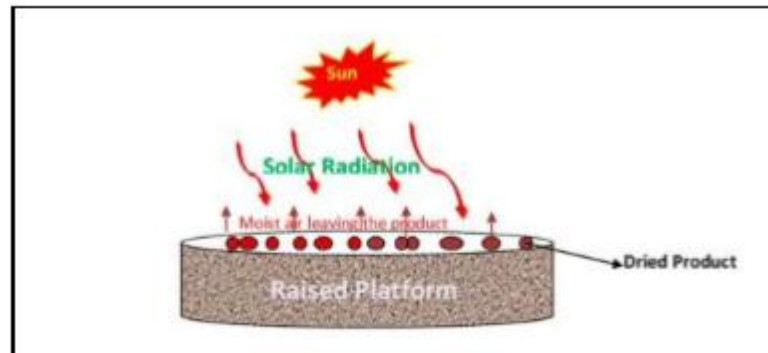


Figure I. 1. Séchoir naturel [51]

I.4.2. Classification des séchoirs solaires :

Différents critères permettent de classer les séchoirs solaires. Selon Bennamou, on peut les classer en deux catégories : le mode actif et le mode passif, chacune étant ensuite divisée en types de mode direct, indirect et mixte. Une autre classification du séchage solaire peut être basée sur le mode de chauffage, qu'il soit direct ou indirect, ainsi que sur la manière dont l'énergie solaire est utilisée [52].

La classification des séchoirs solaires dans ce mémoire repose sur deux critères, comme illustré dans la figure I.2. Ces critères sont la méthode de flux d'air, qui peut être passive ou active, et la méthode de transfert de chaleur du soleil au produit, qui peut être directe, indirecte, hybride ou mixte.

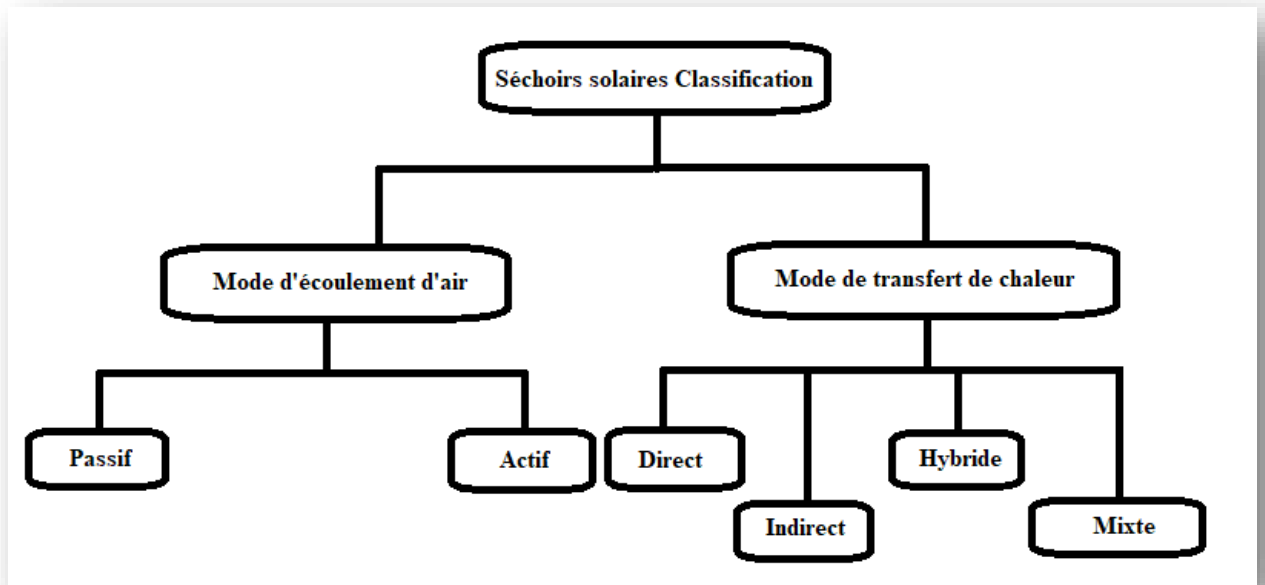


Figure I. 2. Classification des séchoirs solaires [52]

Une présentation de divers types de systèmes de séchoir solaire est réalisée dans ce mémoire. On y passe en revue les principes de fonctionnement et les conceptions, depuis les premiers séchoirs solaires à convection naturelle jusqu'aux versions mises à jour en 2008. Deux groupes principaux de séchoirs solaires ont été identifiés : les séchoirs solaires passifs ou à convection naturelle et les séchoirs solaires à convection active ou forcée [53].

I.4.3. Mode d'écoulement d'air :

Les séchoirs solaires peuvent être divisés en deux groupes : passifs et actifs. Dans le cas d'un séchoir solaire passif, l'énergie thermique est transférée à la chambre de séchage par convection naturelle. En revanche, dans un séchoir solaire actif, des ventilateurs sont utilisés pour transférer la chaleur de la zone de captage solaire vers la chambre de séchage [52].

I.4.3.1. Séchoir solaire passif :

Le séchoir solaire passif, également connu sous le nom de séchoir solaire à convection naturelle, tire son efficacité du mouvement naturel de l'air grâce à la force de flottabilité, aux différences de pression dues au vent ou à une combinaison des deux. Cette technique est largement utilisée, en particulier dans les pays en développement, en raison de son faible coût initial et de sa facilité d'entretien. Il peut être classé selon la méthode de séchage en plein soleil ou la méthode de séchage des produits agricoles avec circulation d'air naturel [54].

Les produits agricoles sont disposés sur le sol ou sur des plateaux afin d'être exposés au rayonnement solaire. Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients, tels que la production de déchets et les pertes de récoltes causées par les conditions météorologiques, les attaques d'insectes et de rongeurs. En plus du séchage solaire en plein air, les séchoirs à circulation d'air naturelle utilisent également un mode de mouvement d'air passif. L'air chauffé circule vers les cultures en cours de séchage grâce à la force de flottabilité, à la pression du vent ou à une combinaison des deux. La figure I.3 présente un schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle. Cependant, les séchoirs solaires passifs ont un taux de séchage plus lent en raison du mouvement d'air limité [54].

Un exemple de séchoir solaire à circulation d'air passive est le séchoir armoire. Des ouvertures sont pratiquées à la base et sur les parties supérieures des côtés pour permettre l'élimination de l'humidité grâce à la flottabilité. Une cheminée est ajoutée pour améliorer l'effet de flottabilité de l'humidité à l'intérieur du séchoir. Il est essentiel de retirer l'humidité du système pour éviter la condensation à l'intérieur du couvercle en verre, ce qui pourrait endommager les produits séchés. Cependant, ce type de séchoir convient au séchage de petites quantités de cultures telles que la banane, l'ananas, la mangue, la pomme de terre, les carottes et les haricots verts. Une décoloration peut se produire dans le séchoir car les produits sont directement exposés au rayonnement solaire [55].

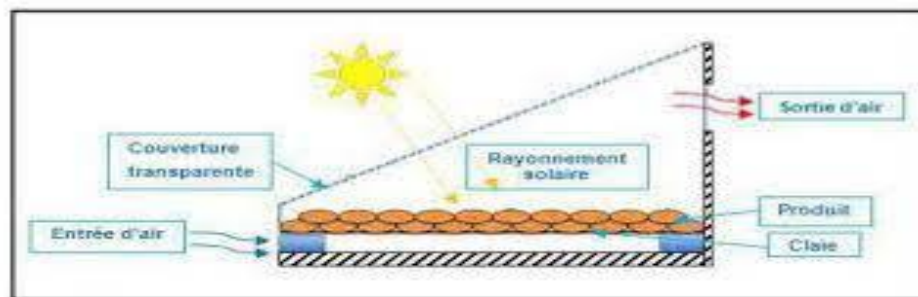


Figure I. 3. Schéma d'un séchoir solaire passif [55]

I.4.3.2. Séchoir solaire actif :

Le séchoir solaire actif, également appelé séchoir solaire à convection forcée, utilise l'énergie solaire comme source de chaleur et est assisté par des sources d'énergie électriques ou fossiles pour faire fonctionner des moteurs ou des pompes, assurant ainsi la circulation de l'air [56].

Des moyens externes tels que des moteurs ou des pompes sont utilisés pour déplacer l'air chauffé provenant du capteur solaire vers la zone de séchage. Ce mode convient aux opérations de séchage à grande échelle car il permet d'obtenir des températures d'air plus élevées et un flux d'air continu. Les séchoirs solaires actifs sont particulièrement adaptés au séchage de cultures à forte teneur en humidité telles que la papaye, les kiwis, les aubergines, le chou et les tranches de chou-fleur. La figure I.4 présente un schéma d'un séchoir solaire à convection forcée [55].

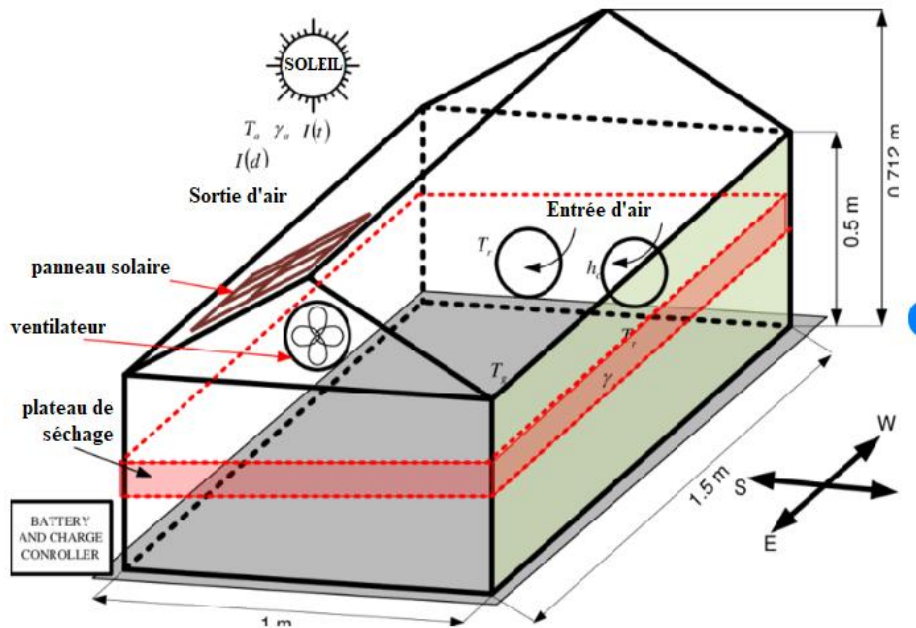


Figure I. 4. Schéma d'un séchoir solaire actif [55]

I.4.4. Types des séchoirs solaires :

Le mode de transfert de chaleur est un autre critère de classification des séchoirs solaires. On distingue les séchoirs solaires directs, indirects, mixtes et hybrides, qui peuvent tous être utilisés en mode passif ou actif.

I.4.4.1 Séchoir solaire direct :

Ces séchoirs fonctionnent de manière directe, où les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui combine à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. La forme de ces séchoirs peut varier en fonction du produit à sécher et de la quantité. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire avec une surface transparente inclinée selon un angle spécifique, généralement orientée vers le sud (voir figure I.5).

La chaleur est générée par l'absorption des rayonnements solaires incidents sur le produit lui-même, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [57].

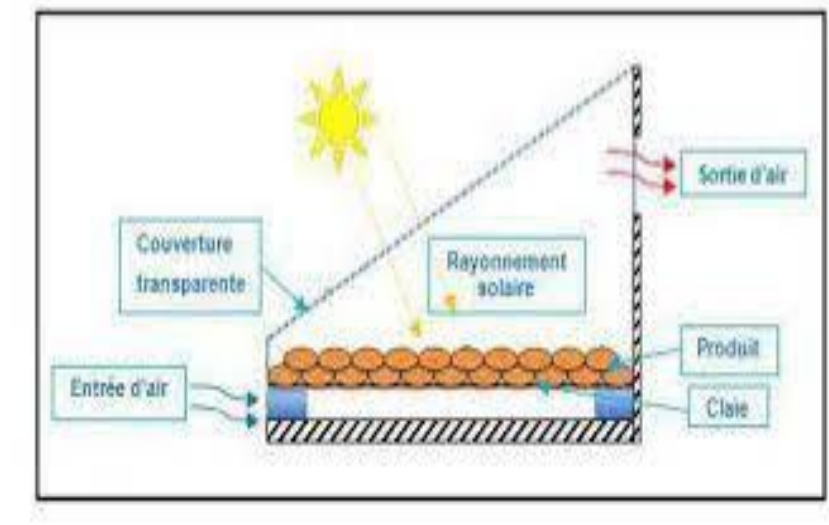


Figure I. 5. Le principe d'un séchoir solaire indirect [57]

I.4.4.2 Séchoir solaire indirect :

Dans le cas des séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas directement exposés au rayonnement solaire. Ils sont protégés de la lumière, ce qui permet une meilleure préservation des qualités nutritionnelles des aliments. Les séchoirs indirects se composent principalement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (voir figure I.6). Le capteur solaire est généralement un module distinct fixé sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil. Son inclinaison est conçue pour maximiser la capture de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, souvent peinte en noir. L'air est chauffé d'abord dans le capteur solaire, puis il est conduit dans la chambre de séchage. C'est là que se produit le transfert de chaleur de l'air vers le produit, ainsi que le transfert de matière du produit vers l'air pendant le parcours de l'air de séchage [57].

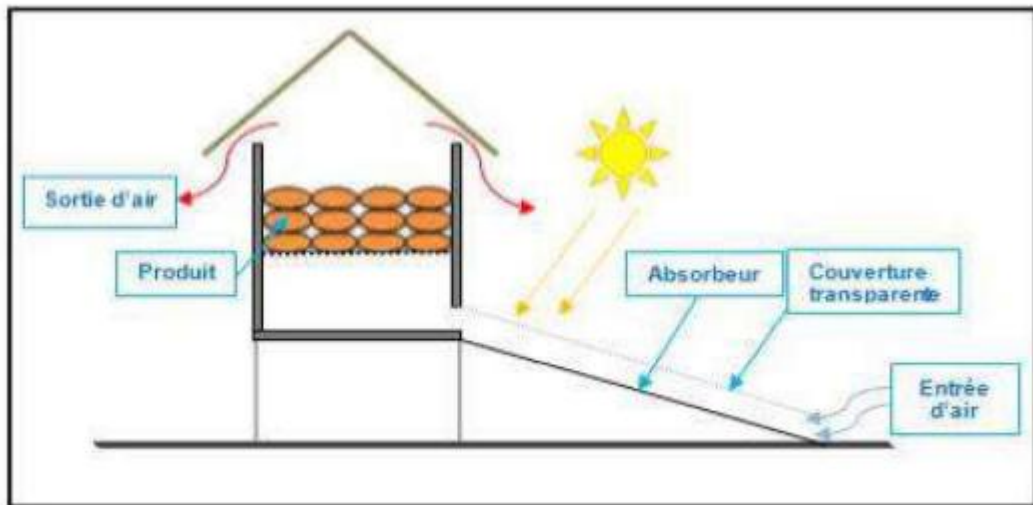


Figure I. 6. Le principe d'un séchoir solaire indirect [57]

I.4.4.3 Séchoir solaire mixte :

Ces séchoirs solaires combinent les principes des modes de séchage direct et indirect. Les produits bénéficient à la fois des rayonnements solaires directs sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur situé sous la chambre de séchage. Dans les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont recouvertes de vitres ou de films transparents (voir figure I.7) [57].

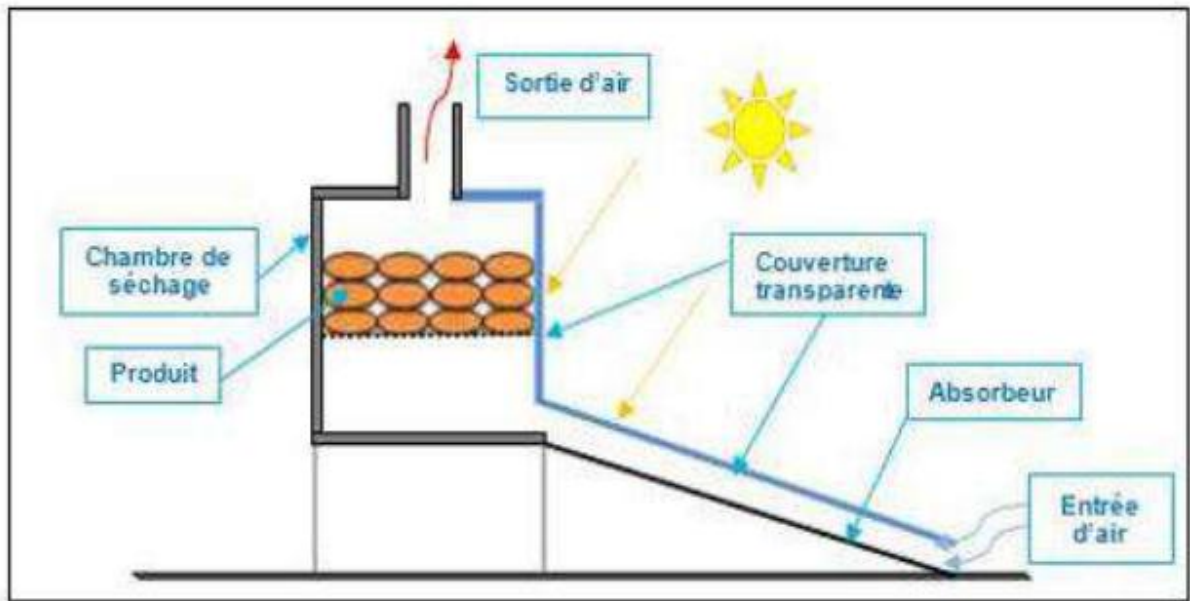


Figure I. 7. Le principe d'un séchoir solaire mixte [57]

I.4.4.4. Séchoir solaire hybride :

Ces séchoirs combinent l'énergie solaire avec une source d'énergie supplémentaire (carburant, électricité, bois, etc.) pour assurer un chauffage de l'air à un niveau élevé ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire est souvent utilisée comme préchauffage de l'air dans ces cas-là. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement utilisés pour des applications à grande échelle ou à des fins commerciales, où la qualité et le débit des produits finis ne peuvent dépendre des conditions climatiques. Ils sont adaptés aux traitements de grandes quantités de produits et permettent d'obtenir des produits séchés de haute qualité (voir figure I.8) [57].

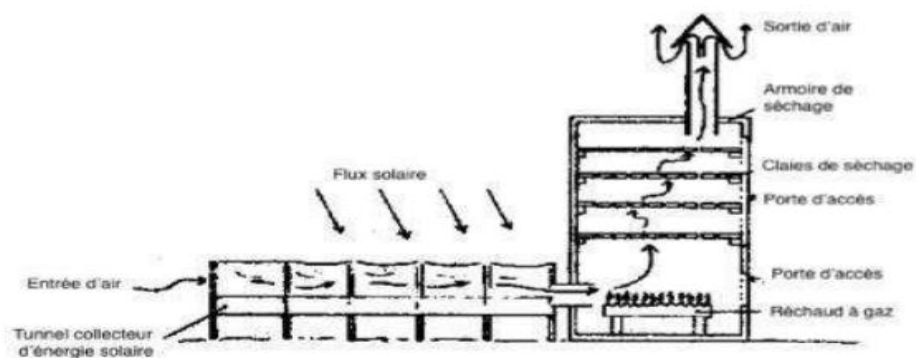


Figure I. 8. Séchoir solaire hybride [57]

II.1. Travaux antérieurs :

Dans ce chapitre, les travaux récents dans le domaine du séchage solaire sont présentés, la littérature se concentre sur les séchoirs solaires directs et indirects développés pour le séchage des produits et plus particulièrement des plantes aromatiques et médicinales.

II.2. Travaux expérimentaux :

Moller et al. (1992) ont développé un séchoir à chauffage solaire pour le séchage des plantes médicinales et des herbes en utilisant une serre en plastique comme structure aérienne pour réduire les coûts initiaux. Les réchauffeurs d'air solaires sont intégrés dans le toit et se composent d'un tissu noir absorbant pris en sandwich entre une feuille de verre de serre transparente et une feuille isolante à bulles d'air. Le système est conçu en segments de 2 m de large avec une conception modulaire, chaque segment formant une unité de capteur/séchoir solaire indépendante. Il utilise un ventilateur de 500 W pour alimenter chaque partie. Le prototype a été testé en Yougoslavie pour le séchage de la menthe, de la sauge et du houblon, le processus de séchage ayant une teneur en humidité initiale de 80 % en poids jusqu'à une teneur en eau finale de 11 % en poids sec. Cela prend trois à quatre jours. La charge était de 250 à 500 kg de matériau frais par pièce, avec des températures maximales comprises entre 40 et 60 °C. La perte de charge totale était de 50 Pa à un débit d'air de 3300 m³/h par pièce. La proportion d'ingrédients actifs s'est avérée supérieure de 40 % à celle des médicaments bruts séchés de manière conventionnelle, et le faible coût d'investissement et d'exploitation et la haute qualité des médicaments bruts ont rendu le séchoir solaire adapté à une utilisation en agriculture [58].

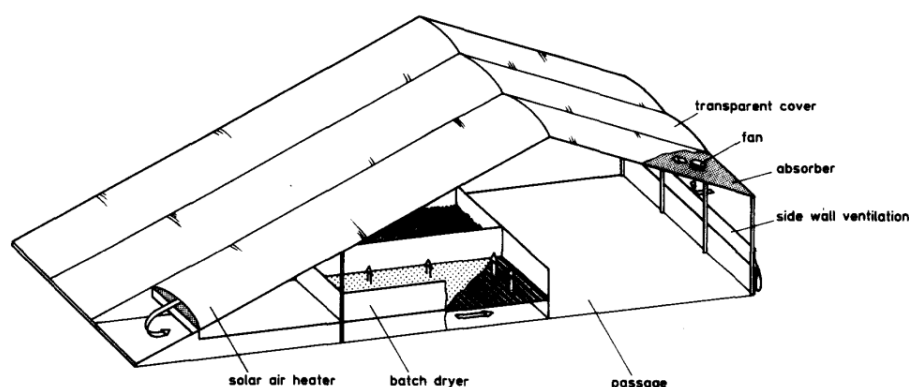


Figure II. 1. Séchoir solaire de type serre [58]

Ait Mohamed et al. (2005) ont mené une étude d'expériences de séchage solaire convectif sur de fines couches de feuilles de citron aurantium à l'aide d'un séchoir solaire thermique forcé

indirect, composé d'un capteur d'air solaire, d'un chauffage auxiliaire, d'un ventilateur de circulation et d'une armoire de séchage. La température de l'air, l'humidité relative et le débit d'air de séchage ont varié dans des plages spécifiées. 13 modèles statistiques, semi-théoriques ou expérimentaux, ont été testés pour déterminer leur adéquation à l'expérience données. Les constantes du modèle ont été évaluées à l'aide d'une analyse de régression non linéaire en utilisant un logiciel statistique. L'étude visait à identifier le modèle le plus approprié pour décrire les courbes de séchage solaire des feuilles de citrus aurantium, car il a été constaté que le modèle de séchage Midilli-Kucuk est le plus approprié pour décrire les courbes de séchage solaire des feuilles de citrus aurantium, avec un coefficient de corrélation élevé 0,99998, une valeur chi carré (χ^2) de $4,664 \times 10^6$ et un MBE de $4,8381 \times 10^4$. Dans l'ensemble, l'étude donne un aperçu du comportement de séchage solaire monocouche des feuilles d'agrumes sous charge forcée, ce qui pourrait être utile pour optimiser le processus de séchage à l'avenir [59].

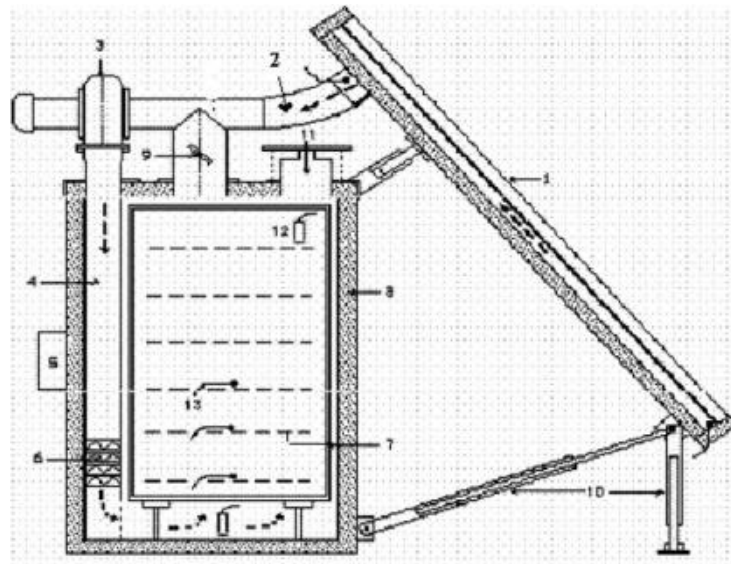


Figure II. 2. Représentation schématique du séchoir solaire [59]

(1) Capteur solaire ; (2) ventilateur de circulation ; (3) ventilateur ; (4) sens du flux d'air, (5) boîtier de commande ; (6) système de chauffage auxiliaire ; (7) étagères ; (8) armoire de séchage ; (9) recycler l'air; (10) pied de contrôle ; (11) sortie d'air; (12) sondes d'humidité; (13) thermocouples.

Janjai et al. (2008) a mené une expérience pour évaluer les performances d'un système de séchage solaire intégré au toit pour le séchage des herbes et des épices, en particulier la rosella et le piment. Ils ont également développé un modèle pour simuler les performances du séchoir solaire intégré au toit en utilisant l'air chaud des capteurs solaires intégrés au toit. Les tests sur le terrain ont démontré que le séchage dans le séchoir solaire intégré au toit entraînait une réduction significative du temps de séchage par rapport aux méthodes traditionnelles de séchage au soleil, et

que le produit sec était de haute qualité. La période de récupération du séchoir solaire intégré au toit a été estimée à environ 5 ans. Pour simuler les performances du séchoir solaire intégré au toit, deux ensembles d'équations ont été développés et résolus implicitement et explicitement à l'aide de techniques de différences finies. Les températures de l'air simulées à la sortie du collecteur étaient en bon accord avec les températures de l'air observées. De plus, la teneur en humidité des herbes et des épices séchées obtenues à partir de l'expérience était en bon accord avec les résultats de la simulation [60].

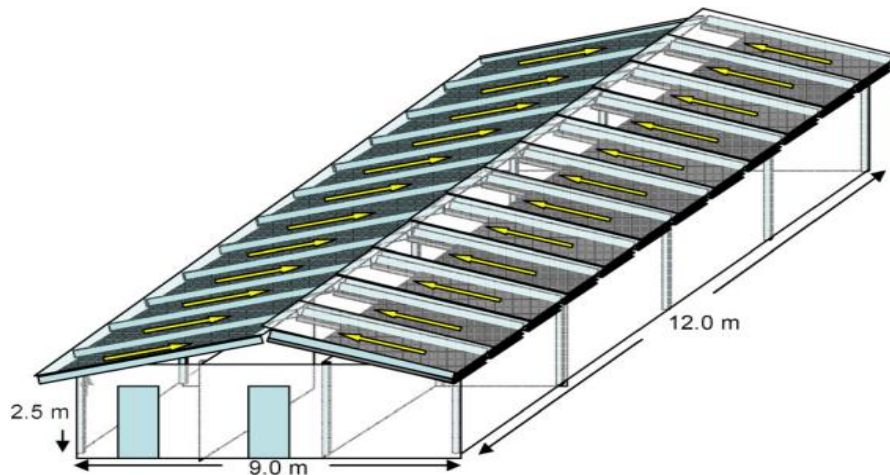


Figure II. 3. Système de séchage solaire intégré au toit [60]

Srisittipokakun et al. (2012) ont mené des expériences de séchage solaire sur *Andrographis paniculata* à l'aide d'un séchoir tunnel solaire de forme parabolique fabriqué en Thaïlande. Le séchoir est composé d'un capteur solaire plan et d'un tunnel de séchage recouvert de plaques de polycarbonate pour réduire les pertes de chaleur. L'air chauffé dans le capteur d'air solaire a été forcé à travers le produit par des ventilateurs CC entraînés par des modules de cellules solaires de 15 W. La surface totale du collecteur était de 108 m². Pendant la période de séchage, les chercheurs ont mesuré la température de l'air de séchage, l'humidité relative, les débits d'air, le rayonnement solaire et la perte de masse à différentes parties du séchoir toutes les 10 minutes. Ils ont séché 100 kg d'*Andrographis paniculata* dans le séchoir et ont découvert qu'il pouvait être utilisé pour *Andrographis paniculata* à 75 % (wb) de teneur en eau, qui pouvait être séchée en deux à trois jours jusqu'à 7 % (wb) restante. Les produits séchés étaient protégés de la pluie, des animaux, des insectes et de haute qualité. Cependant, la température de l'air de séchage variait entre 35 et 75 °C, selon les conditions météorologiques [61].

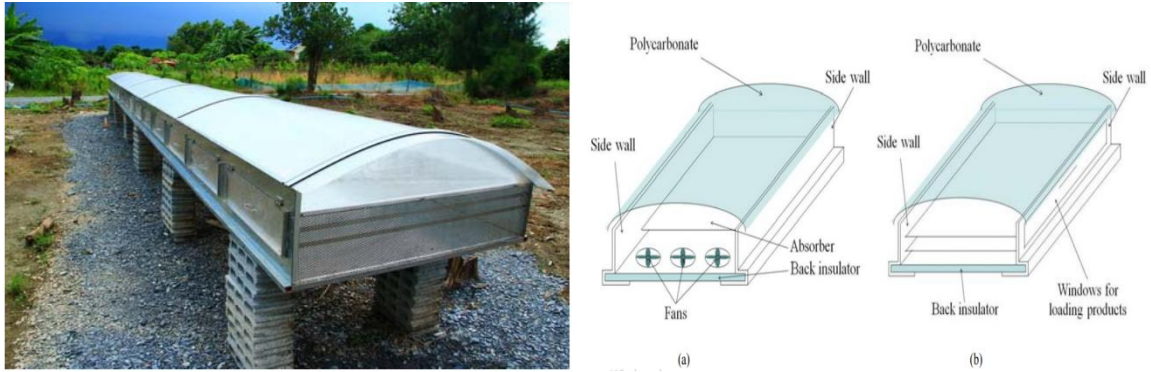


Figure II. 4. Illustration du séchoir solaire [61]

El-Sebail et al. (2013) conçu et fabriqué un séchoir solaire à convection forcée en mode indirect pour le séchage du thymus et de la menthe. Les performances thermiques du séchoir solaire ont été étudiées expérimentalement dans les conditions météorologiques en Égypte. Le système consistait en un réchauffeur d'air solaire à plaque ondulée en V à double passage relié à une chambre de séchage, et un ventilateur était utilisé pour forcer l'air chauffé vers la chambre de séchage. Des expériences de séchage ont été réalisées pour le thymus et la menthe à une température initiale de 29 °C, avec des teneurs en eau initiales de 95 % et 85 % sur une base humide, respectivement. Les teneurs en eau finales pour le thymus et la menthe ont été atteintes respectivement après 34 et 5 heures. Pour décrire le comportement au séchage des produits étudiés, les chercheurs ont testé 14 modèles mathématiques de séchage en couche mince. Ils ont découvert que le modèle Midilli-Kucuk était pratique pour décrire le séchage solaire en couche mince de la menthe, tandis que les modèles Page et Page modifiés convenaient pour décrire les courbes de séchage du thymus [62].

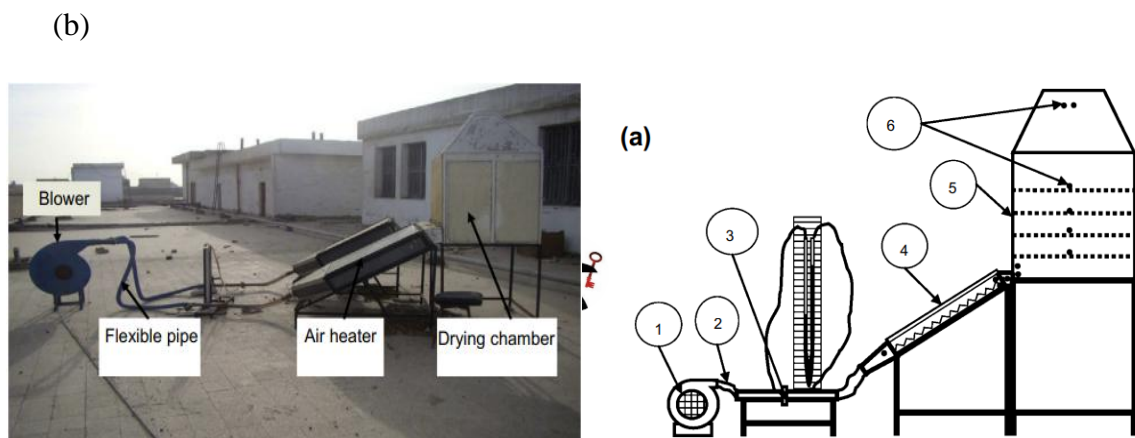


Figure II. 5. (a) Diagramme schématique du montage expérimental et (b) une photographie du montage expérimental [62]

Sallam et al. (2015) ont mené une expérience pour étudier la cinétique de séchage de la menthe entière à l'aide de deux séchoirs solaires prototypes identiques (direct et indirect) de mêmes dimensions. Les deux modèles ont fonctionné en modes de convection naturelle et forcée, dans lesquels l'air ambiant a été introduit dans le séchoir à une vitesse de 4,2 m/s. L'effet du modèle d'écoulement et du type de séchoirs solaires sur la cinétique de séchage de la menthe entière a été étudié. 10 modèles expérimentaux ont été utilisés pour ajuster les courbes de séchage, dont neuf modèles représentent le comportement de séchage solaire du puits de menthe. Les résultats ont montré que le séchage de la menthe s'est produit dans la période de taux de chute sans période de séchage fixe. De plus, les données ont montré que le taux de séchage de la menthe sous convection forcée était supérieur à celui du séchage de la menthe sous convection naturelle, en particulier pendant les premières heures de séchage. Les valeurs du coefficient de diffusion effectif pour le séchage de la menthe variaient entre 1.2×10^{11} et $1.33 \times 10^{11} \text{ m}^2/\text{s}$ [63].



Figure II. 6. Photographie du séchoir solaire direct [63]

Ahmed et al. (2001) ont étudié les avantages de l'utilisation d'un déshydratant solaire non émaillé (UTSD) pour le séchage des plantes médicinales. Ils ont comparé trois méthodes de séchage différentes, y compris le séchage à l'UTSD, le séchage à l'extérieur à la lumière directe du soleil et une méthode de séchage traditionnelle commune dans une maison de séchage ombragée. Quatre plantes médicinales différentes ont été utilisées dans l'étude, à savoir le henné, le romarin, la marjolaine et le maght, et les processus de séchage ont été effectués dans les conditions climatiques d'Ismailia, en Égypte. Les chercheurs ont étudié le taux de séchage, le pourcentage de séchage et les propriétés des plantes médicinales en termes de quantité d'huile et de tests de

sensation. Les résultats ont montré que le romarin et la marjolaine séchés par UTSD avaient une teneur en huile plus élevée que ceux séchés à l'ombre et à l'air libre sous lumière directe du soleil. L'étude indique que l'utilisation de l'UTSD pourrait être une méthode plus efficace pour le séchage des plantes médicinales et pourrait améliorer la qualité des plantes séchées [64].

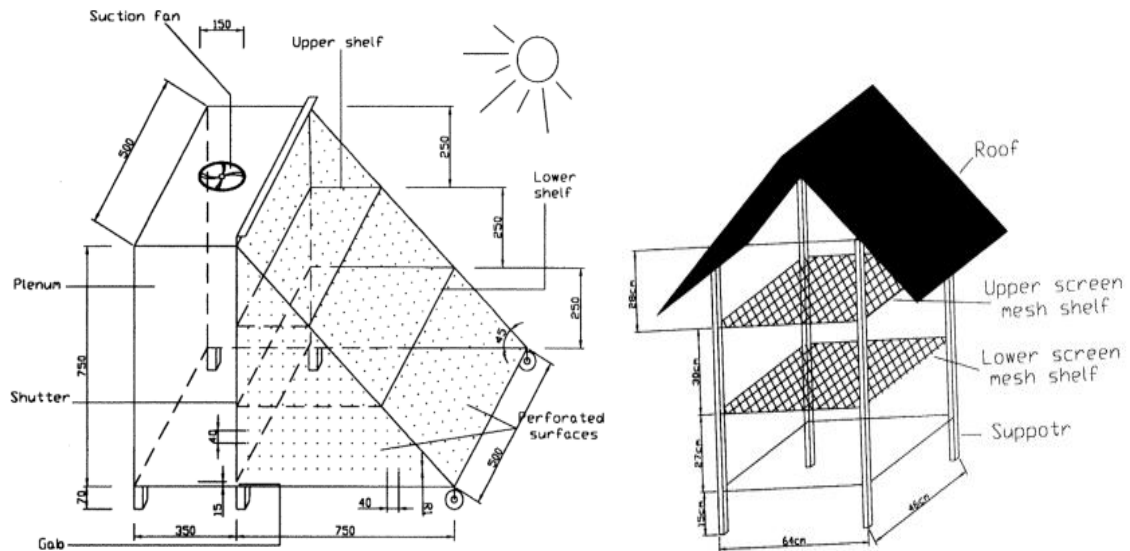


Figure II. 7. Séchoir solaire transpiré non vitré [64]

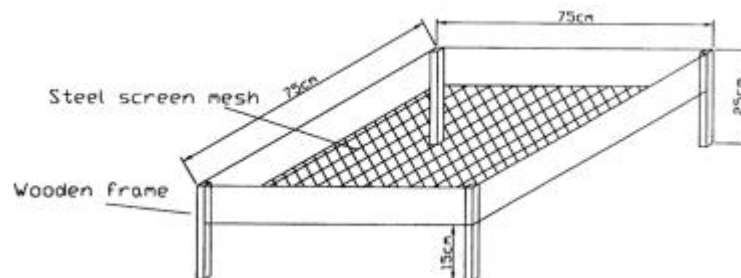


Figure II. 8. Récipient pour sécher les plantes médicinales à l'air libre [64]

Gulcimen et al. (2016) a développé un séchoir expérimental utilisant un système de capteurs solaires hybrides pour le séchage des plantes médicinales, en particulier celles contenant des composés volatils qui nécessitent des températures de séchage et une humidité relative spécifiques. Le séchoir était composé de deux capteurs solaires différents : un capteur solaire à air d'une surface de 12 m² pour le chauffage direct et un capteur solaire à plaque plate d'une surface de 8 m² pour l'accumulation d'énergie thermique convertie. La recherche a été menée sur le séchage de l'agripaume (*Leonuruscardia L.*). L'étude a démontré qu'en combinant les deux capteurs solaires, l'énergie du rayonnement solaire pour le chauffage de l'agent de séchage pouvait être

utilisée en continu 24h/24h en utilisant l'énergie accumulée, assurant la stabilité du processus de séchage. Pendant la journée, le capteur solaire à air, à un débit d'air égal à $367 \text{ m}^3/\text{h}$, chauffe l'air jusqu'à $30 \text{ }^\circ\text{C}$ lorsque l'irradiance solaire n'est pas inférieure à $380\text{-}400 \text{ W m}^2$. Pour maintenir ces paramètres d'agent de séchage dans le temps sombre, il faut $99,9 \text{ MJ}$ d'énergie stockée dans les réservoirs d'eau d'accumulation. L'étude suggère que l'utilisation d'un système de capteurs solaires hybrides peut fournir une énergie continue et stable pour le séchage des plantes médicinales tout en atteignant la teneur en humidité et la qualité du produit souhaitées [65].

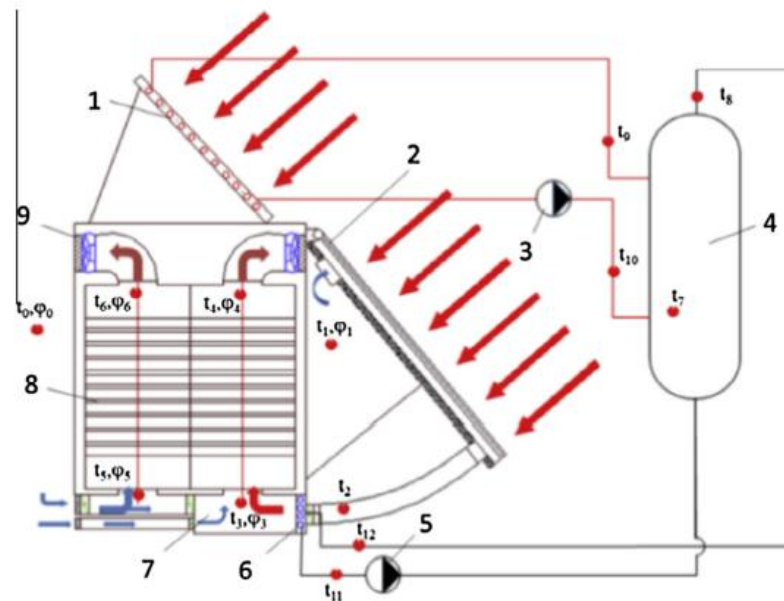


Figure II. 9. Schéma de base du séchoir pour plantes médicinales

1 – capteur solaire de type plaque plate (surface de 8 m^2), 2 – capteur solaire de type à air (surface de 12 m^2), 3 et 5 – une pompe ; 4 - un réservoir avec de l'eau pour le stockage de la chaleur ; 6 – échangeur de chaleur ; 7 - chambre de mélange d'air ; 8 – chambres de séchage ; 9 – ventilateur.

Morad et al. (2017) Étude de l'analyse thermique et des performances d'un tunnel de séchage solaire à effet de serre pour le séchage des plantes de menthe. Trois séchoirs solaires identiques ont été installés et une analyse thermique a été réalisée sur la base d'équations d'équilibre thermique afin de prédire les performances du séchoir. L'étude a évalué les performances du séchoir solaire en serre en fonction des changements dans les conditions des plantes, les débits d'air et les charges de menthe poivrée sous deux systèmes de fonctionnement du ventilateur. Les performances ont été évaluées en termes de températures du système, de taux de séchage, d'efficacité du séchage, de qualité du produit et de coût du séchage. L'étude a montré que le séchage de la menthe poivrée sous forme de feuilles réduisait le temps de séchage et permettait

d'obtenir le pourcentage le plus élevé d'huile volatile par rapport au séchage de plantes entières. L'étude a également montré que le séchage de la menthe poivrée à un débit de $2,10 \text{ m}^3/\text{min}$, le chargement de la serre d'environ 4 kg/m^2 et le fonctionnement de la serre par un système de ventilation en continu tendaient à augmenter le taux de séchage de 22,78 % et 24,8 % pour les plantes entières et les feuilles, respectivement, par rapport au système périodique [66].



Figure II. 10. Séchoir solaire tunnel à effet de serre

Kareem et al. (2017) ont réalisé une étude sur les performances d'un système de capteurs solaires à plusieurs passages (MPSAHC) pour le séchage de l'hibiscus (*Hibiscus sabdariffa*) en utilisant le granit comme matériaux de stockage d'énergie sensible. Le système atteint un taux de séchage moyen de $33,57 \text{ g. (kg.m}^2.\text{h)}^{-1}$ et a une efficacité optique, une efficacité du collecteur et une efficacité de séchage de 70,53%, 64,08% et 36,22%, respectivement. Le séchoir MPSAHC était plus rapide que la méthode de séchage au soleil (OSD) et conservait les couleurs plus claires. L'analyse technico-économique a montré une période de récupération de 2,14 ans, mais l'efficacité du séchage peut être améliorée en contrôlant l'humidité de l'air d'entrée [67].



Figure II. 11. Photographie de la configuration expérimentale du système MPSAHC

Bhardwaj et al. (2017) ont utilisé un séchoir solaire indirect combiné à un matériau à changement de phase (La paraffine RT-42) pour sécher l'herbe médicinale Valeriana Jatamansi. Les résultats ont montré que la teneur en eau des racines a diminué de 89 % à 9 % en 5 jours, ce qui est plus rapide que le séchage par pompe à chaleur et le séchage à l'ombre, qui prenaient respectivement 8 jours et 14 jours. Le temps de séchage a été réduit de 37,50 % et 64,29 % par rapport au séchage par pompe à chaleur et au séchage à l'ombre, respectivement. Les racines séchées obtenues étaient de qualité supérieure en termes de couleur, de texture, d'arôme et d'ingrédients biomédicaux. La proportion de 3,47% a été obtenue à partir du total des matières premières, ce qui est supérieur à la proportion de séchage à l'ombre traditionnel qui était de 3,31%. De manière générale, l'étude a montré la possibilité d'utiliser un séchoir solaire indirect associé à un matériau à changement de phase pour sécher les herbes médicinales [68].



Figure II. 12. Montage expérimental

Téllez et al. (2018) visait à étudier la faisabilité d'utiliser des techniques de séchage solaire pour sécher les feuilles de stévia. Le processus de séchage a été analysé à l'aide de techniques de séchage solaire direct (type armoire) et indirect (chauffage de l'air par système de chauffage solaire de l'eau), avec des modes de convection naturelle et forcée. L'étude a révélé que le séchage solaire indirect était supérieur, avec des temps de séchage modérés et un meilleur contrôle des conditions de fonctionnement, et offrait une meilleure protection contre les effets de la température que l'exposition directe au rayonnement solaire. L'analyse chromatique a indiqué que la température était le facteur le plus important affectant la dégradation de la tonalité de couleur. L'incorporation

d'un filet d'ombrage dans le séchoir solaire direct a amélioré la qualité finale des feuilles, réduisant les effets de la décoloration. Le modèle de Weibull, les modèles exponentiels à deux termes pour le séchage solaire direct et le modèle de Weibull pour le séchage solaire indirect se sont révélés les mieux adaptés aux résultats expérimentaux. L'étude a conclu que les techniques de séchage solaire peuvent entraîner d'importantes économies d'énergie et une meilleure qualité du produit final, avec un impact environnemental moindre par rapport aux méthodes de séchage traditionnelles [69].

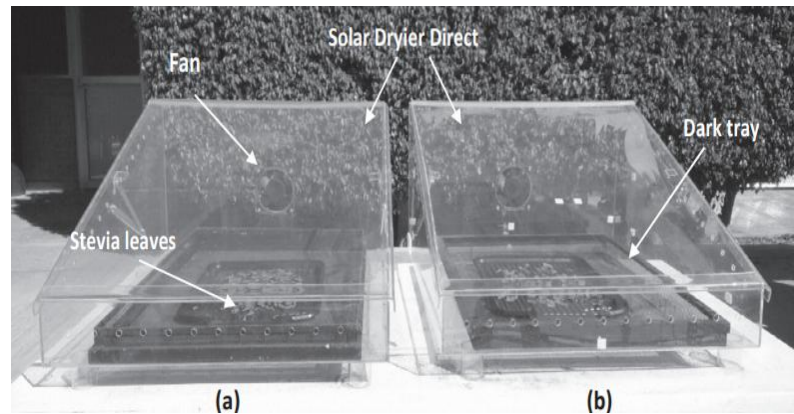


Figure II. 13. Image des séchoirs solaires

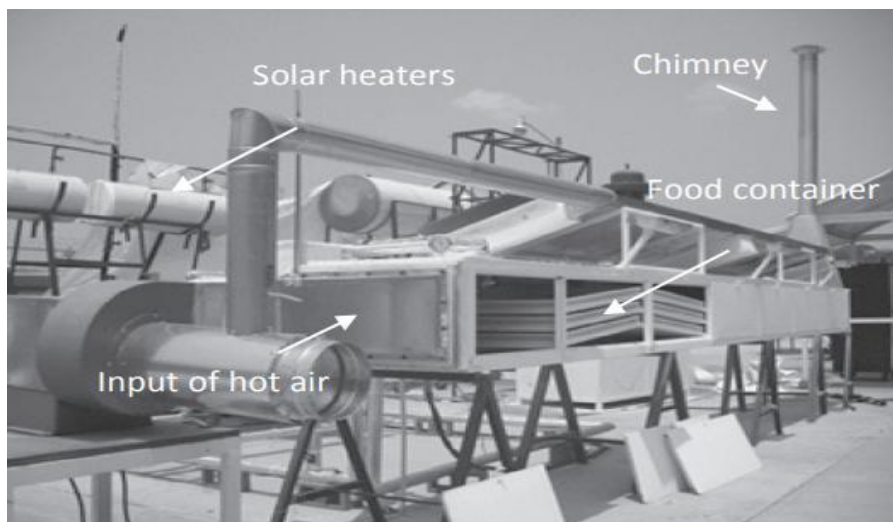


Figure II. 14. Image du séchoir solaire indirect

Mohamad et al. (2005) ont développé un tunnel de séchage solaire portable hybride aux performances améliorées utilisant un système solaire photovoltaïque et un capteur solaire à plaque plane pour le séchage de la menthe (*Mentha viridis*). Le séchoir tunnel solaire peut fonctionner en modes de chauffage à chaleur directe et indirecte et est équipé d'un rideau thermique pour

ombrager la menthe et la protéger du rayonnement solaire direct. Le système photovoltaïque est utilisé pour piloter un ventilateur DC axial en mode forcé. Les performances du séchoir tunnel solaire développé ont été évaluées en séchant une, deux et trois couches de menthes, et comparées au séchage solaire à l'air libre. La teneur en humidité des feuilles de menthe a été prédite et comparée aux résultats expérimentaux à l'aide de plusieurs modèles de séchage en couche mince. Les chercheurs ont également étudié l'impact de l'énergie grise du séchoir tunnel solaire hybride développer sur l'environnement. Les résultats ont montré que le temps de séchage de la menthe diminuait à 210-360 minutes pour le séchoir développé, contre 270-420 minutes pour le séchage en plein soleil. Le séchage de la menthe se trouve dans la période du taux de déclin. L'efficacité quotidienne moyenne du PV était de 9,38 %, l'efficacité du séchoir de 30,71 %, l'efficacité totale de 16,32 % et la durée de récupération de l'énergie de 2,06 ans. Le pourcentage net de dilution du dioxyde de carbone (CO₂) sur la durée de vie du système a été estimé à environ 31,80 tonnes. Il a été constaté que la qualité de la menthe séchée à l'aide d'un rideau thermique noir dans le séchoir tunnel solaire était supérieure à celle séchée en plein soleil. La couleur et l'apparence naturelles étaient mieux conservées sous ombrage. Le système développé peut être bénéfique pour les personnes qui vivent dans des zones reculées où la connexion au réseau n'est pas disponible et peut répondre à la demande des agriculteurs [70].

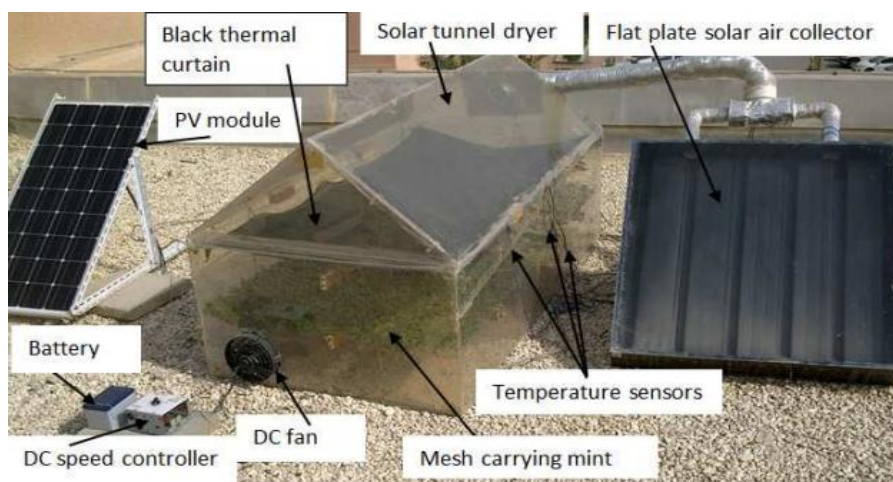


Figure II. 15. Configuration expérimentale d'un séchoir tunnel solaire
Amélioré par un système PV

Amer et al. (2018) ont testé un système solaire intégré pour le séchage de la camomille. Ce système se compose d'un collecteur, d'un échangeur de chaleur, d'un onduleur, d'une salle de séchage principale sous le collecteur, d'une salle de séchage supplémentaire et de résistances

électriques supplémentaires immergées dans un réservoir d'eau. Le système a pu stocker l'énergie solaire dans l'eau pendant que le soleil brillait et réutiliser cette énergie par temps nuageux ou lorsque le soleil brillait à l'extérieur pour augmenter la température de séchage de l'air à l'intérieur du système. La salle de séchage principale du séchoir intégré peut contenir 32 à 35 kg de camomille fraîche, tandis que l'autre salle de séchage séparée peut contenir 10 à 12 kg. La température de l'air à l'intérieur du séchoir peut être contrôlée à l'aide d'un contrôleur de température pour maintenir la plage souhaitée pour le séchage de la camomille. Le séchoir intégré a fonctionné pendant environ 30 à 33 heures pour réduire la teneur en humidité de la camomille de 72 à 75 % à 6 % (wb), contre 60 heures en utilisant la méthode de séchage au soleil pour la réduire à 9 à 10. % (wb) [71].

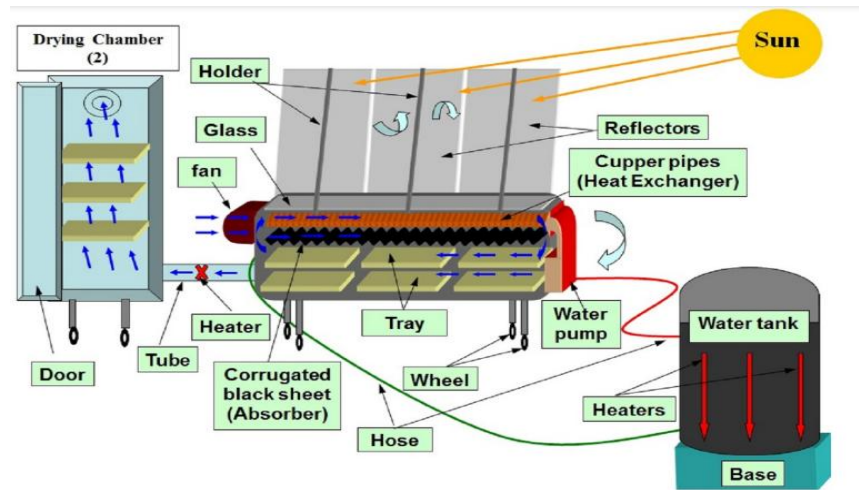


Figure II. 16. Schéma de principe des composants du système de séchoir solaire hybride

Şevik et al. (2019) ont conçu et testé deux types de séchoirs solaires, un séchoir solaire à double passage (DPSAD) et un séchoir solaire infrarouge à double passage (DPSAIRD) pour le séchage des feuilles de menthe et des tranches de pomme. L'étude visait à connaître les effets de l'utilisation de l'énergie infrarouge pour assurer un séchage continu dans des conditions climatiques où l'énergie solaire est insuffisante. Des expériences comparatives ont été menées en automne, et divers paramètres tels que l'analyse de puissance et d'énergie, le transfert de masse et de chaleur, le coefficient de performance, la consommation d'énergie spécifique, l'efficacité de séchage, l'efficacité énergétique et les barres d'erreur ont été utilisés pour l'évaluation de la chaleur et de la structure. Les résultats ont montré que l'efficacité thermique la plus élevée du capteur était de 83,56 %, et les valeurs d'efficacité énergétique de DPSAIRD et DPSAD variaient de 49,17 % à 69,35 %. Les efficacités énergétiques variaient de 1,15 % à 26,46 %, où l'utilisation de l'énergie

infrarouge augmentait considérablement la consommation d'énergie, mais soutenait à la fois le collecteur et la protection des produits contre la dégradation dans les cas où le collecteur était insuffisant [72].

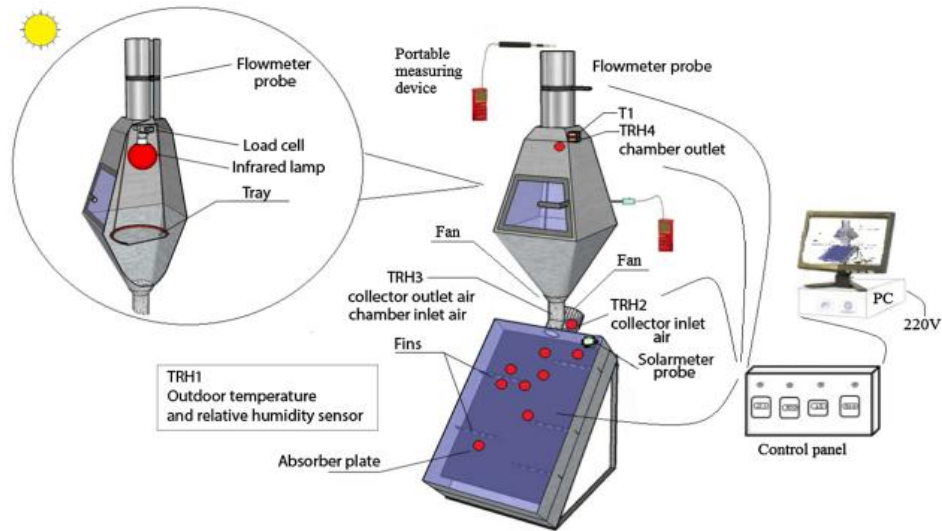


Figure II. 17. DPSAD avec et sans énergie infrarouge [72]

Lakshmi et al. (2019) ont étudié le séchage des feuilles de stévia à l'aide d'un nouveau séchoir solaire à convection forcée mixte (MFSCD) et l'ont comparé au séchage solaire ouvert (OSD). Les expériences ont été réalisées sous rayonnement solaire moyen, température ambiante et débit d'air de séchage. La teneur en humidité sûre des feuilles de stévia a été atteinte à 330 minutes et 870 minutes de temps de séchage dans MFSCD et OSD, respectivement. L'efficacité globale du séchoir et l'efficacité énergétique moyenne du MFSCD se sont avérées être de 33,5 % et 59,1 %, respectivement. Des analyses de qualité ont été effectuées pour des échantillons de feuilles de stévia fraîches, OSD et séchées au soleil, et il a été constaté que la teneur en antioxydants et en flavonoïdes était plus élevée dans les échantillons séchés au soleil que dans les échantillons OSD. La conservation de la couleur était meilleure dans les échantillons séchés au soleil, et l'analyse sensorielle a indiqué que les feuilles de stévia séchées au soleil présentaient de meilleurs scores que les échantillons OSD [73].



Figure II. 18. Vue photographique d'un séchoir solaire à convection forcée en mode mixte

Bahamo et al. (2020) ont mené une étude pour déterminer les conditions optimales de séchage et de stockage d'*Herniaria hirsuta*, une espèce végétale, afin d'améliorer sa conservation. Ils ont utilisé un séchoir solaire à convection naturelle et forcée et ont testé l'effet de différentes conditions thermométéorologiques (température de l'air et vitesse de l'air) sur la perte d'eau par *Herniaria hirsuta* fraîche. Ils ont étudié la cinétique de séchage à trois températures différentes (50, 60 et 70 °C) et deux vitesses d'air (0,09 et 0,18 m/s). Il a été constaté que l'activité optimale de l'eau pour la conservation est de 0,28. Ils ont utilisé le modèle LESPAM pour décrire les courbes d'absorption, qui ont montré que la température de séchage de l'air était le facteur le plus important affectant la cinétique de séchage. La vitesse de séchage a diminué à des températures de séchage à l'air plus basses, mais la vitesse de l'air a eu peu d'effet sur la cinétique de séchage. Pour le séchage en couche mince de *Herniaria hirsuta*, ils ont constaté que le modèle Midilli-Kuck avait la courbe de séchage la mieux adaptée. La densité effective des valeurs d'eau hydratée est passée de $2,5312 \cdot 10^{-9}$ à $18,0511 \cdot 10^{-9}$ m²/s, et elle augmente avec l'augmentation de la température. Il a été constaté que l'énergie d'activation moyenne pour le processus de diffusion est de 2938,46 kJ/kg, ce qui exprime l'effet de la température sur le coefficient de diffusion. Enfin, ils ont constaté que *Herniaria hirsuta* séchée selon des normes de séchage extrêmes présentait la plus forte rétention d'activité antioxydante, tandis que les phénols totaux et les flavonoïdes ont diminué de 10 % et 46 %, respectivement [74].

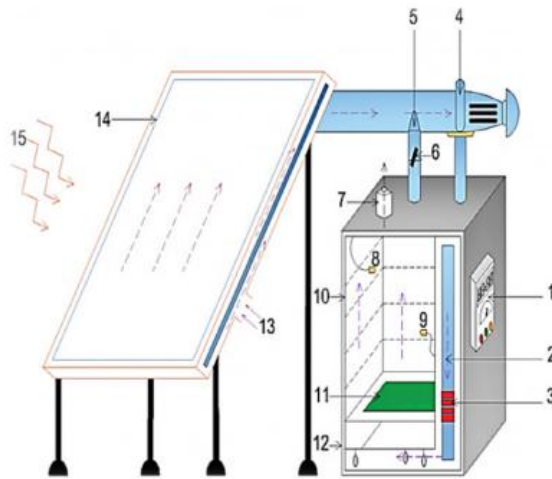


Figure II. 19. Séchoir solaire indirect

(1) Coffret de commande, (2) canal de flux de séchage d'air, (3) appoint électrique, (4) ventilateur, (5) gaine de ventilation, (6) volet d'aération, (7) sortie d'air, (8) capteur d'humidité, (9) thermocouple, (10) planchers, (11) porte-échantillon, (12) armoire de séchage, (13) entrée d'air, (14) capteur solaire, (15) rayons solaires.

Nimnuan et al. (2020) ont mené une étude expérimentale d'un séchoir solaire à effet de serre pour le séchage du gingembre cassumunar (Plai). Le séchoir était composé d'une structure de toit parabolique recouverte de plaques de polycarbonate et d'un sol en béton. Neuf ventilateurs CC alimentés par trois modules PV de 50 W ont été utilisés pour ventiler le séchoir. L'étude a été menée dans la province de Sa Kaeo, en Thaïlande. Dans l'expérience, 300 kg de gingembre cassumunar ont été séchés dans le séchoir solaire à effet de serre. La température de l'air de séchage variait de 30 °C à 55 °C pendant le processus de séchage. Il a fallu un jour pour sécher le gingembre cassumunar d'une teneur en eau initiale de 90% (wb) à 10% (wb) en utilisant le séchoir solaire à effet de serre, alors qu'il a fallu un jour de séchage naturel au soleil dans des conditions similaires pour atteindre une teneur en eau de 40% (wb). Les auteurs ont également développé un système d'équations différentielles partielles pour décrire le transfert de chaleur et d'humidité pendant le processus de séchage du gingembre cassumunar dans le séchoir solaire à effet de serre. Les équations ont été résolues numériquement en utilisant la méthode des différences finies. Les résultats de la simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux, et un bon accord a été trouvé entre les deux [75].

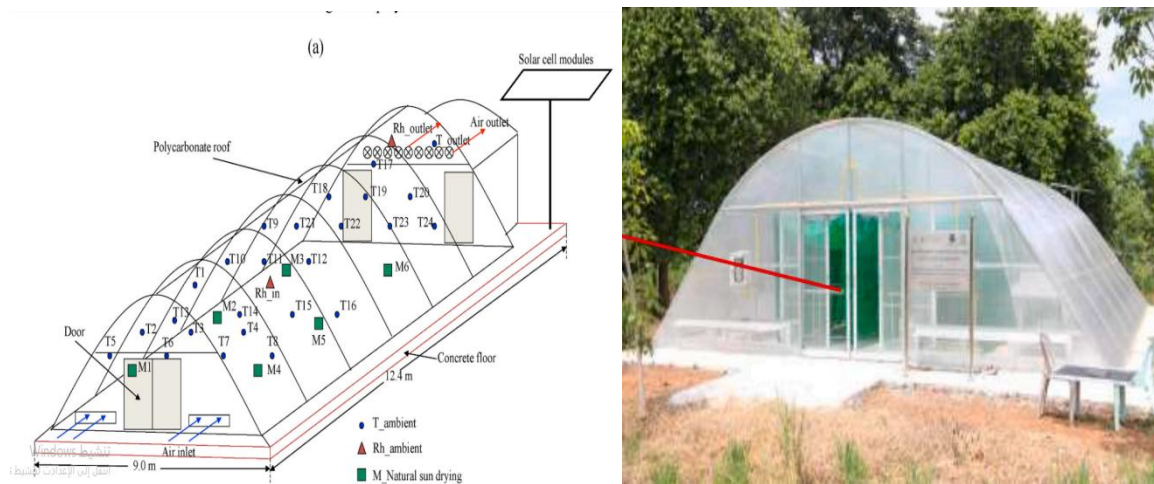


Figure II. 20. Schéma de principe du séchoir solaire à grande échelle

Singh et al. (2018) ont développé un nouveau séchoir solaire indirect actif composé d'un collecteur de tubes à vide très efficace pour le chauffage de l'air, et un ventilateur CC entraîné par un module solaire photovoltaïque (PV) pour le débit d'air forcé. Le système a été testé pour le séchage des feuilles du fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*) en mode semi-continu. La chambre de séchage était de type de plateau avec une capacité de chargement de 6 kg à 45 kg, selon le produit de séchage. L'efficacité thermique globale de séchoir solaire pour les feuilles de fenugrec s'est avérée être de 34,1%, contre 5,7% pour le séchage du soleil ouvert (OSD). La qualité des feuilles de fenugrec séché s'est également révélée meilleure que celle de l'OSD [76].

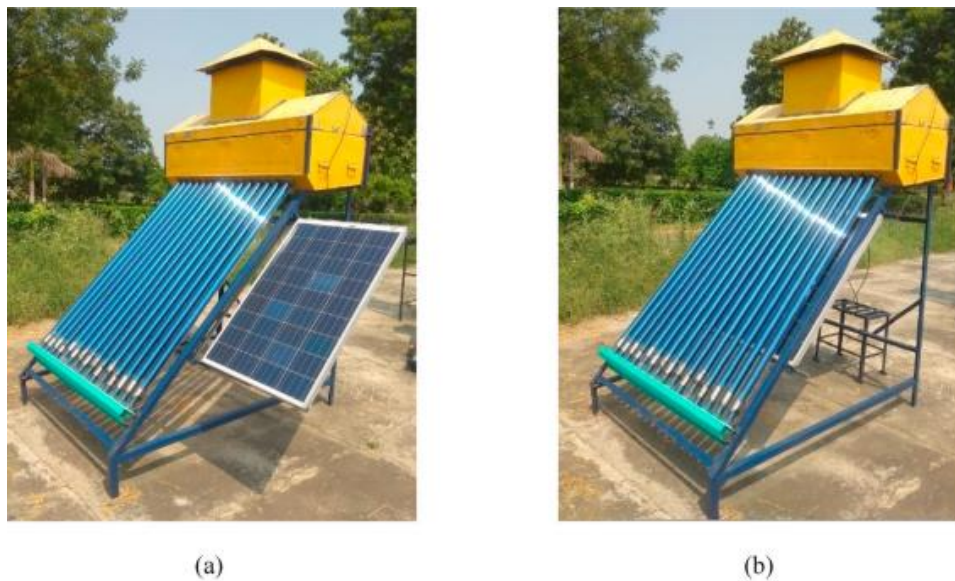


Figure II. 21. Photographie d'un séchoir solaire indirect actif solaire PV (a) en cours d'utilisation (b) non utilisé

III.1. Dispositif expérimental :

Le but du travail expérimental est d'étudier les performances de deux séchoirs solaires en matière de réduction d'humidité pour les herbes médicinales et aromatiques dans un court laps de temps, avec une haute qualité et au moindre coût. Pour cette raison, un système expérimental a été conçu et construit.

III.2. Description des prototypes développés :

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été développée et réalisée dans l'Unité de Recherche Appliquée à le domaine des énergies renouvelables (URAER) pour ce mémoire de master. Deux séchoirs sont équipés dans le but d'étudier le comportement thermique, dynamique et les cinétiques de séchage. Les deux séchoirs sont construits en utilisant de l'argile dans la construction des murs car il s'agit d'un matériau isolant et d'un matériau naturel largement disponible. Le séchoir de type indirect possède une unité de production d'air chaud (capteur solaire), à simple circulation et simple vitrage en polycarbonate de 6 mm d'épaisseur avec une surface de 2 m² inclinée, l'absorbeur est en aluminium d'une épaisseur de 0,5 mm, il est peint en noir mate ayant les dimensions de 2.06 m de longueur et 1m de largeur. L'isolation thermique est en pano sandwich de 4 cm d'épaisseur sous l'absorbeur, les côtés ont été isolés avec le même matériau. La distance entre le polycarbonate et l'absorbeur est de 5 cm et le capteur solaire est directement connecté à la chambre de séchage, comme illustré à la figure 1. Pour le séchoir solaire direct a été construit de la même manière que le séchoir indirect, dans la face en utilisant que du polycarbonate comme surface inclinée sans unité de production de chaleur.

Les portes des séchoirs ont été installées sur le côté, pour faciliter l'entrée et la sortie des plateaux, elles ont également été réalisées en polycarbonate pour profiter des rayons du soleil afin d'augmenter la température dans la chambre. Chaque séchoir solaire repose sur un cadre métallique et une base en bois a été utilisée comme matériau isolant, tandis qu'un lit en plastique noir recouvre l'ensemble de l'intérieur du séchoir afin de maintenir la salle de séchage propre et d'augmenter la température.

III.2.1 Schéma de principe initial des séchoirs solaires

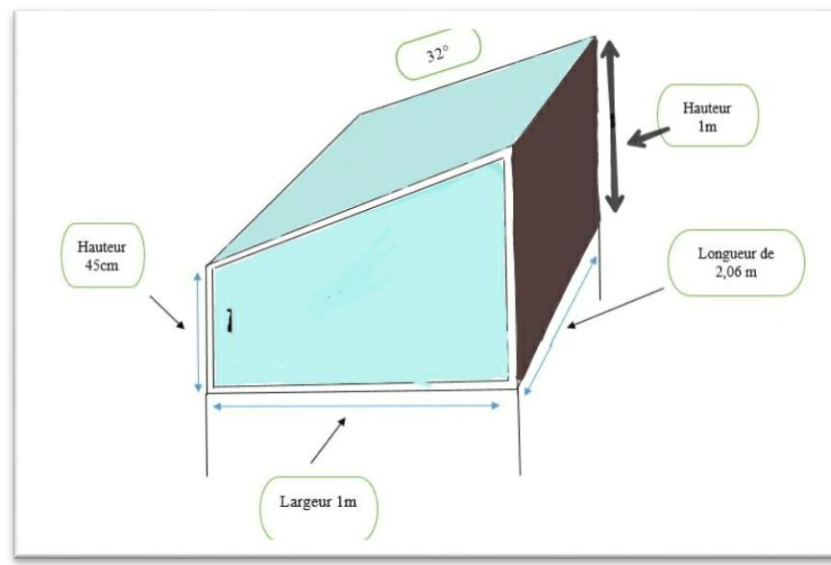


Figure III. 1. Schéma de principe préliminaire d'un séchoir solaire direct

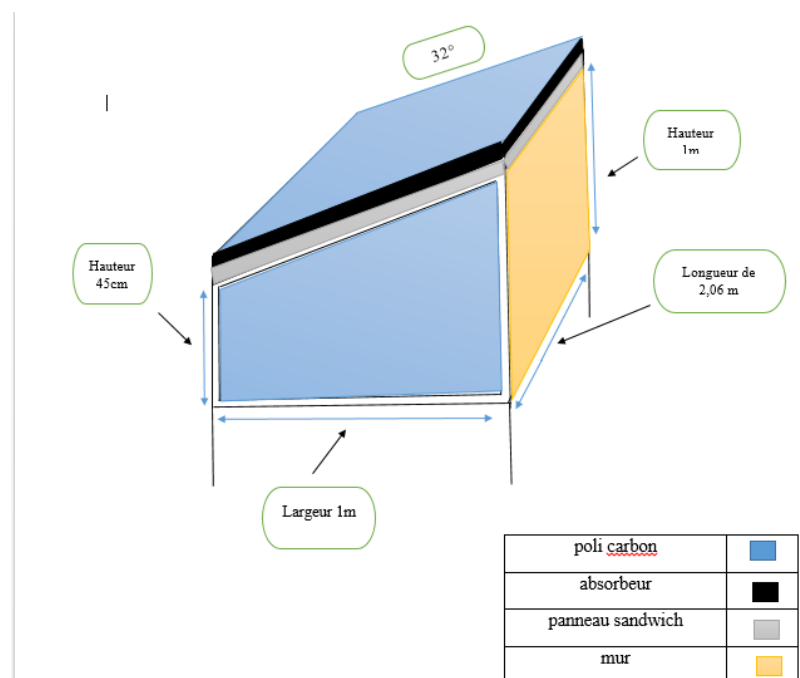


Figure III. 2. Schéma de principe initial d'un séchoir solaire indirect



Figure III. 3. Prototypes de séchoir solaire de type indirect



Figure III. 4. Prototypes de séchoir solaire de type direct

III. 3. Composant de prototype :

III. 3.1. Armoire de séchage :

L'armoire de séchage est conçue avec des matériaux naturels, peu coûteux et très efficaces. Des moules en argile ont été utilisés dans la construction et la conception des murs (60% argile, 40% sable, paille). L'accumulation d'argile mélangée à des épis de blé et à de la paille joue un rôle important dans l'isolation thermique, de sorte qu'elle maintient la température ambiante au lieu d'autres matériaux isolants. Le séchoir est constitué de trois parois en terre (trapézoïdale), la première (arrière) a une longueur de 2,06 m, une épaisseur de paroi de 15 cm et une hauteur de 1 m. Le deuxième mur (avant) opposé au premier mur (même longueur et épaisseur) et une hauteur de 45 cm, de sorte que la forme est oblique à un angle de 32° . La paroi latérale a la même longueur

que les première et deuxième parois, comme illustré à la figure 3. Le mur contient un ventilateur afin de créer de l'air pulsé et d'évacuer l'air de la pièce lors du séchage. Chaque séchoir contient 4 chariots, chaque chariot contient 6 étagères pour placer le produit à sécher. Enfin, la porte a été conçue dans la même forme que le mur avant, mais nous avons utilisé du polycarbonate pour fournir plus d'énergie solaire à l'intérieur de la chambre.



Figure III. 5. Photographie de la chambre de séchage, (Gauche) séchoir solaire direct ; (Droit) séchoir solaire indirect.

III.3.2. Capteur solaire :

Dans le séchoir solaire indirect, nous avons installé une unité de production d'air chaud : le capteur solaire est constitué de polycarbonate de 6 mm d'épaisseur, avec une surface inclinée de 32° , en dessous se trouve une plaque (absorbeur) de 0,8 mm en aluminium revêtu de couleur noir mat, dimension 2,06m x 1 m. L'isolation thermique provient du panneau sandwich, et à cet endroit le panneau sandwich est utilisé avec une épaisseur de 4 cm, et les parties latérales nous avons utilisé le même isolant. La distance entre la paille et le verre est de 5 cm. Le collecteur a été placé directement au-dessus du déshydratant comme indiqué sur la figure 6.

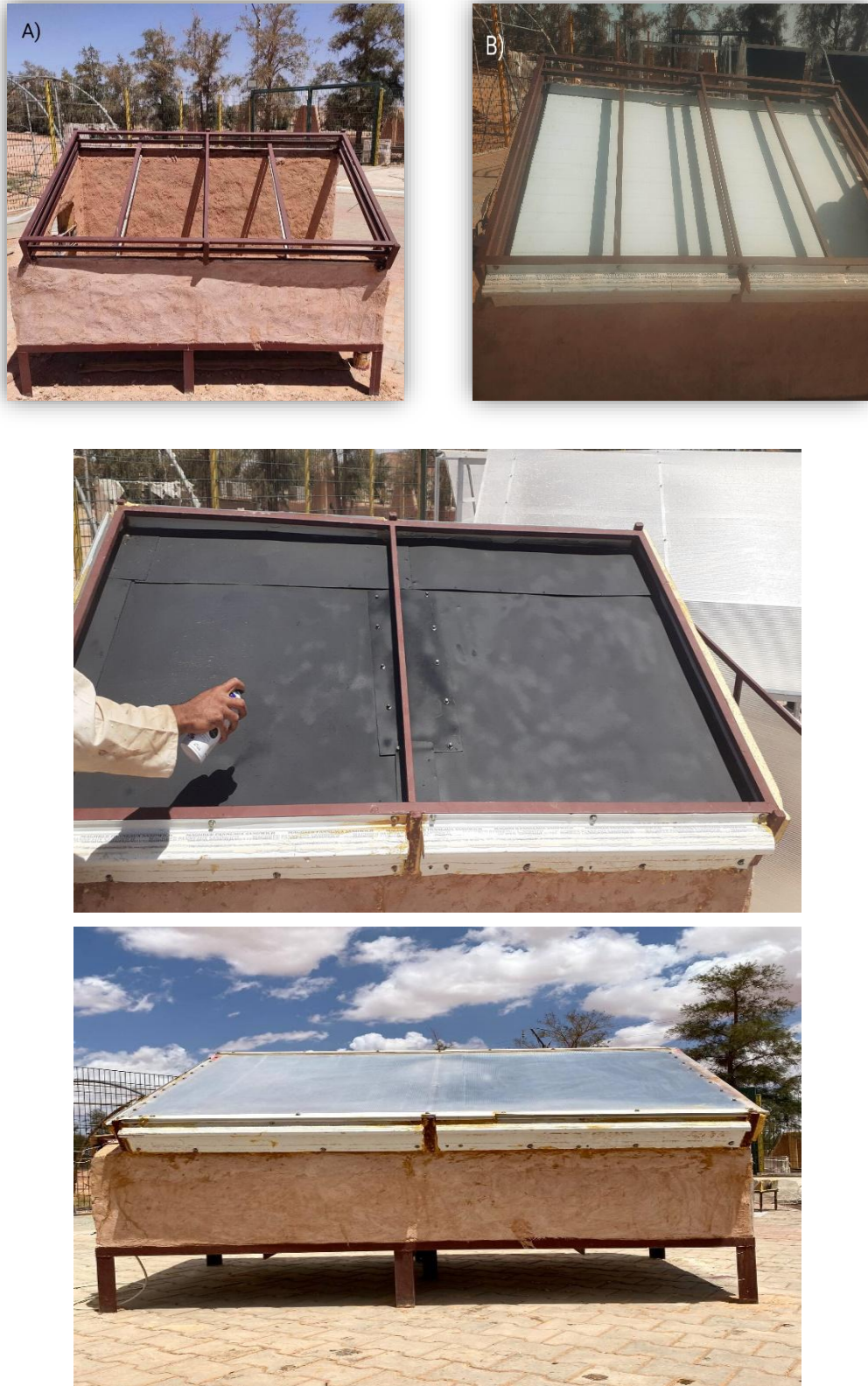


Figure III. 6. Étapes de construction de capteur solaire

III.3.3. Ventilateur :

Le ventilateur est placé sur le mur opposé à l'entrée d'air pour forcer l'écoulement d'air à travers les étagères des chariots de séchage. Le ventilateur fonctionne à une puissance de 110 watts contrôlé avec un potentiomètre afin de réguler la vitesse d'écoulement. Nous l'avons installé sur un cadre en bois aux dimensions de 45 cm x 45 cm au milieu du séchoir, et nous avons installé un filet dans la face intérieure du ventilateur qui permet d'empêcher les insectes et la poussière de pénétrer dans la salle de séchage.



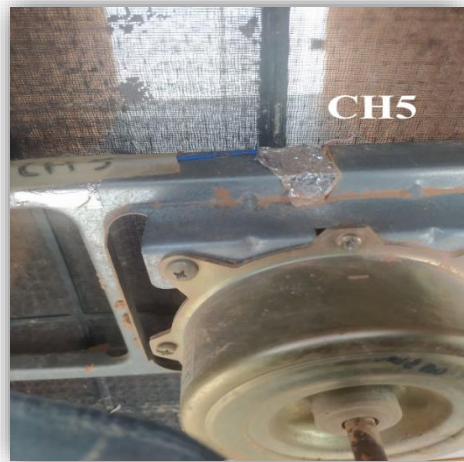
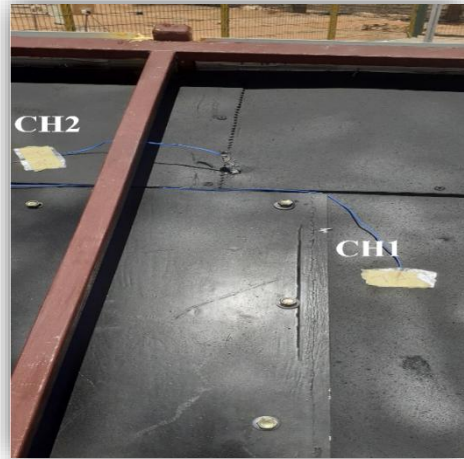
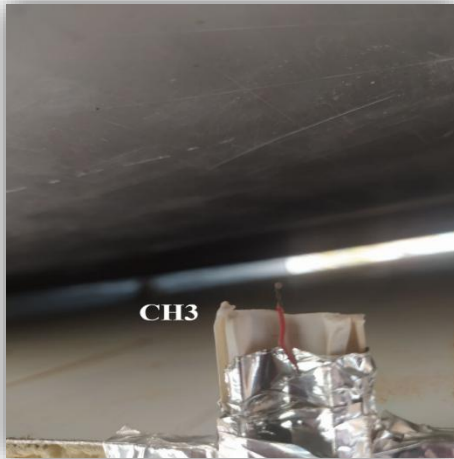
Figure III. 7. Photographie de ventilateur

III.4. Instrumentation des prototypes :

III.4.1. Mesure des températures :

Les températures ont été mesurées à l'aide des thermocouples nickel-chrome-nickel-aluminium, type K. Ces thermocouples, d'un diamètre de 0,05 mm, peuvent chauffer jusqu'à 750 °C permettant une précision de 0,1 °C. La figure III.6 montre les emplacements de ces capteurs.

A) Prototype de séchoir solaire indirect :



B) Séchoir solaire direct :





Figure III. 8. Instrumentation des séchoirs solaires

III.4.2. Mesure de rayonnement solaire, de la température et d'humidité relative de l'air ambiant :

Une station radiométrique est constituée de deux parties distinctes. La première partie, fixe, comprend un pyromètre de type EKO qui mesure le rayonnement global sur un plan horizontal, ainsi qu'un pyromètre différentiel de type EPPLEY qui évalue l'irradiance sur un plan incliné de 32° orienté vers le sud. La seconde partie, mobile, est équipée d'un système de poursuite solaire comprenant un pyréliomètre orienté vers le disque solaire pour mesurer le rayonnement direct, ainsi qu'un pyromètre de type EKO muni d'une boule pare-soleil pour quantifier l'éclairement diffus sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo-hygrométrique "Techoel sonde thermo-igrometriche" avec une précision d'étalonnage de $\pm 1,5\%$, une sensibilité à la température ambiante de $0,1\text{ (}^\circ\text{C/mV)}$, et une plage de mesure s'étendant de 0 à 100 % d'humidité relative et de -40 à $+60\text{ }^\circ\text{C}$. Tous ces systèmes sont connectés à un dispositif d'acquisition de données de la marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x, qui est relié à un ordinateur via une interface RS232. Les données sont collectées de manière continue, 24 heures sur 24, avec un intervalle de cinq minutes.



Figure III. 9. Photo de l'équipement de mesure du rayonnement, de la température et de l'humidité relative de l'air entourant l'unité d'énergies renouvelables (URAER).

III.4.3 Mesure de la vitesse d'air de séchage :

La vitesse de l'air de séchage en sortie de séchoir est évaluée à l'aide d'un anémomètre Testo 440.



Figure III. 10. Anémomètre Testo 440

III.4.4. Acquisition et traitement des données :

L'enregistreur de données de thermocouple à 12 canaux est un dispositif de surveillance et d'enregistrement des données de température provenant d'un maximum de 12 thermocouples simultanément. Avec une large gamme de températures allant de -200°C à 1800°C , il s'adapte à

divers environnements. L'enregistreur de données offre une grande précision, garantissant des mesures de température exactes. Il s'agit d'un outil essentiel pour les industries telles que la recherche, fournissant des données fiables pour le contrôle de la qualité et l'optimisation des processus.

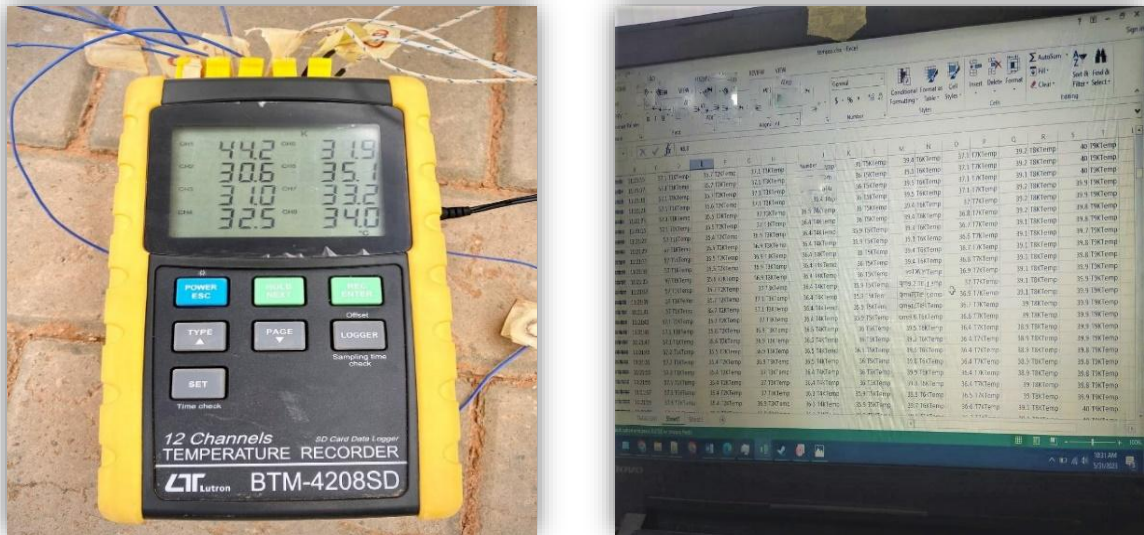


Figure III. 11. Photographie de système d'acquisition et de traitement des données

III.5. Matériels utilisés dans le laboratoire de l'URAER :

A) Dessiccateur

C'est un équipement de laboratoire en verre qui protège les matériaux de l'humidité. Il se compose d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle. Cet ensemble est fourni avec un disque perforé et une quantité adéquate de déshydratant (gel de silice) (**Figure III.12**).

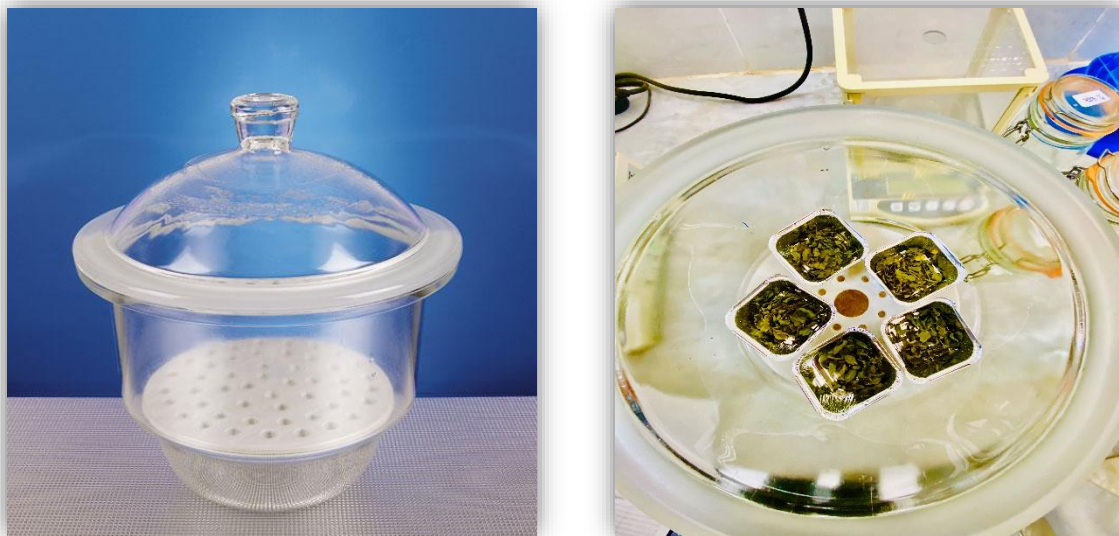


Figure III. 12. Photographies de dessiccateur utilisé dans le processus pour déterminer la teneur en eau initiale

B) Etuve

Il s'agit d'un appareil de chauffage fonctionnant sous pression atmosphérique, permettant d'effectuer différents traitements thermiques. Dans notre travail, il a été réglé à 105 °C pendant 24h afin de déterminer la teneur en matière sèche des échantillons préparés dans la **Figure III.13**.



Figure III. 13. Photographies de l'étuve utilisée pour déterminer la teneur en matière sèche

C) Balance

C'est un instrument de mesure utilisé pour suivre la masse pendant le séchage. Le contrôle est effectué par

pesée sur une balance précise (type KERN PCB 3500-2 Précision Balance à 3500g et Balance type KERN ABT20-4M à 220g/0,1m). Comme la montre la **figure III.13** et **figure III.14**.



Figure III. 14. Balance KERN ABT



Figure III. 15. Balance KERN PCB 3500-2

III.6. Matériels végétaux

III.6.1. Moringa :

Le Moringa est une plante aux feuilles riches en vitamines A, C, E et B, ainsi qu'en calcium, potassium, magnésium, manganèse, sélénium et fer. Elle renferme également de bons acides gras et les huit acides aminés essentiels (isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, valine). Cependant, les feuilles sont peu riches en phosphore et en lipides. Il convient de noter qu'elles contiennent naturellement de l'oxalate, un oxydant présent notamment dans les épinards. Les feuilles de Moringa sont bénéfiques pour les personnes carencées ou fatiguées, car elles procurent une énergie importante qui peut rivaliser avec celle fournie par les sucres lents. Elles possèdent également des propriétés antitumorales, anti-inflammatoires et antibactériennes, et sont réputées pour leurs effets neuroprotecteurs améliorant la mémoire et les fonctions cognitives chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer [77].

Les graines de Moringa sont particulièrement riches en acides gras, tels que l'acide oléique “oméga 9” et l'acide palmitoléique “oméga 7 “. Ces acides gras ont une action préventive contre les maladies cardiovasculaires en augmentant les taux de bon cholestérol et en réduisant les taux de mauvais cholestérol. Ils contribuent également à réguler la glycémie, ce qui est particulièrement

bénéfique pour les personnes prédisposées au diabète. Depuis des siècles, le Moringa est largement utilisé dans la médecine ayurvédique en raison des propriétés antiseptiques de sa sève lorsqu'elle est utilisée en application externe, de l'efficacité de son écorce bouillie contre les calculs rénaux, ainsi que des vertus de sa racine riche en polyphénols dans le traitement du paludisme, de l'asthme et des douleurs articulaires [77].



Figure III. 16. Le moringa

III.6.2. Menthe :

La menthe verte est une plante vivace de la famille des Lamiacées. Cette espèce peut atteindre 60 cm de hauteur. Elle possède des stolons qui assurent sa reproduction, la rendant envahissante. Ses feuilles sont vert foncé, aux bords dentelés. Ces feuilles portent des glandes qui sécrètent une essence. Ses fleurs, roses ou blanches, sont réunies en épis et apparaissent en été.

L'huile essentielle de menthe poivrée contient des composés actifs trouvés à l'origine dans les plantes à fleurs, de sorte qu'elle favorise la sécrétion de bile, est antibactérienne et anti-inflammatoire, et contient des antioxydants apaisants et relaxants. Les cétones de l'huile essentielle de menthe poivrée ont une action relaxante sur le système nerveux (en inhibant certains messagers), aidant à réduire les états d'anxiété ou de stress chroniques ; Très bonne odeur.

La menthe est utilisée dans de nombreux soins depuis la nuit des temps. Ses multiples vertus et modes d'utilisation en font l'une des plantes médicinales les plus appréciées. Il est connu pour soigner de nombreux troubles, dont les suivants sont parmi les plus courants : maladies de la peau, divers troubles digestifs, spasmes du côlon, colites, troubles digestifs fonctionnels d'origine hépatique, rhumes, obstruction nasale, troubles buccaux et gastriques. Plus. Il faut cependant veiller à ce que son utilisation soit interdite lors de la prise de médicaments homéopathiques. S'il

est pris en très grande quantité, il peut être excitateur et provoquer des convulsions. La menthe est également utilisée dans l'industrie alimentaire dans de nombreux produits du quotidien, comme le chocolat à la menthe (After Eight), les dentifrices et autres.



Figure III. 17. La menthe

III.7. Protocole de séchage :

III.7.1. Préparation des échantillons de Moringa :

Tout d'abord, nous avons bien lavé le moringa pour enlever les impuretés, la poussière, etc., au laboratoire, nous avons mis 5 échantillons de moringa dans le four pour déterminer la teneur en eau de cette herbe médicinale. La teneur en eau de le moringa initiale était de 2.06663 kg H₂O / kg d.b (67.25% base humide). Puis nous avons rempli les étagères de moringa, puis les avons mises dans les chariots de séchage, le chariot de séchage permet d'entrer et de retirer le produit de manière simple, puis à la fin nous mettons dans chaque séchoir un panier contenant une quantité de Moringa pesée à différentes périodes de séchage afin de tirer des conclusions et de comparer entre les séchoirs solaires direct et indirect, les figures 15 et 16 montrent :



Figure III. 18. Préparation de le moringa au laboratoire



Figure III. 19. Photographie de Moringa pendant le séchage

III.7.2. Préparation des échantillons de menthe :

Le 30 mai 2023, nous avons été fournis en menthe (*Mentha piperita*) de la commune de Metlili, province de Ghardaïa. La teneur en eau de la menthe initiale était de 3.83228 kg H₂O / kg d.b (77,74% base humide). Dans un premier temps, nous avons bien lavé la menthe avec l'eau du robinet pour se débarrasser de la poussière et des insectes, puis on la coupe en morceaux et on met 5 échantillons au four afin de déterminer la teneur en eau de la menthe, puis on remplit les deux séchoirs avec la menthe, puis nous mettons en chaque séchoir un panier contenant une quantité de menthe afin de la peser à différentes périodes de temps de séchage afin d'en tirer des conclusions et de comparer entre le séchoir solaire direct et indirect. Les figures 17 et 18 montent les étapes de travail.

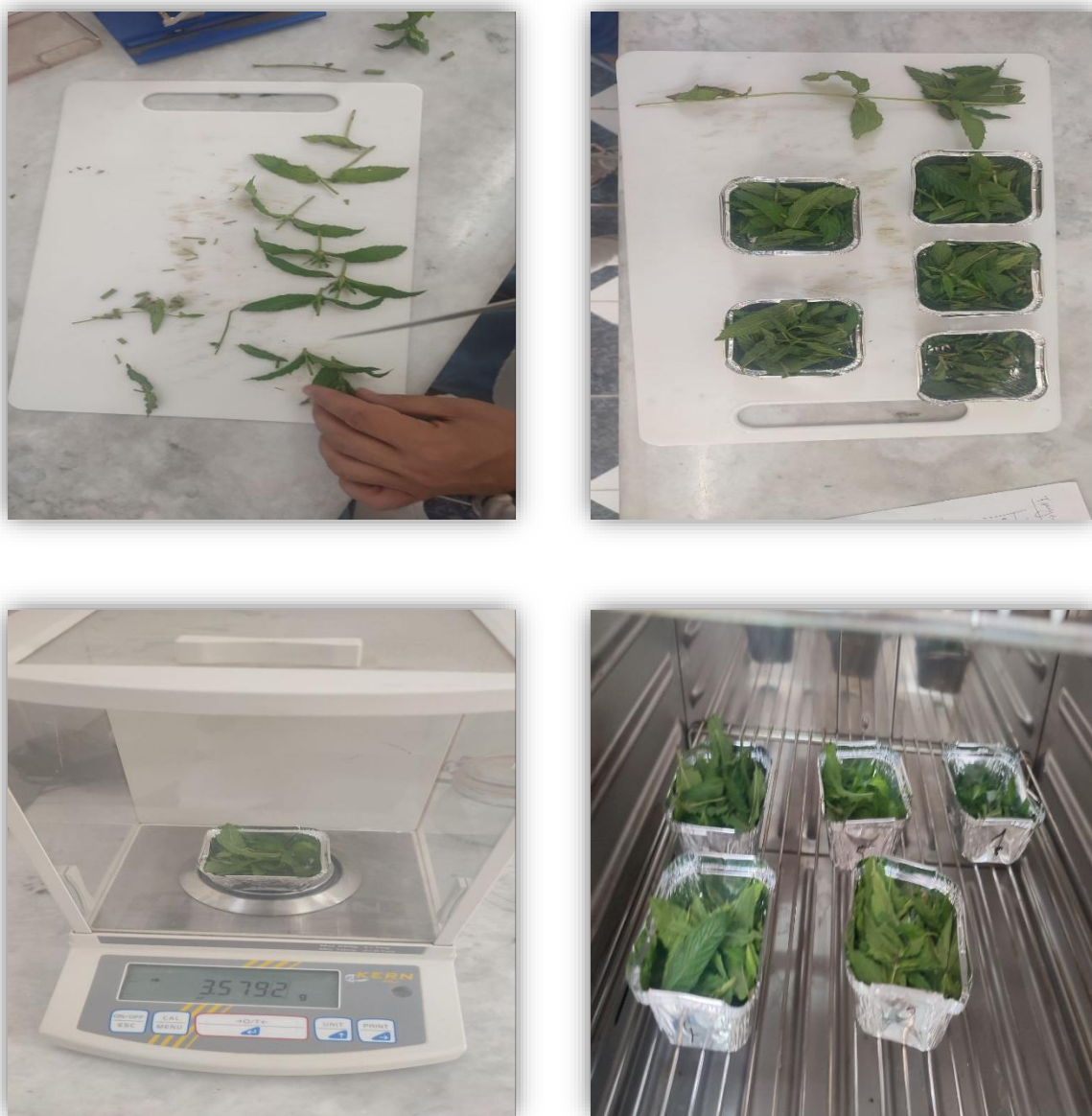


Figure III. 20. Préparation de la menthe au laboratoire



Figure III. 21. Photographie de Menthe pendant le séchage

III.8. Modélisation des cinétiques de séchage :

La modélisation des courbes de séchage consiste à trouver une relation mathématique décrivant le taux d'humidité en fonction du temps, que l'on peut exprimer sous la forme d'une équation caractéristique : $MR = f(t)$:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{Eq. 01.})$$

Les valeurs de la teneur en eau (base sèche) à l'instant t , à l'infini (équilibre) et à $t=0$ sont respectivement représentées par M_t , M_e et M_0 . Les vitesses de séchage ont été calculées en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 02.})$$

Avec $M_{t+\Delta t}$ et M_t représentant respectivement 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, et t désignant le temps de séchage en minutes. Étant donné la complexité des phénomènes impliqués lors du processus de séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de séchage. Les équations de ces modèles décrivent l'évolution de la teneur en eau réduite MR en fonction du temps. Ces formules contiennent des constantes qui sont ajustées afin d'ajuster les résultats théoriques aux courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables uniquement dans le domaine d'investigation expérimental pour lequel elles ont été établies.

Tableau III. 1. Equations empiriques pour décrire la cinétique de séchage solaire en couches minces d'un produit

	N° Modèles	Equation	Références
1	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model	$MR = (-kt)$	[Lewis, 1921]
2	Page Model	$MR = \exp - (kxn)$	[Xanthopoulos et al., 2007]
3	Herderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = (Aexp - kt)$	[Zhang and Litchfield, 1991]
4	Modied Page Model	$MR = \exp (- (kxn))$	[Midilli et al., 2002]
5	Logarithmic Model	$MR = (-kt) + c$	[Yaldyz and Ertekyn, 2001]

6	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = (-ktn) + bt$	[Midilli et al., 2002]
7	Diffusion Approximation (Diffusion Approach) Model	$MR = (-kt) + (1 - A) \exp(-kbt)$	[Balbay and Sahin, 2012]
8	Verma et al. (Modified Two-Term Exponential) Model	$MR = A \exp(-k_1t) + (1 - A) \exp(-k_2t)$	[Ruiz et al., 2013]
9	Two-Termes Model	$MR = A \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	[Akpinar et al., 2004]
10	Two-Termes Exponentiel Model	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-kAt)$	[Corzo et al., 2011]

Le modèle le plus approprié doit être identifié parmi ces dix modèles différents proposés par les auteurs, comme indiqué dans le tableau III.1. Des analyses de régression ont été réalisées à l'aide du logiciel "Origin Pro 2019b". Le coefficient de détermination (R^2) était l'un des critères principaux pour sélectionner le meilleur modèle afin de décrire les courbes de séchage (Balbay et al., 2012). En plus du coefficient de détermination (R^2), différents paramètres statistiques tels que le chi carré réduit (χ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) ont été utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement. Ces coefficients peuvent être calculés de la manière suivante [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{exp}} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. 03.})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (\text{Eq. 04.})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. 05.})$$

Avec :

$$\overline{MR_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad (\text{Eq. 06.})$$

MR_{exp} et $MR_{pré}$ représentent respectivement la teneur en eau observée lors de l'expérience et la teneur en eau prédite par le modèle. N est le nombre total d'observations et n est le nombre de constantes du modèle. L'analyse statistique et les méthodes de corrélation ainsi que les techniques

de régression sont largement utilisées dans la modélisation du comportement de séchage de différents produits agricoles. Les modèles de régression linéaire et non linéaire jouent un rôle essentiel pour établir une relation entre les variables, notamment lorsque les auteurs n'ont pas établi de relations empiriques préexistantes.

III.9. Détermination de la diffusivité effective de l'eau dans le produit :

Le taux de transfert de masse par diffusion pure est directement lié au gradient de concentration de la teneur en eau, en utilisant le coefficient de diffusion effective. Par conséquent, il est crucial de déterminer ce coefficient afin de mieux décrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire. L'équation de la loi de Fick similaire est exprimée par [Vasić et al., 2016] :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla[D_{eff} \nabla MR] \quad (\text{Eq. 07.})$$

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

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (\text{Eq. 08.})$$

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

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. 09.})$$

Ou : D_{eff} représente la diffusivité effective (en m^2/s), t est le temps (en s), (L) est la demi-épaisseur de la tranche (en m) et n est un entier positif. Pour des temps de traitement suffisamment longs, tous les termes de la séquence suivante ($n \geq 1$) ont été considérés comme négligeables par rapport au premier terme. Par conséquent, l'équation (Eq. 09.) peut être approximée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. 10.})$$

L'équation (Eq. III.11) peut être réorganisée et exprimée de la manière suivante :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (\text{Eq. 11.})$$

Les valeurs des données expérimentales de séchage sont exprimées en termes de $\ln(MR)$ en fonction du temps de réhydratation pour différentes températures. La diffusivité effective est calculée de la manière suivante :

$$\text{Slope}(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad (\text{Eq. 12.})$$

Dans ce chapitre de l'étude, plus précisément sur le stand de l'Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa, durant la période du 22 février au 15 juin 2023. L'effet du séchage solaire des végétaux a été étudié sur la base du comportement thermique des modèles de séchoirs solaires directs et indirects. Des expérimentations ont été menées en conditions réelles d'exploitation dans la région de Ghardaïa, située à 32,37° de latitude N et 3,77° de longitude Ouest. Les propriétés asséchantes de la menthe poivrée et du moringa ont été étudiées pendant trois jours consécutifs. Les températures ont été mesurées à différentes positions dans les prototypes des modèles de séchoirs solaires directs et indirects, et les performances thermiques de ces modèles ont été évaluées. L'étude a été réalisée de manière systématique et dans des conditions de fonctionnement réalistes, et les résultats et analyses correspondants ont été obtenus. Les données disponibles ont été utilisées pour évaluer les performances de chaque modèle, en déterminant sa capacité à sécher efficacement la menthe, le moringa et d'autres plantes.

IV.1. Comportement thermique des séchoirs solaire direct et indirect :

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement thermique de séchoirs solaires directs et indirects typiques, à partir des trois jours où le temps a été clément à cette période (Fig. IV.1) ; Ils représentent les différentes situations possibles. Nous commençons nos tests expérimentaux à vide (05-06/06/2023) et avec produit (07/06/2023) en mesurant la température dans différentes parties des prototypes de séchoirs solaires direct et indirect à convection forcée non bloquée. Nous avons placé des thermocouples à la sortie du capteur, à l'entrée, au milieu, à la sortie des séchoirs, ainsi que dans le milieu environnant. Des essais expérimentaux ont été réalisés sous éclairage variable par une journée ensoleillée afin que l'intensité maximale du rayonnement solaire soit enregistrée entre 12h30 et 14h30 et soit comprise entre 850 et 1100 W/m² (Fig. IV.1). La température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire direct atteint une valeur comprise entre 25 et 45 °C pour une température ambiante comprise entre 22 et 37 °C (Fig. IV.2) en période matinale. En sortie de capteur solaire à une valeur comprise entre 25 et 50 °C, et à l'intérieur du séchoir solaire indirect la température de l'air est comprise entre 25 et 47 °C, la température ambiante est comprise entre 22 et 37 °C (Fig. IV.3, Fig. IV.4) lorsque le rayonnement solaire est de faible intensité (en fin de journée) la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire diminue jusqu'à atteindre la température ambiante.

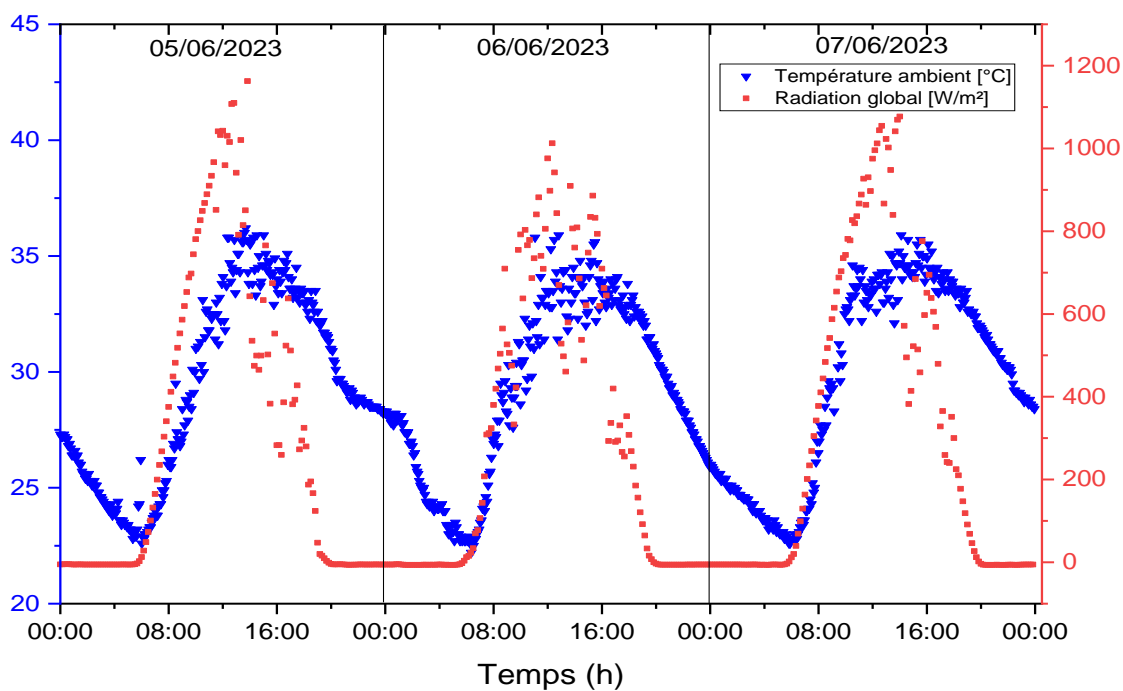


Figure IV. 1. Variations de la température ambiante et du rayonnement global au cours des journées d'essai

IV.2. Performance des séchoirs solaires direct et indirect (Avec et sans produit) :

IV.2.1. Direct:

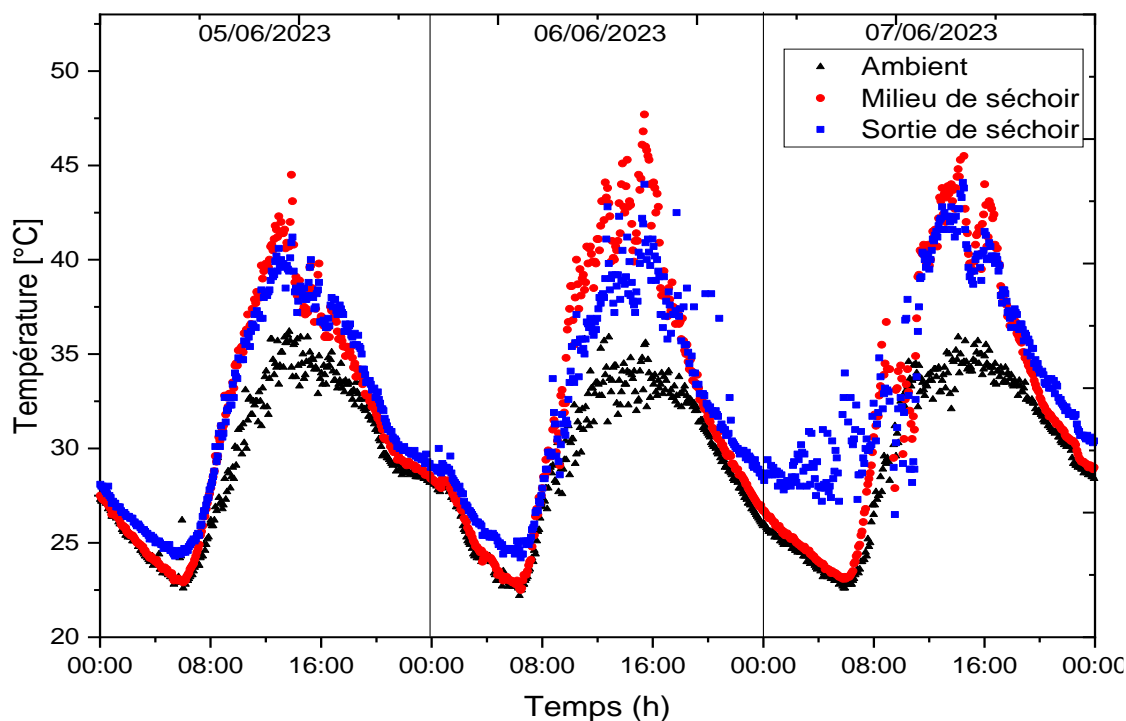


Figure IV. 2. Variation de la température au centre et sortie de séchoir solaire direct

IV.2.2. Indirect:

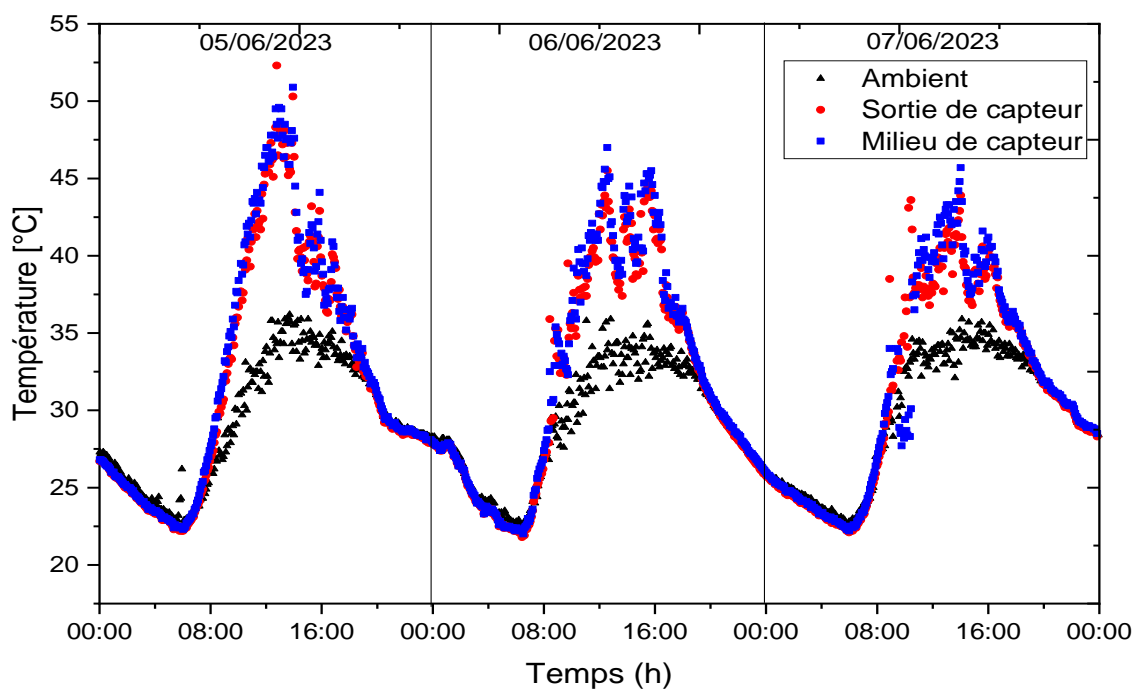


Figure IV. 3. Variation de la température au centre et sortie de capteur solaire

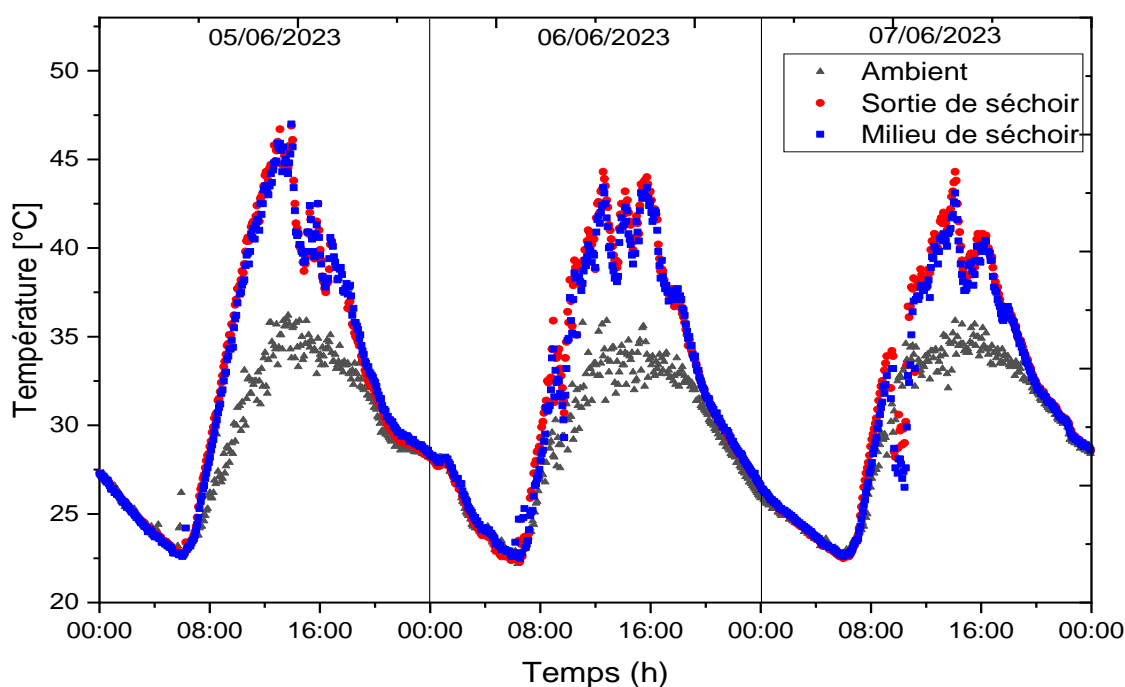


Figure IV. 4. Variation de la température au centre et sortie de séchoir solaire indirect

IV.3. Séchage solaire dans les prototypes de séchoir solaire direct et indirect :

IV.3.1 Séchage de le moringa et la menthe :

Les premières étapes de séchage de la menthe et du moringa ont été étudiées expérimentalement. Ces deux plantes ont été choisies en raison de leur valeur nutritionnelle et médicinale connue. Au

stade initial, la menthe et le moringa ont été séchés à l'aide des séchoirs solaires directs et indirects développé. Les températures ont été mesurées à différentes positions dans les prototypes et les données enregistrées sur trois jours consécutifs. Il s'avère que la phase de séchage initiale prend un temps spécifique en fonction de chaque plante. Le temps de séchage approprié pour la menthe et le moringa a été déterminé en fonction de la température optimale et des conditions environnementales. Une diminution progressive de la teneur en eau de la menthe et du moringa a été observée en fonction du temps, grâce à l'effet direct de la chaleur et de l'air chaud à l'intérieur du séchoir. Pour atteindre un teneur en eau inférieur à 10% pour le moringa, il a fallu 320 et 1860 min dans les séchoirs solaires directs et indirects, respectivement. Pour la menthe, il a fallu 520 et 2495 min pour atteindre le même teneur en eau dans les deux séchoirs, respectivement.

IV.3.2. Courbes de séchage :

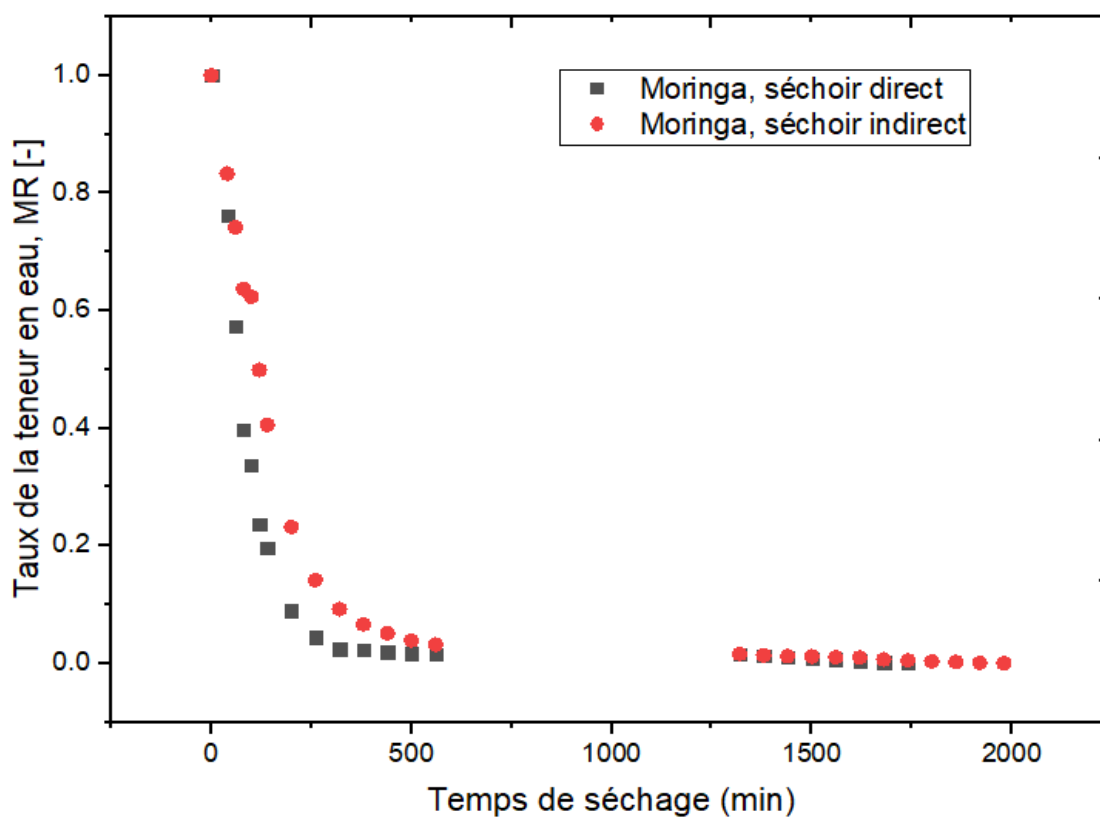


Figure IV. 5. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour le Moringa

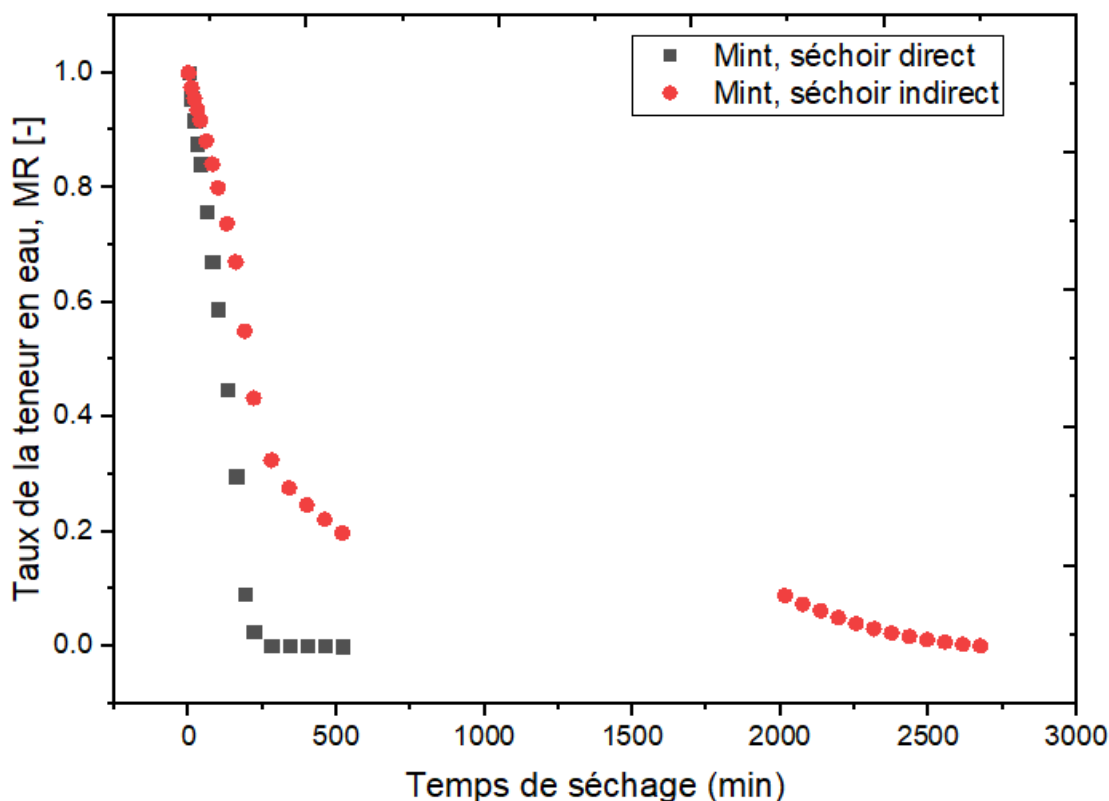


Figure IV. 6. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la Menthe

IV.3.2. Vitesse de séchage :

Le taux de séchage du moringa et de la menthe a été étudié comme un indicateur de la teneur en eau dans le processus de séchage solaire selon les prototypes. Il ressort clairement de la figure (IV.7) que le processus de séchage se compose de deux périodes principales, à savoir la période d'accélération et la période de descente, sans période de séchage fixe. Au début du processus de séchage, la vitesse de séchage augmente rapidement à mesure que la teneur en eau diminue jusqu'à atteindre un minimum. Par conséquent, la vitesse de séchage diminue progressivement à mesure que la teneur en eau continue de diminuer et les processus de séchage se produisent pendant la période de descente. L'effet du processus de séchage au soleil sur les taux de séchage a également été observé, ce qui est évident dans la figure (IV.7). Ces différences de taux de séchage reflètent l'influence de divers facteurs tels que la température, le rayonnement solaire et l'humidité relative sur le processus de séchage.

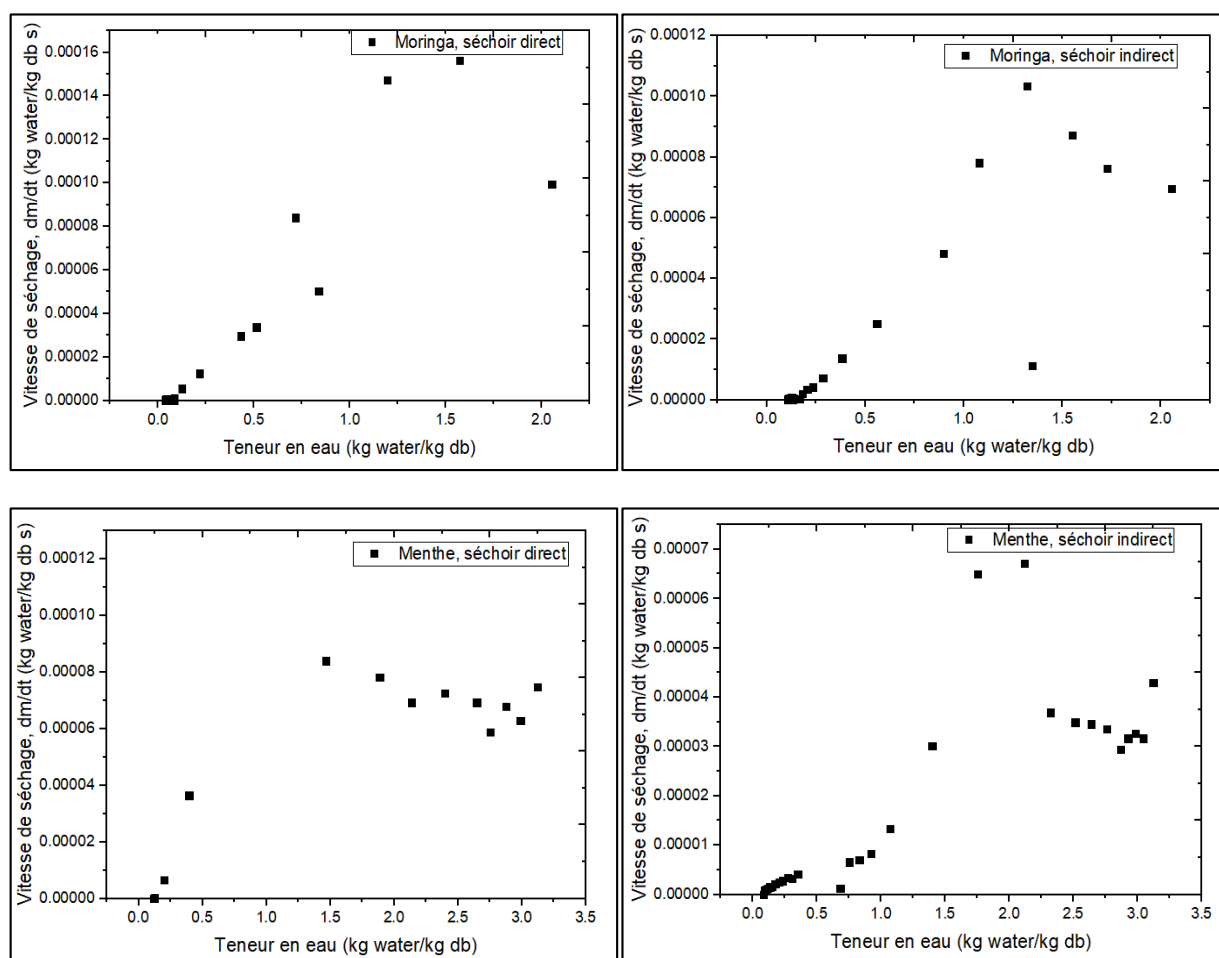


Figure IV. 7. Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau (kg water/kg db)

IV.4. Modèles empiriques du processus de séchage en couche mince :

IV. 4.1. Moringa :

Afin de déterminer le pourcentage de teneur en eau en fonction du temps de séchage, dix modèles différents de séchage en couche mince ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs d'analyse statistique données dans le tableau III.1, on suppose que le modèle le mieux ajusté est celui qui a le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, le quartile minimisant χ^2 le plus bas et l'erreur quadratique moyenne RMSE. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux indiquent les valeurs des modèles les mieux ajustés. Comme on peut le voir dans le tableau IV.1, par rapport aux modèles testés, le modèle exponentiel à deux termes et le modèle exponentiel à deux termes modifié a donné le meilleur accord avec les données expérimentales pour le séchoir solaire direct et le séchoir solaire indirect, respectivement,

Chapitre IV : Résultats et discussions

comme montre la figure IV.8.

Tableau IV. 1. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage pour le Moringa

	Modèle	Constants des modèles				R ²	RMSE	X ²	
		K		n	a				b
		k1	k2						
Séchoir direct	Newton	0.01069					0.9879	0.03074	9.44868E-4
	Page	0.00266		1.30627			0.9955	0.01924	3.70122E-4
	Page Modifié	0.01068		1.30578			0.9955	0.01924	3.70119E-4
	Henderson et Pabis	1.04754			0.0112		0.9896	0.02916	8.50022E-4
	Logarithmique	0.01131			1.04442	0.00417	0.9898	0.02971	8.82965E-4
	Midilli-Kucuk	0.00287		1.29324	1.01171	6.53578E-6	0.9961	0.01886	3.55725E-4
	Approximation de diffusion	0.0112			1.04754	2574.22087	0.9896	0.02991	8.9476E-4
	Two-Terms	0.0112	0.0112		0.55132	0.49616	0.9896	0.03073	9.44469E-4
	Two-Terms Exponentiel modifié	0.01047	0.01047		1		0.9877	0.0326	0.00106
	Two-Terms Exponentiel	0.01662			1.93444		0.9965	0.01696	2.87614E-4

	Modèle	Constants des modèles				R ²	RMSE	X ²	
		K		n	a				b
		k1	k2						
Séchoir indirect	Newton	0.00619					0.9895	0.03168	0.001
	Page	0.00171		1.25807			0.9968	0.01777	3.157E-4
	Page Modifié	0.00632		1.25293			0.9968	0.01776	3.15473E-4
	Henderson et Pabis	0.00663			1.05968		0.9921	0.02809	7.89242E-4
	Logarithmique	0.00666			1.0584	0.00181	0.9921	0.02866	8.21485E-4
	Midilli-Kucuk	0.00165		1.2661	0.99948	5.12034E-6	0.9972	0.01747	3.05137E-4
	Approximation de diffusion	0.00663			1.05962	2574.22087	0.9921	0.0287	8.23557E-4
	Two-Terms	0.0112	0.0112		0.55816	0.50146	0.9921	0.02934	8.60992E-4
	Two-Terms Exponentiel modifié	0.00868	0.02041		1.51345		0.9972	0.01719	2.95519E-4
	Two-Terms Exponentiel	0.00925			1.82325		0.9971	0.01694	2.86981E-4

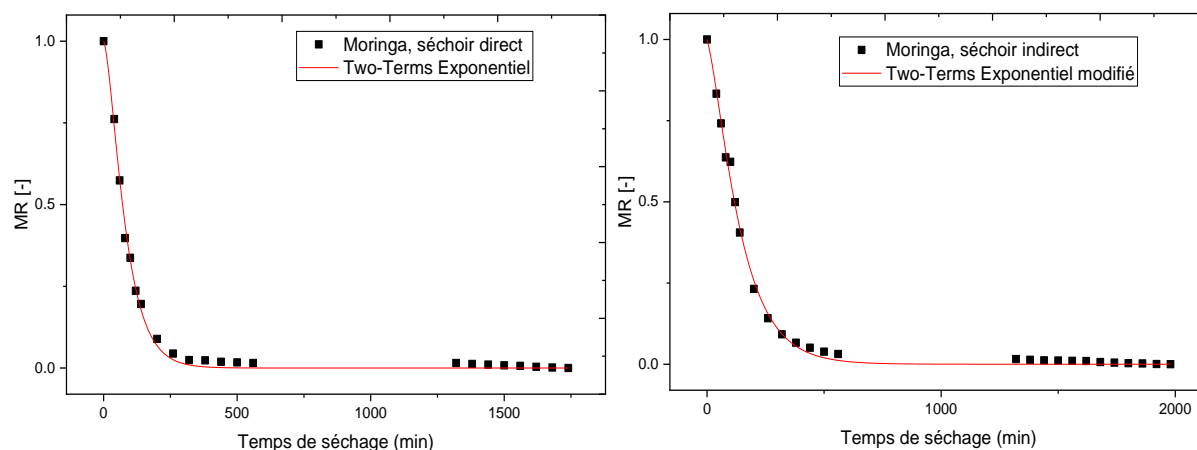


Figure IV. 8. Variation de la teneur en eau réduit en fonction de le temps séchage, modélisé par les modèles empiriques les plus approprié (moringa)

IV. 4.2. Menthe :

Afin de déterminer le pourcentage de teneur en eau en fonction du temps de séchage, dix modèles différents de séchage en couche mince ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs d'analyse statistique données dans le tableau III.1, on suppose que le modèle le mieux ajusté est celui qui a le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, le quartile minimisant χ^2 le plus bas et l'erreur quadratique moyenne RMSE. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux indiquent les valeurs des modèles les mieux ajustés. Comme on peut le voir dans le tableau IV.1, par rapport aux modèles testés, le modèle Midilli-Kucuk a donné le meilleur accord avec les données expérimentales pour la teneur en eau en fonction du temps pour le séchoir solaire direct et le séchoir solaire indirect, le modèle Midilli-Kucuk est le meilleur modèle adaptatif avec les données expérimentales, comme montre la figure IV.9.

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

Modèle	Constants des modèles				R ²	RMSE	X ²
	K		n	a			
	k1	k2					
Newton	0.00737				0.94557	0.09432	0.0089
Page	2.32489E-4	1.70889			0.99024	0.04126	0.02538
Page Modifié	0.00748	1.74768			0.9903	0.04113	0.00169
Henderson et Pabis	0.00822			1.09681	0.9571	0.08649	0.00748

Chapitre IV : Résultats et discussions

Séchoir direct	Logarithmique	0.00666		1.18485	-0.10774	0.96736	0.07809	0.0061	
	Midilli-Kucuk	6.36011E-5	1.95561	0.95065	-2.15526E-5	0.9936	0.03589	0.00129	
	Approximation de diffusion	0.00822		1.09681	2574.22087	0.9571	0.08953	0.00802	
	Two-Terms	0.00821	0.00821		0.91153	0.18504	0.9571	0.09291	0.00863
	Two-Terms Exponentiel modifié	0.01629	0.01637		205.96586		0.98424	0.05427	0.00295
	Two-Terms Exponentiel	0.01214			2.02396		0.98196	0.05608	0.00314

	Modèle	Constants des modèles				R ²	RMSE	X ²	
		K		n	a				b
		k1	k2						
Séchoir indirect	Newton	0.00318					0.98435	0.04779	0.00228
	Page	8.33717E-4		1.24568			0.98923	0.04038	0.00163
	Page Modifié	0.00337		1.23835			0.98923	0.04037	0.00163
	Henderson et Pabis	0.00342			1.0462		0.98681	0.04468	0.002
	Logarithmique	0.00362			1.01963	0.0301	0.98953	0.04057	0.00165
	Midilli-Kucuk	8.12513E-4	1.25284	1.00068	1.34701E-5	0.99217	0.03577	0.00128	
	Approximation de diffusion	0.00342			1.0462	1.90073E10	0.98681	0.04553	0.00207
	Two-Terms	0.00364	6.28518E-5		1.01525	0.0348	0.98953	0.04136	0.00171
	Two-Terms Exponentiel modifié	0.0041	0.01843		1.22521		0.99016	0.03933	0.00155
	Two-Terms Exponentiel	0.00497			1.82806		0.98955	0.03977	0.00158

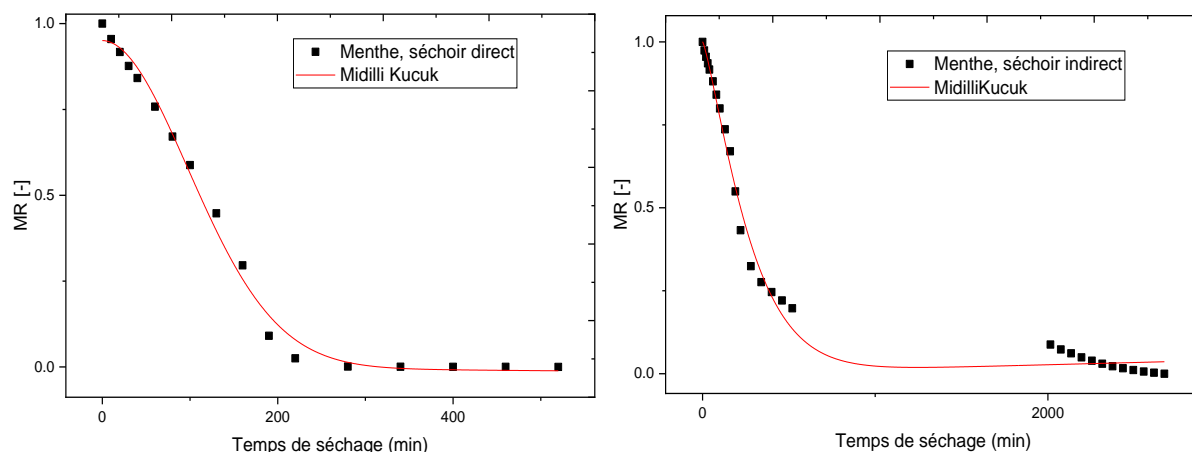


Figure IV. 9. Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps séchage, modélisé par les modèles empiriques les plus approprié (menthe)

IV.5. Détermination de la diffusivité effective de l’eau de la menthe

Pour analyser quantitativement la cinétique du processus de séchage, nous avons appliqué la deuxième loi de Fick pour calculer la diffusion effective de l'eau. Nous supposons que l'eau initiale est répartie de manière homogène dans tout l'échantillon. Lorsque la surface de l'échantillon est exposée aux conditions de l'air ambiant, la teneur en eau de la surface s'équilibre immédiatement. Le transfert de matière se produit uniformément dans la direction du film mince de l'échantillon adsorbé dans la plaque infinie. La résistance de transfert de masse sur la surface est négligeable par rapport à l'intérieur de l'échantillon, et on suppose que le coefficient de diffusion est constant et que le volume de l'échantillon ne change pas de manière significative. L'efficacité de la diffusion de l'eau a été déterminée par une solution analytique de la deuxième loi de Fick développée par Crank (1975) pour le cas de la plaque infinie. La partie linéaire de ce modèle permet de déterminer la diffusivité effective en faisant correspondre les raies de Ln (MR) en fonction du temps de séchage (t).

Tableau IV. 3. Résultats statistiques de la diffusivité effective moyenne du Moringa et le Menthe

	Diffusivité effective moyenne $Deff$ [$m^2.s^{-1}$]	R^2	RMSE	X^2
Séchoir direct, Moringa	3.55234E-09	0.90188	0.68625	0.47093
Séchoir indirect, Moringa	3.25949E-09	0.74184	0.98494	0.97011
Séchoir direct, menthe	2.65343E-08	0.93517	0.82771	0.68511
Séchoir indirect, menthe	1.97352E-09	0.9027	0.55703	0.31028

Le procédé de séchage à l'aide de séchoirs solaires a été étudié dans le cadre de recherches

sur diffusivité effective moyen de l'eau. Les résultats ont été analysés et documentés dans le tableau ci-joint (Tableau IV.3). Cette recherche vise à évaluer les performances des séchoirs solaires directs et indirects dans le séchage d'échantillons de feuilles de moringa et de menthe.

En ce qui concerne les séchoirs solaires directs utilisant du moringa et de la menthe, les résultats ont montré que la diffusivité moyen (D_{eff}) variait entre $3,55234E-09$ m²/s et $2,65343E-08$ m²/s. Des niveaux élevés d'accord ont été obtenus avec les données utilisées dans l'expérience, avec des valeurs R^2 allant de 0,90188 à 0,93517.

Quant aux séchoirs solaires indirects utilisant du moringa et de la menthe, les valeurs la diffusivité moyen (D_{eff}) variaient entre $3,25949E-09$ m²/s et $1,97352E-09$ m²/s. Bien que les valeurs de R^2 aient été légèrement inférieures par rapport aux séchoirs directs, la concordance entre les données était tout de même satisfaisante, avec des valeurs de R^2 allant de 0,74184 à 0,9027.

Conclusion générale :

En conclusion, cette étude menée au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables visait à comparer les performances d'un séchoir solaire indirect équipé d'un capteur solaire à celles d'un séchoir solaire direct sans capteur. Les deux séchoirs ont été conçus, construits et testés en utilisant des matériaux disponibles localement et peu coûteux dans la région de Ghardaïa, en tenant compte des conditions météorologiques locales. Des tests expérimentaux ont été effectués avec différentes configurations de charge et de non-charge pour le séchage de la menthe et du moringa.

Les résultats de cette étude ont démontré que les séchoirs solaires développés étaient capables d'atteindre un gain de température significatif de 15°C, maintenant efficacement des conditions de séchage optimales pour les plantes médicinales et aromatiques. Les temps de séchage de la menthe et du moringa varient de 520 à 2675 minutes, en fonction du produit spécifique à sécher. Pour modéliser la cinétique de séchage du moringa et de la menthe, les modèles Exponentiels à Deux Termes et Midilli-Kucuk, respectivement, ont donné les meilleurs résultats.

En outre, la diffusivité effective de l'humidité, une mesure de la façon dont l'humidité se déplace dans le matériau de séchage, s'est avérée varier de $2,65343E-08$ à $3,55234E-09$ m²/s au cours des expériences. Ces informations sont précieuses pour comprendre le comportement de séchage de la menthe et du moringa dans les séchoirs solaires et peuvent aider à optimiser la conception et le fonctionnement de systèmes de séchage similaires à l'avenir.

Les résultats de cette recherche ont des implications importantes dans le domaine des énergies renouvelables et de la transformation des produits agricoles. L'utilisation de séchoirs solaires construits à partir de matériaux locaux disponibles et abordables constitue une option viable et durable pour le séchage des plantes médicinales et aromatiques dans la région de Ghardaïa. Le gain de température obtenu par le séchoir solaire direct démontre sa supériorité sur le séchoir solaire indirect,

En outre, les modèles de cinétique de séchage identifiés fournissent des informations précieuses sur le comportement de séchage de la menthe et du moringa, qui sont largement utilisés à diverses fins, notamment médicinales et culinaires. Ces connaissances peuvent contribuer à l'amélioration des processus de séchage, ce qui permet d'obtenir des produits de meilleure qualité aux propriétés nutritionnelles et médicinales préservées.

En résumé, cette étude contribue au développement des applications des énergies renouvelables en évaluant et en comparant les performances des séchoirs solaires dans une région spécifique. Les résultats fournissent des informations pratiques pour la conception de systèmes de

Conclusion générale

séchage efficaces et rentables pour les plantes médicinales et aromatiques, avec des implications potentielles pour d'autres produits agricoles. Les recherches futures dans ce domaine pourraient se concentrer sur l'optimisation des paramètres de conception, l'exploration de différentes méthodes de séchage et l'étude de la faisabilité économique de la mise à l'échelle de ces technologies de séchage solaire.

Références bibliographiques :

1. Hegde, V.N., et al., *Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana*. Energy, Sustainability and Society, 2015. **5**(1): p. 23.
2. Bhardwaj, A.K., R. Kumar, and R. Chauhan, *Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region*. Solar Energy, 2019. **177**: p. 395-407.
3. Venkatachalam, S.K., A. Thottipalayam Vellingri, and V. Selvaraj, *Low-temperature drying characteristics of mint leaves in a continuous-dehumidified air drying system*. Journal of Food Process Engineering, 2020. **43**(4): p. e13384.
4. Heeger, E.F., *Handbuch des Arznei-und Gewurzpflanzenbaues*. 1956.
5. Qaas, F. and E.J.Z.f.A.-u.G. Schiele, *Einfluss der Energiekosten auf die Rentabilität im Trocknungsbetrieb*. 2001. **6**(3): p. 144-145.
6. Díaz-Maroto, M.C., et al., *Effect of drying method on the volatiles in bay leaf (Laurus nobilis L.)*. 2002. **50**(16): p. 4520-4524.
7. Arslan, D., M.M.J.F. Özcan, and B. Technology, *Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content, and color characteristics of savory leaves*. 2012. **5**: p. 983-991.
8. Janjai, S. and B.J.F.E.R. Bala, *Solar drying technology*. 2012. **4**: p. 16-54.
9. Hanaa, A.M., et al., *Lemongrass (Cymbopogon citratus) essential oil as affected by drying methods*. 2012. **57**(2): p. 113-116..
10. R. Omidbaigi, F. Sefidkon, and F. Kazemi, —*Influence of drying methods on the essential oil content and composition of Roman chamomile*, *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 19, no. 3. Wiley, pp. 196–198, Apr. 27, 2004.
11. Omidbaigi, R., et al., *Influence of drying methods on the essential oil content and composition of Roman chamomile*. 2004. **19**(3): p. 196-198.
12. Alara, O.R., et al., *Mathematical modeling of thin layer drying using open sun and shade of Vernonia amygdalina leaves*. 2018. **52**(1): p. 53-58.
13. Ebadi, M.T., et al., *Influence of different drying methods on drying period, essential oil content and composition of Lippia citriodora Kunth*. 2015. **2**(4): p. 182-187.
14. A. Sharma, C. R. Chen, and N. Vu Lan, —*Solar-energy drying systems: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7. Elsevier BV, pp. 1185–
15. M. T. Ebadi, M. Azizi, F. Sefidkon, and N. Ahmadi, —*Influence of different drying methods on drying period, essential oil content and composition of Lippia citriodora Kunth*,

- Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, vol. 2, no. 4. Elsevier BV, pp. 182–187, Dec. 2015.
16. Chou, S., K.J.T.i.F.S. Chua, and Technology, *New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs*. 2001. **12**(10): p. 359-369.
 17. E. Capecka, A. Mareczek, and M. Leja, —*Antioxidant activity of fresh and dry herbs of some Lamiaceae species*, *Food Chemistry*, vol. 93, no. 2. Elsevier BV, pp. 223–226, Nov. 2005.
 18. Rahimmalek, M., S.A.H.J.I.C. Goli, and Products, *Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of Thymys daenensis subsp. daenensis. Celak leaves*. 2013. **42**: p. 613-619.
 19. . Rabha, D. K., P. Muthukumar, and C. Somayaji. 2017. Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum chinense jacq.*) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy* 105:583–9.
 20. Winterhalter, P. and G.K.J.B.o.a.c. Skouroumounis, *Glycoconjugated aroma compounds: occurrence, role and biotechnological transformation*. 2006: p. 73-105.
 21. R. Omidbaigi, F. Sefidkon, and F. Kazemi, —*Influence of drying methods on the essential oil content and composition of Roman chamomile*, *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 19, no. 3. Wiley, pp. 196–198, Apr. 27, 2004.
 22. Amer, B.M., K. Gottschalk, and M.J.R.E. Hossain, *Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile*. 2018. **121**: p. 539-547.
 23. S. Janjai and B. K. Bala, —*Solar Drying Technology*, *Food Engineering Reviews*, vol. 4, no. 1. Springer Science and Business Media LLC, pp. 16–54, Nov. 25, 2011.
 24. Orphanides, A., V. Goulas, and V.J.F.E.R. Gekas, *Drying technologies: Vehicle to high-quality herbs*. 2016. **8**: p. 164-180.
 25. Antal, T. 2010. *Inspection of the technological characteristics influencing the quality of dried fruits and vegetables. PhD diss., University of Debrecen, Debrecen, Hungary.*
 26. P. R. Venskutonis, —*Effect of drying on the volatile constituents of thyme (Thymus vulgaris L.) and sage (Salvia officinalis L.)*, *Food Chemistry*, vol. 59, no. 2. Elsevier BV, pp. 219–227, Jun. 1997.
 27. Deans, S., K.P. Svoboda, and M.C.J.J.o.E.O.R. Bartlett, *Effect of microwave oven and warm-air drying on the microflora and volatile oil profile of culinary herbs*. 1991. **3**(5): p. 341-347.
 28. Thamkaew, G., et al., *A review of drying methods for improving the quality of dried herbs*. 2021. **61**(11): p. 1763-1786.

29. Alara, O., N. Abdurahman, and O.J.J.o.t.S.S.o.A.S. Olalere, *Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of Vernonia amygdalina leaves*. 2019. **18**(3): p. 309-315.
30. Yi, W. and H.Y.J.H. Wetzstein, *Effects of drying and extraction conditions on the biochemical activity of selected herbs*. 2011. **46**(1): p. 70-73.
31. Shahhoseini, R., et al., *Qualitative and quantitative changes in the essential oil of lemon verbena (Lippia citriodora) as affected by drying condition*. 2013. **31**(9): p. 1020-1028.
32. Piga, A., et al., *Influence of different drying parameters on the composition of volatile compounds of thyme and rosemary cultivated in Sardinia*. 2007.
33. Antal, T., et al., *Effect of drying methods on the quality of the essential oil of spearmint leaves (Mentha spicata L.)*. 2011. **29**(15): p. 1836-1844.
34. Díaz-Maroto, M., et al., *Effect of different drying methods on the volatile components of parsley (Petroselinum crispum L.)*. 2002. **215**: p. 227-230.
35. Díaz- Maroto, M.C., et al., *Changes produced in the aroma compounds and structural integrity of basil (Ocimum basilicum L) during drying*. 2004. **84**(15): p. 2070-2076.
36. Werker, E., *Trichome diversity and development*. 2000.
37. Soysal, Y.J.B.e., *Microwave drying characteristics of parsley*. 2004. **89**(2): p. 167-173.
38. Yousif, A., et al., *Headspace volatiles and physical characteristics of vacuum- microwave, air, and freeze- dried oregano (Lippia berlandieri Schauer)*. 2000. **65**(6): p. 926-930.
39. M. Fatouh, M. N. Metwally, A. B. Helali, and M. H. Shedid, —*Herbs drying using a heat pump dryer*,|| *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15–16. Elsevier BV, pp. 2629–2643, Sep. 2006.
40. T. C. Tham et al., —*Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump*,|| *Drying Technology*, vol. 35, no. 14. Informa UK Limited, pp. 1721–1732, Jun. 13, 2017.
41. S. K. Chou and K. J. Chua, —*New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs*,|| *Trends in Food Science & Technology*, vol. 12, no. 10. Elsevier BV, pp. 359–369, Oct. 2001.
42. Chou, S., K.J.T.i.F.S. Chua, and Technology, *New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs*. 2001. **12**(10): p. 359-369.
43. Jin, W., et al., *Novel drying techniques for spices and herbs: A review*. 2018. **10**: p. 34-45.
44. Schaarschmidt, S.J.F.C., *Public and private standards for dried culinary herbs and spices—part I: standards defining the physical and chemical product quality and safety*. 2016. **70**: p. 339-349.

45. E. Werker, —Trichome diversity and development,|| *Advances in Botanical Research*. Elsevier, pp. 1–35, 2000.doi: 10.1016/s0065-2296(00)31005-9
46. Rayaguru, K., W.J.J.o.F.S. Routray, and Technology, *Effect of drying conditions on drying kinetics and quality of aromatic Pandanus amaryllifolius leaves*. 2010. **47**: p. 668-673.
47. Ahmed, J. and M.S. Rahman, *Handbook of food process design, 2 Volume Set*. 2012: John Wiley & Sons.
48. Sledz, M., et al., *The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves*. 2016. **103**: p. 148-156.
49. Khan, M.K., et al., *Effect of novel technologies on polyphenols during food processing*. 2018. **45**: p. 361-381.
50. Tiwari, B. and T. Mason, *Ultrasound processing of fluid foods*, in *Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods*. 2012, Elsevier. p. 135-165.
51. T. C. Tham et al., —*Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump*,|| *Drying Technology*, vol. 35, no. 14. Informa UK Limited, pp. 1721–1732, Jun. 13, 2017.
52. L. Bennamoun, —*An Overview on Application of Exergy and Energy for Determination of Solar Drying Efficiency*,|| *International Journal of Energy Engineering*, vol. 2, no. 5. Scientific and Academic Publishing, pp. 184–194, Dec. 01, 2012.
53. A. Sharma, C. R. Chen, and N. Vu Lan, —*Solar-energy drying systems: A review*,|| *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7. Elsevier BV, pp. 1185–1210, Aug. 2009.
54. H. El Hage, A. Herez, M. Ramadan, H. Bazzi, and M. Khaled, —*An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment*,|| *Energy*, vol. 157. Elsevier BV, pp. 815–829, Aug. 2018.
55. K. J. Chua and S. K. Chou, —*Low-cost drying methods for developing countries*,|| *Trends in Food Science & Technology*, vol. 14, no. 12. Elsevier BV, pp. 519–528, Dec. 2003.
56. S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, —*A review on solar energy use in industries*,|| *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4. Elsevier BV, pp. 1777–1790, May 2011.
57. Souheyla Khaldi. *Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie*. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. (H1)

58. Moller, E. and W.D.K. Association, *Lumber drying tactics for the third millennium*. 1992.
59. Mohamed, L.A., et al., *Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection*. 2005. **46**(9-10): p. 1473-1483.
60. Janjai, S., N. Srisittipokakun, and B.J.E. Bala, *Experimental and modelling performances of a roof-integrated solar drying system for drying herbs and spices*. 2008. **33**(1): p. 91-103.
61. Srisittipokakun, N., K. Kirdsiri, and J.J.P.E. Kaewkhao, *Solar drying of Andrographis paniculata using a parabolicshaped solar tunnel dryer*. 2012. **32**: p. 839-846.
62. El-Sebaai, A.A. and S.M. Shalaby, *Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint*. *Energy Conversion and Management*, 2013. **74**: p. 109-116.
63. Sallam, Y., Aly, M., Nassar, A., Mohamed, E., 2015. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *J. Adv. Res.* 6, 171–178.
64. Ahmed, J., Shivhare, U., Singh, G., 2001. Drying characteristics and product quality of coriander leaves. *Food Bioprod. Process.* 79, 103–106.
65. Gulcimen, F., H. Karakaya, and A. Durmus, *Drying of sweet basil with solar air collectors*. *Renewable Energy*, 2016. **93**: p. 77-86.
66. Morad, M.M., El-Shazly, M.A., Wasfy, K.I., El-Maghawry, H.A.M., 2017. Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying peppermint plants. *Renew. Energy*.
67. Kareem, M., Habib, K., Ruslan, M., Saha, B., 2017. Thermal performance study of a multi-pass solar air heating collector system for drying of Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Renew. Energy*.
68. Bhardwaj, A., Chauhan, R., Kumar, R., Sethi, M., Rana, A., 2017. Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb). *Case Stud. Therm. Eng.* 10, 302–314.
69. Tellez, M.C., Figueroa, I.P., Tellez, B.C., Vidana, E.C., O. AL, 2018. Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. *Sol. Energy* 159,898–907.
70. Mohamed, L.A., Kouhila, M., Jamali, A., Lahsasni, S., Kechaou, N., M.M., 2005. Single layer solar drying behaviour of citrus aurantium leaves under forced convection. *Energy Convers. Manag.* 46, 1473–1483.
71. Amer, B., Gottschalk, K., Hossain, M., 2018. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. *Renew. Energy* 121, 539–547.

72. Sevik, S., Aktas, M., Dolgun, E., Arslan, E., Tuncer, A., 2019. Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. *Sol. Energy* 180, 537–549.
73. Lakshmi, D.V., Muthukumar, P., Ekka, J.P., Nayak, P.K., L.A., 2019. *Performance comparison of mixed mode and indirect mode parallel flow forced convection solar driers for drying Curcuma zedoaria. J. Food Process Eng.* 42, 1–12.
74. Bahammou, Y., Moussaoui, H., Lamsayeh, H., Tagnamas, Z., Kouhila, M., Ouaabou, R., Lamharrar, A., Iddimam, A., 2020. *Water sorption isotherms and drying characteristics of rupturewort (Herniaria hirsuta) during a convective solar drying for a better conservation. Sol. Energy* 201, 916–926.
75. Nimnuan, P., & Nabnean, S. (2020). *Experimental and simulated investigations of the performance of the solar greenhouse dryer for drying cassumunar ginger (Zingiber cassumunar Roxb.). Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100745.
76. Singh, S., Gill, R. S., Hans, V. S., & Singh, M. (2021). *A novel active-mode indirect solar dryer for agricultural products: Experimental evaluation and economic feasibility. Energy*, 222, 119956.
77. Bidima M., (2016) Production et transformation du Moringa, Wageningen, Proagro, CTA et ISF, 40 p76