



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 génie des procédés

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Thème : Effet des différents procédés de séchage solaire sur le rendement et la qualité des huiles essentielles de certaine plantes aromatiques de la région de Ghardaïa

Par :

BOUCHELAGHEM Ilyes & BERNOUS Hassan

Devant le jury composé de :

LAGHOUITER Oum Kelthoum	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Examineur
DAOUD Djamel	Directeur de Recherche	URAER. Ghardaïa	Examineur
BENSEDDIK Abdelouahab	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadreur
HELLALI Naima	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Co-Encadreur

Année universitaire 2021/2022

Dédicace

Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce

modeste travail

A ma chère maman

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

A mon cher papa

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

A ma famille

Mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements constants et leur soutien moral. Que dieu les protèges et leurs offre la chance et le bonheur.

Ilyes. Bouchelaghem

Dédicace

*Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce
modeste travail à tout les
personnes qui m'ont aidé de près ou de loin
à la réalisation de ce mémoire de master plus
particulièrement :*

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

— A mes très chers frères, mes sœurs.

— A toute ma famille.

— A tout mes enseignants.

— A tout mes amis.

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

Hassan. Bernous

Remerciements

Nos vifs remerciements vont tout particulièrement à dieu le tout puissant pour la Volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années D'études pour atteindre ce succès. Ce travail a été possible grâce à plusieurs personnes qui se sont toutes investies Soit par leurs apports scientifiques soit par leurs encouragements et qu'il nous est agréable de leur exprimer en quelques lignes toutes nos reconnaissances. Nos chaleureux remerciements s'adressent au directeur de mémoire Monsieur A. BENSEDIK pour avoir accepté l'encadrement de ce travail et apporter ses Éclairages judicieux, son énorme aide, ses conseils, ses suggestions, ses Encouragements incessants et le temps qu'il nous a accordé. Nous tenons à remercier notre professeur Madame N.HELLALI pour la qualité de sujet qu'elle nous a proposé, pour nous avoir fait bénéficier de ses Connaissances scientifiques, son judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter Nos réflexions, Nous tenons à remercier l'ingénieur laboratoire de systèmes énergétique pour l'agriculture Khadidja OULED HADJ YUCEF, pour assistance permanente et efforts à notre égard afin de mettre terme notre travail.

Résumé

Le séchage est la méthode la plus courante de conservation des plantes médicinales et aromatiques et, en raison des coûts d'investissement et d'énergie élevés, le séchage est également une dépense importante dans la production des plantes médicinales et aromatiques. La qualité du médicament et, par conséquent, les gains sont considérablement influencés par le régime de séchage. Généralement, des températures de séchage basses comprises entre 30 et 50°C sont recommandées pour protéger les principes actifs sensibles, mais le processus de séchage ralenti entraîne une faible capacité des installations de séchage. Par conséquent, l'objectif de la recherche en séchage des plantes médicinales et aromatiques est de trouver la température de séchage optimale pour différentes espèces de plantes médicinales et aromatiques en termes de qualité et de coûts de séchage. Des technologies de séchage basées sur l'énergie solaire sont nécessaires pour contrer la dépendance aux combustibles fossiles. Outre la réduction de la consommation de carburant, les séchoirs solaires sont facilement adaptables aux communautés rurales qui dépendent fortement du processus de séchage. Dans ce travail de Master, les différentes méthodes de séchoirs solaires, sont examinés. Trois méthodes de séchage solaire (séchoir solaire direct de type serre, séchoir solaire indirect et séchage solaire à air libre) ont été testées en conditions climatiques semi-aride pour le séchage des plantes médicinales et aromatiques de *Aloysia citrodora* (Louisa) et *P. scoparius* (Guezzah) dans la ville de Ghardaïa. Le comportement au séchage a été suivi pendant tous les essais expérimentaux. Les échantillons séchés et les feuilles fraîches ont été hydrodistillés et le rendement en huiles essentielles ont été déterminés. Pour les différents essais réalisés, les paramètres de performance retenus pour l'évaluation incluaient la teneur en eau, la cinétique de séchage et la diffusivité effective. Dix modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage de *Aloysia citrodora* (Louisa) et *P. scoparius* (Guezzah). Les résultats ont montré que les modèles de **Two-Terms** et **Diffusion Approximation** étaient les plus adaptés pour décrire la cinétique de séchage de *Aloysia citrodora* (Louisa) et *P. scoparius* (Guezzah).

Mots-clés: séchage plantes médicinales et aromatiques, séchoirs solaires; comportement thermique; cinétique de séchage; modèles empiriques; diffusivité effective; feuilles d'*Aloysia citrodora* (Louisa); *P. scoparius* (Guezzah).

ملخص

التجفيف هو الطريقة الأكثر شيوعًا للحفاظ على النباتات الطبية والعطرية، وبسبب ارتفاع الاستثمار وتكاليف الطاقة، يعتبر التجفيف أيضًا من النفقات الرئيسية في إنتاج النباتات الطبية والعطرية. تتأثر جودة الدواء وبالتالي المكاسب بشكل كبير بنظام التجفيف. بشكل عام، يوصى باستخدام درجات حرارة منخفضة للتجفيف بين 30 و 50 درجة مئوية لحماية المكونات النشطة الحساسة، ولكن عملية التجفيف البطيئة تؤدي إلى انخفاض سعة مرافق التجفيف. لذلك، فإن الهدف من البحث في تجفيف النباتات الطبية والعطرية هو إيجاد درجة حرارة التجفيف المثلى لأنواع مختلفة من النباتات الطبية والعطرية من حيث جودة التجفيف والتكلفة. هناك حاجة لتقنيات التجفيف القائمة على الطاقة الشمسية لمواجهة الاعتماد على الوقود الأحفوري. بصرف النظر عن تقليل استهلاك الوقود، فإن مجففات الطاقة الشمسية قابلة للتكيف بسهولة مع المجتمعات الريفية التي تعتمد بشكل كبير على عملية التجفيف. في أطروحة الماجستير هذه، يتم فحص الطرق المختلفة لمجففات الطاقة الشمسية. تم اختبار ثلاث طرق للتجفيف الشمسي (مجفف شمسي مباشر من نوع الدفيئة، مجفف شمسي غير مباشر، مجفف شمسي في الهواء الطلق) في ظروف مناخية شبيهة قاحلة لتجفيف النباتات الطبية والعطرية من لويزا (*Aloysia citrodora*) و القزاح (*P. scoparius*) في مدينة غرداية. تمت مراقبة سلوك التجفيف خلال جميع الاختبارات التجريبية. تم تقطير العينات المجففة والأوراق الطازجة وتم تحديد محصول الزيوت العطرية، وبالنسبة للاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها، تضمنت معايير الأداء التي تم الاحتفاظ بها للتقييم محتوى الماء وحركية التجفيف والانتشار الفعال. تم استخدام عشرة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف *P.scoparius* و *Aloysia citrodora*. أوضحت النتائج أن نموذجي *Two-Terms* و *Diffusion Approximation* هما الأنسب لوصف حركية التجفيف في *P.scoparius* و *Aloysia citrodora*.

الكلمات المفتاحية: تجفيف النباتات الطبية والعطرية، مجففات الطاقة الشمسية. السلوك الحراري حركية

التجفيف نماذج تجريبية انتشار فعال أوراق *Aloysia citrodora* (لويزا) و *P.scoparius* (القزاح).

Summary

Drying is the most common method of preserving medicinal and aromatic plants, and due to high investment and energy costs, drying is also a major expense in the production of medicinal and aromatic plants. The quality of the drug and, therefore, the gains are significantly influenced by the drying regime. Generally, low drying temperatures between 30 and 50°C are recommended to protect sensitive active ingredients, but the slow drying process results in low capacity of drying facilities. Therefore, the aim of research in drying of medicinal and aromatic plants is to find the optimum drying temperature for different species of medicinal and aromatic plants in terms of drying quality and cost. Drying technologies based on solar energy are needed to counter the dependence on fossil fuels. Apart from reducing fuel consumption, solar dryers are easily adaptable to rural communities that are

highly dependent on the drying process. In this Master thesis, the different methods of solar dryers are examined. Three solar drying methods (direct greenhouse-type solar dryer, indirect solar dryer and open-air solar dryer) were tested in semi-arid climatic conditions for the drying of medicinal and aromatic plants of *Aloysia citrodora* (Louisa) and *P.scoparius* (Guezzah) in the city of Ghardaia. The drying behavior was monitored during all the experimental tests. The dried samples and the fresh leaves were hydrodistilled and the yield of essential oils was determined. For the various tests carried out, the performance parameters retained for the evaluation included the water content, the drying kinetics and the effective diffusivity. Ten mathematical models were used to describe the drying kinetics of *Aloysia citrodora* (Louisa) and *P. scoparius* (Guezzah). The results showed that the ***Two-Terms*** and ***Diffusion Approximation*** models were the most suitable to describe the drying kinetics of *Aloysia citrodora* (Louisa) and *P. scoparius* (Guezzah).

Keywords: drying medicinal and aromatic plants, solar dryers; thermal behavior; drying kinetics; empirical models; effective diffusivity; leaves of *Aloysia citrodora* (Louisa); *P.scoparius* (Guezzah).

Liste des tableaux

Tableau I.1. Résumé des recherches récentes sur le séchage solaire des herbes médicinales.....	24
Tableau I.2. Effets des prétraitements sur la qualité des herbes séchées.....	33
Tableau II.1. Avantages et inconvénients de différentes méthodes d'extraction.....	42
Tableau III.1. Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces.....	58
Tableau III.2. Période de récolte, d'extraction et la durée de séchage.....	62
Tableau IV.1. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour <i>Louisa</i>	70
La suite de tableau IV.1	71
Tableau IV.2. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de l' <i>Louisa</i> en couche mince.....	73
Tableau IV.3. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour <i>Guezzah</i>	78
La suite de tableau IV.3	79
Tableau IV.4. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la <i>P. scoparius</i> en couche mince.....	81
Tableau IV.5. Quantités d'HE obtenues de <i>P. scoparius</i>	81
Tableau IV.6. Rendements d'HE obtenues de <i>P. scoparius</i>	82
Tableau IV.7. Propriétés organoleptiques des HE obtenues de <i>P. scoparius</i>	82
Tableau IV.8. Réfraction d'HE obtenues de <i>P. scoparius</i>	83

La liste des figures

Figure I.1. Séchoir naturel.....	17
Figure I.2. Classement séchage solaire.....	17
Figure I.3. Schéma séchoir solaire passif.....	19
Figure I.4. Schéma séchoir solaire actif.....	20
Figure I.5. Schéma séchoir solaire direct.....	21
Figure I.6. Schéma Séchoir solaire indirect.....	22
Figure I.7. Schéma séchoir solaire mixte.....	23
Figure II.1. Répartition géographique en Afrique du Nord de la plante <i>pituranthos scoparius</i>	37
Figure II.2. Photo originale Partie aérienne de <i>Pituranthos scoparius</i> Oued Ntissa Ghardaïa: Mai 202	37
Figure II.3. Photo originale Fleures de la plante <i>Pituranthos scoparius</i>	37
Figure II.3. Photo originale de la plante <i>Aloysia citrodora</i> Ntissa Ghardaïa: Avril 2022	41
Figure III.1. Schéma des méthodes de séchage.....	44
Figure III.2. Dessine technique des composants du capteur *S*	45
Figure III.3. Le prototype utilisé pour sécher <i>P. scoparius</i> et <i>Louisa</i> . Le modèle de gauche est MCP et celui de droite avec chicanne.....	45
Figure III.4. Capteur solaire avec chicanes.....	46
Figure III.5. Capture solaire avec MCP.....	46
Figure III.6. Photographie d'une armoire de séchage (frigo).....	47
Figure III.7. Séchoirs solaire direct de type serre (trapézoïdal).....	48
Figure III.8. Séchoirs solaire direct de type serre (tunnel).....	48
Figure III.9. Photographie de système d'acquisition et de traitement des données.....	49
Figure III.10. Acquisition et de traitement des données-Recorder PCE-T 1200.....	49
Figure III.11. Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche.....	50
Figure III.12. Photographies de dessiccateur utilisé pour déterminer la teneur en eau initiale.....	50
Figure III.13. Balance KERN ABJ10mg-220g.....	51
Figure III.14. Balance KERN PCB 3500-2: 3500g.....	51
Figure III.15. <i>Louisa</i>	52

Figure III.16. <i>Pituranthos scoparius</i>	52
Figure III.17. Triage, lavage et découpage de <i>Louisa</i>	53
Figure III.18. Préparation les cinq coupelles.....	53
Figure III.19. Les échantillons les séchoirs.....	54
Figure III.20. Schéma représentant le protocole de séchage de la <i>Pituranthos scoparius</i>	55
Figure III.21. Schéma général de la procédure expérimentale.....	61
Figure III.22. Photo original de montage d'hydrodistillation utilisé.....	62
Figure III.23. Décantation.....	63
Figure III.24. L'HE obtenue après l'hydrodistillation et la décantation.....	63
Figure III.25. Réfractomètre.....	64
Figure IV.1. Photographies d'échantillons de <i>Louisa</i> et <i>P. scoparius</i>	66
Figure IV.2 : Evolution des températures de prototype de séchoir solaire direct durant journées de séchage d' <i>Aloysia citrodora</i> (<i>Louisa</i>) du 12 au 14 avril 2022.....	67
Figure IV.3. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour <i>Louisa</i>	68
Figure IV.4. Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits.....	69
Figure IV.5. Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de <i>Louisa</i>	72
Figure IV.6. Evolution des températures de prototype de séchoir solaire direct durant journées de séchage <i>P.scoparius</i> (<i>Guezzah</i>) du 11 au 14 mai 2022.....	74
Figure IV.7. Evolution des températures de prototype de séchoir solaire indirect durant journées de séchage <i>P.scoparius</i> (<i>Guezzah</i>) du 11 au 12 mai 2022.....	75
Figure IV.8. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour <i>P.scoparius</i>	76
Figure IV.9. Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits.....	77
Figure IV.10. Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de <i>Guezzah</i>	80

Liste des abréviations

AAT: Activité Antioxydante Totale.

CEP: Champ électrique pulsé.

HE: Huile essentielle.

ISO: Organisation Internationale de Normalisation.

MCP: Matière changement de phase.

OSF: Offset Strip Fins

OMS: Organisation Mondiale de la Santé.

UHP: Ultrasons de Haute Puissance.

L : la demi d'épaisseur de la tranche

R_{HEs}: Rendement de l'Huile Essentielle.

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

R² : le coefficient.

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

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

N : nombre d'observations.

n : nombre de constantes du modèle.

χ² : khicarré réduit.

t : le temps s.

D_{eff} : la diffusivité effective *m²/s.*

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

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

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

M_t : humidité absolue du produit à l'instant *t* à base sèche *kg eau/kg MS.*

M_e : humidité absolue du produit initiale à base sèche *kg eau/kg MS.*

MR_{eq} : humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche *kg eau/kg MS.*

ΔT : la variation de température *K.*

Sommaire

Introduction générale.....	I
Chapitre I. Généralité sur les séchoirs solaires.....	1
I.1. Méthodes de séchage des herbes :.....	2
I.1.1. Séchage solaire :.....	2
I.1.2. Séchage à l'ombre :.....	3
I.1.3. Séchage solaire assisté :	5
I.1.4. Séchage à l'air chaud :	7
I.1.4.1. Effet de la température et de l'humidité de l'air sur la qualité des herbes séchées :.....	8
I.1.5. Lyophilisation (séchage à froid) :	10
I.1.6. Séchage par micro-ondes :	11
I.1.7. Séchage sous vide par micro-ondes :	11
I.1.8. Séchage assisté par pompe à chaleur :	12
I.1.9. Méthodes de séchage hybrides :	13
I.2. Caractéristiques de qualité des herbes séchées :	14
I.2.1. Composés aromatiques :	14
I.2.2. Couleur des herbes séchées:	15
I.3. Séchage solaire :	16
I.3.1. Séchoir naturel :	16
I.3.2. Classement séchage solaire :	17
I.3.3. Mode flux d'air :	18
I.3.3.1 Séchoir solaire passif :	18
I.3.3.2. Séchoir solaire actif :	19
I.3.4. Mode de transfert de chaleur :	20

I.3.4.1. Séchoir solaire direct :	20
I.3.4.2. Séchoir solaire indirect :	21
I.3.4.3. Séchoir solaire mixte :	22
I.3.4.4. Séchoir solaire hybride :	23
I.4. Séchage solaire des herbes médicinales :	24
I.5. Prétraitements pour le séchage des herbes :	28
I.5.1. Blanchiment :	28
I.5.2. Champ électrique pulsé (CEP) :	30
I.5.3. Ultrason :	31
Chapitre II Généralité sur les plantes utilisées.....	34
Introduction:	35
II.1. Le genre de <i>Pituranthos</i> :	36
II.1.1. <i>Pituranthos scoparius</i> :.....	36
II.1.1.1. Définition :	36
II.1.1.2. Médecine traditionnelle et connaissance locale :.....	38
II.1.1.3 Compositions chimiques :	38
II.1.2. Généralité sur les huiles essentielles :	39
II.1.2.1. Définition, localisation et répartition des huiles essentielle :	39
II.1.2.2. Composition chimique des huiles essentielles :	39
II.1.2.3. Composition chimique des huiles essentielles de <i>Pituranthos scoparius</i> :.....	40
II.2. <i>Aloysia citrodora</i> :	41
II.3. Méthodes d'extraction des huiles essentielles.....	42
Chapitre III. Matériels et méthodes.....	43
Partie 1: MATERIEL DU SECHAGE:.....	44

III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER.....	44
III.1.1 Description du prototype expérimental:	44
III.1.1.1. Séchage indirect:	44
III.1.1.2. Séchage direct:	47
III.1.1.3. Acquisition et traitement des données	49
III.2. MATERIEL DE LABORATOIRE DE L'URAER:	50
III.2.1. Etuve.....	50
III.2.2. Dessiccateur.....	50
III.2.3. Balance:	51
III.3. MATERIEL VEGETAL:.....	51
III.3.1. <i>Aloysia citrodora</i> (Louisa):	51
III.3.2. <i>Pituranthos scoparius</i> (Guezzah):	52
III.3.3. Protocole de séchage de <i>Louisa</i> :	53
III.3.4. Protocole de séchage de <i>Pituranthos scoparius</i> :	54
III.4. Détermination de la teneur en eau initiale:	56
III.5. Modélisation des cinétiques de séchage:	56
III.6. Détermination de la diffusivité effective de l'eau:	59
Partie 2 : HUILE ESSENTIELLE.....	61
III.1. MATERIEL VEGETAL.....	61
III.2. Matériels au laboratoire:.....	62
A. Hydrodistillation.....	62
B. Décantation.....	62
C. L'indice de réfraction.....	63
D. Calcul du rendement.....	64

IV. Séchage de <i>Louisa</i> et de <i>P. scoparius</i> dans les séchoirs direct, indirect et air libre:	67
IV.1. Cas 1 : séchage d'<i>Aloysia citrodora</i> (<i>Louisa</i>) le 12 avril 2022:	67
IV.1.1. Comportements thermique :.....	67
A. Prototype de séchoir solaire direct.....	67
IV.1.2. Cinétique de séchage.....	68
IV.1.3. Modélisation empiriques du processus de séchage en couche mince.....	69
IV.1.4. Détermination de la diffusivité effective de l'eau de <i>Louisa</i> :.....	71
IV.2. Cas 2 : séchage <i>P.scoparius</i> (<i>Guezzah</i>) le 11 mai 2022:	74
IV.2.1. Comportements thermique :.....	74
A. prototype de séchoir solaire direct.....	74
B. prototype de séchoir solaire indirect.....	75
IV.2.3. Modélisation empiriques du processus de séchage en couche mince.....	77
IV.2.4. Détermination de la diffusivité effective de l'eau de <i>Guezzah</i> :.....	80
IV.2.5. Les huiles essentielles de <i>P.scoparius</i>	81
IV.2.5.1. Calcul de rendement:.....	81
IV.2.5.2. Propriétés organoleptiques:.....	82
IV.2.5.3. L'indice de réfraction :.....	82
Conclusion générale	84
Références	86

INTRODUCTION GENERALE

Le séchage est la méthode la plus courante et la plus fondamentale pour la conservation post-récolte des plantes médicinales et aromatiques car il permet la conservation rapide des qualités médicinales et aromatiques de la matière végétale d'une manière simple. Une distinction de qualité était déjà faite il y a 4000 ans dans l'Egypte ancienne entre les plantes médicinales et aromatiques séchées au soleil et celles séchées à l'ombre [1]. Cependant, des facteurs tels que l'échelle de production, la disponibilité de nouvelles technologies et les normes de qualité pharmaceutique doivent être pris en compte pour le séchage des plantes médicinales et aromatiques à l'époque moderne. Le séchage naturel, c'est-à-dire le séchage sans énergie auxiliaire sur le terrain ou dans des hangars, ne doit être envisagé que pour le séchage de petites quantités. En cas de production de masse, l'utilisation d'applications techniques de séchage est indispensable. Pour la conservation des principes actifs des matières végétales médicinales et aromatiques, des températures de séchage relativement basses sont recommandées et, par conséquent, la durée de séchage est comparativement longue. Le séchage représente 30 à 50 % des coûts totaux de la production de plantes médicinales [2] et, par conséquent, il est crucial que les facteurs déterminant les coûts élevés soient identifiés. Actuellement, la demande énergétique du séchage représente un facteur de coût important, notamment avec l'augmentation du prix des énergies fossiles. Cela est dû en grande partie à la forte teneur en humidité des fleurs, des feuilles ou des racines à sécher. Par exemple, le séchage de matière végétale avec une teneur en humidité de 80 % nécessitera 4 kg d'élimination d'eau afin d'obtenir 1 kg de matière sèche avec une teneur en humidité stockable de 11 %. De plus, les besoins en chaleur spécifique, tels que 10 000 kJ par kg d'eau éliminés lors du séchage des médicaments à base de plantes, sont doubles par rapport au séchage des céréales. Ainsi, les besoins énergétiques du séchage sont considérables et représentent une dépense importante dans le procédé de séchage, qui est déjà le coût le plus élevé dans le traitement des plantes médicinales et aromatiques. De plus, les performances de séchage ont une influence déterminante sur la qualité du produit et, par conséquent, sur sa valeur. La combinaison optimale de la conception du séchoir, de la méthode opérationnelle, de la consommation d'énergie et du maintien de la qualité du produit nécessite des décisions de gestion cruciales. Des recherches sont nécessaires pour appuyer la prise de décision en vue de la réalisation de conditions de séchage optimales. L'énergie solaire étant gratuite, le développement de nouvelles techniques de séchage assisté par l'énergie solaire a retenu l'attention des chercheurs. Ce développement vise à augmenter l'efficacité énergétique du processus de séchage et à surmonter les problèmes majeurs du séchage au soleil traditionnel. Beaucoup de ces nouveaux développements dans le séchage solaire ont montré une

amélioration considérable par rapport au séchage solaire traditionnel, en particulier en ce qui concerne l'efficacité énergétique du processus et la qualité des produits séchés. Cependant, les études sur l'effet de ces processus sur l'arôme et la couleur des herbes culinaires séchées font encore défaut.

C'est dans ce contexte que se situe cette étude qui vise à contribuer à la valorisation de deux plantes médicinales et aromatiques : *l'Aloysia citrodora* (Louisa) et le *Pituranthos scoparius* (Guezzah) de la région de Ghardaïa par différents procédés de séchage solaire.

Les objectifs de ce travail peuvent être ainsi définis :

- i) étudier et comparer les caractéristiques de séchage en couche mince de certaines plantes aromatiques (*Aloysia citrodora* (Louisa) et *Pituranthos scoparius* (Guezzah)) en utilisant les méthodes de séchage à l'air libre (au soleil), aux séchoirs solaires de type serre et au séchoirs solaires indirect à convection force installés à l'URAER (Ghardaïa).
- ii) ii) modéliser leurs cinétiques de séchage en couches minces en appliquant des modèles empiriques et iii) étudier l'effet des procédés de séchage solaire sur la teneur en huile essentielle.

Les résultats de cette étude pourront servir de référence pour de futurs travaux de recherche sur l'adaptation des séchoirs solaires selon la nature des plantes médicinales et aromatiques. Le chapitre 1 et 2 traitent la revue de la littérature à travers laquelle nous explorerons la littérature scientifique en rapport avec les concepts abordés. Le chapitre 3 traite la démarche méthodologique utilisée dans cette étude et illustre la configuration expérimentale des procédés de séchage solaire et l'évaluation effectuée. Le chapitre 4 discute des résultats de l'expérience.

Chapitre I

Généralité sur les séchoirs solaires

I.1. Méthodes de séchage des herbes :

La méthode de séchage est l'un des principaux facteurs affectant la qualité des herbes séchées. Il existe plusieurs méthodes bien connues de séchage des herbes telles que le séchage au soleil, le séchage à l'ombre, la lyophilisation et le séchage à l'air chaud. Parmi ces méthodes de séchage, le séchage au four à air chaud dans la plage de température de 40 à 60 °C est la méthode de séchage la plus couramment utilisée dans les études de séchage des herbes dans les expériences à l'échelle du laboratoire [3, 4].

En raison des effets indésirables d'une température de séchage élevée sur la qualité des produits séchés, de nombreuses études se sont concentrées sur le développement de méthodes de séchage alternatives, qui pourraient offrir des avantages par rapport aux méthodes conventionnelles. Certaines de ces méthodes, 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 sont déjà utilisés dans l'industrie [5, 6-10]

Dans les sections suivantes, l'effet des méthodes de séchage conventionnelles et nouvellement développées sur la qualité des herbes séchées sera examiné.

I.1.1. Séchage solaire :

Le séchage solaire est la méthode de séchage la plus ancienne qui a été et est encore utilisée pour sécher de nombreux types de produits agricoles, tels que les plantes médicinales et les herbes aromatiques dans la plupart des pays tropicaux ou subtropicaux. Pendant le processus, les herbes fraîches sont placées sur des séchoirs bien ventilés et sont exposées directement à la lumière du soleil [11, 12].

Le séchage au soleil peut ne pas être une méthode de séchage appropriée pour certains types d'herbes en raison de la qualité inférieure du produit. Le séchage au soleil provoque une dégradation substantielle de la couleur et de l'arôme dans les herbes séchées.

Dans le cas de la camomille romaine, la quantité de composants volatils majeurs tels que l'iso-butyrate d'iso-butyle, l'iso-butyrate de 3-méthyle-butyle et le tiglate de propyle de la camomille romaine séchée au soleil était inférieure à celle des échantillons séchés à l'air chaud (séchés à 40 °C) [13].

Dans le cas de la *citronnelle (cymbopogon)*, on a constaté que la citronnelle (*cymbopogon*) séchée au soleil contenait des quantités plus faibles d'huile essentielle totale que la *citronnelle (cymbopogon)* séchée obtenue par séchage à l'air chaud [14].

Chez le *basilic (Ocimum basilicum L)*, le séchage au soleil a entraîné une plus grande réduction de la teneur en huile essentielle par rapport au séchage à l'ombre et au séchage à l'air chaud à 40 °C [15].

Le séchage au soleil a également causé des dommages plus élevés à la surface épidermique, un rétrécissement des trichomes glandulaires et une réduction plus élevée de la teneur en minéraux dans les feuilles de *Vernonia amygdalina* par rapport au séchage à l'ombre [16].

I.1.2. Séchage à l'ombre :

Le séchage à l'ombre est une autre méthode de séchage des herbes qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Le processus est mené presque de la même manière que le séchage au soleil, sauf que les herbes sont placées à l'ombre dans une pièce avec une bonne ventilation, une faible humidité (par exemple 22-27% pour *Lippia citriodora* et sans exposition directe au soleil [17].

Pendant le processus de séchage à l'ombre, l'air ventilé est chauffé à l'aide de l'énergie solaire avant de passer à travers les herbes. Cette méthode de séchage pourrait offrir des avantages par rapport au séchage au soleil en raison de sa capacité à préserver les substances sensibles à la lumière et à minimiser les réactions chimiques induites par la lumière telles que l'oxydation. Cependant, le temps de séchage de l'ombre est plus long que le séchage au soleil, qui est déjà considéré comme un processus excessivement long [18, 19].

Des études utilisant cette méthode de séchage ont montré que le séchage à l'ombre est une meilleure méthode de séchage en termes de préservation de la teneur en huile essentielle et de la couleur des produits séchés par rapport à d'autres méthodes de séchage 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, à savoir le romarin (par rapport au séchage au four à 45 °C et au séchage au soleil), *Tanacetum parthenium* (comparé au séchage au four à 40 °C et au séchage au soleil), thym (par rapport à la lyophilisation), basilic (comparé au séchage au four à 40 et 60 °C et séchage au soleil), menthe (par rapport au séchage par convection à 40 °C), mélisse (par rapport au séchage par convection à 40 °C), et la sauge (par rapport au séchage par convection à 40 °C) [20, 21, 22-24].

En outre, le séchage à l'ombre est un meilleur processus de séchage des herbes en termes de préservation de l'intégrité des trichomes. Il a été constaté que le séchage à l'ombre causait moins de dommages aux trichomes sur les feuilles séchées de *Lippia Citriodora* par rapport au séchage au four à 60 °C et au séchage sous vide à 40 °C [17].

En termes de teneur en composés bioactifs, le séchage à l'ombre a également montré une bonne rétention des composés bioactifs dans les herbes séchées telles que le *misai kucing* (*Orthosiphon aristatus*) [25].

Lorsque le séchage à l'ombre, le séchage au soleil et le séchage à l'air du *misai kucing* (40 °C) ont été comparés, 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 qui pouvait maintenir la teneur en acide rosmarinique proche des herbes fraîches. Cependant, le séchage à l'ombre a causé 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* a diminué de manière significative après le séchage à l'ombre (avec une température de séchage de 25 à 32 °C pendant 10 jours) et la perte d'acide ascorbique et de caroténoïdes dans les échantillons séchés a été observée [26].

De plus, des teneurs plus faibles en composés aromatiques de certaines herbes séchées à l'ombre ont été signalées par rapport à d'autres méthodes de séchage. Dans le cas du *thym*, le *thym* séché à l'ombre présentait une teneur en huile essentielle plus faible dans le produit séché par rapport au séchage à l'air chaud à 50 et 70 °C, au séchage au soleil et à la lyophilisation. Néanmoins, comme le séchage au soleil, le séchage à l'ombre est toujours populaire dans les zones rurales ou dans les petites entreprises en raison de son faible coût d'investissement et de la qualité des produits séchés [12, 27].

I.1.3. Séchage solaire assisté :

Le séchage solaire assisté est un développement d'une méthode de séchage bien connue, le séchage au soleil. L'énergie solaire étant gratuite, le développement de nouvelles techniques de séchage assisté par l'énergie solaire a retenu l'attention des chercheurs. Ce développement vise à augmenter l'efficacité énergétique du processus de séchage et à surmonter les problèmes majeurs du séchage au soleil traditionnel.

Le séchage solaire peut être classé en trois groupes principaux :

- ✓ Le séchage solaire direct (qui est le même que le séchage solaire dans cette revue).
- ✓ Le séchage solaire indirect ou le séchage solaire convectif.
- ✓ Le séchage solaire mixte ou hybride. [28].

Plusieurs études sur le développement des séchoirs solaires d'herbes ont été menées ces dernières années, à savoir les séchoirs solaires tunnel à convection forcée, les séchoirs solaires à convection forcée à effet de serre, les séchoirs solaires à convection forcée. Des séchoirs à lit fluidisé assisté et des séchoirs à capteurs solaires [5, 28-30].

De nombreux types d'herbes séchées à l'aide de séchoirs solaires ont été étudiés, par exemple le *thym* et la *menthe* (séchoir solaire à convection forcée en mode indirect), la *menthe poivrée* (séchoir solaire à serre tunnel), *java tea* (*L'Orthosiphon*) (séchoir solaire à effet de serre avec pompe à chaleur intégrée), *persil* (séchoir solaire à pompe à chaleur), *romarin* (capteur solaire avec chauffage d'appoint, à 50 –80 °C), *safran* (séchoir solaire hybride

photovoltaïque-thermique assisté par pompe à chaleur) et *misai kucing* (séchoir à pompe à chaleur assistée par énergie solaire). Le séchoir solaire à serre tunnel pour les feuilles de *menthe poivrée* a montré une réduction du temps de séchage de 23 à 25 % par rapport à un séchoir à serre ordinaire. Plusieurs études sur le développement des séchoirs solaires d'herbes ont été menées ces dernières années, à savoir les séchoirs solaires tunnel à convection forcée, les séchoirs solaires à convection forcée à effet de serre, les séchoirs solaires à convection forcée. Des séchoirs à lit fluidisé assisté et des séchoirs à capteurs solaires. De nombreux types d'herbes séchées à l'aide de séchoirs solaires ont été étudiés, par exemple le *thym* et la *menthe* (séchoir solaire à convection forcée en mode indirect), la *menthe poivrée* (séchoir solaire à serre tunnel), *thé de java* (*L'Orthosiphon*) (séchoir solaire à effet de serre avec pompe à chaleur intégrée), *persil* (séchoir solaire à pompe à chaleur), *romarin* (capteur solaire avec chauffage d'appoint, à 50 –80 °C), *safran* (séchoir solaire hybride photovoltaïque-thermique assisté par pompe à chaleur) et *misai kucing* (séchoir à pompe à chaleur assistée par énergie solaire) [5, 28, 29, 31-36].

Le séchoir solaire à serre tunnel pour les feuilles de *menthe poivrée* a montré une réduction du temps de séchage de 23 à 25 % par rapport à un séchoir à serre ordinaire [29].

Le séchoir solaire utilisant la combinaison du capteur solaire et du système de pompe à chaleur, qui peut être utilisé pour créer un séchoir solaire fonctionnant en continu, a été utilisé pour obtenir des feuilles de *menthe* séchées de bonne qualité (compte tenu des dommages thermiques, du rétrécissement et du goût), semblable aux produits ordinaires séchés au soleil [36].

Avec la combinaison d'un capteur solaire, d'un échangeur de chaleur, d'un réflecteur, de chambres de séchage principales et secondaires et d'un chauffe-eau supplémentaire, le séchoir solaire pour le séchage de la camomille a montré un temps de séchage réduit de 50 % par rapport au séchage direct au soleil. De plus, le produit avait une teneur en huile volatile plus élevée [37].

Le séchoir solaire de type bac intégré à un capteur solaire a produit des fleurs de *rosella* et de la *citronnelle* (*cymbopogon*) séchées de meilleure qualité par rapport à un séchoir solaire ordinaire [12].

L'intégration d'un séchoir solaire et d'un système de déshumidification a permis d'obtenir une meilleure couleur des feuilles de pégaga séchées en raison de la température de séchage et de l'humidité relative plus basses du système de séchage par déshumidification solaire par rapport à un séchoir solaire ordinaire. Beaucoup de ces nouveaux développements dans le séchage solaire ont montré une amélioration considérable par rapport au séchage solaire traditionnel, en particulier en ce qui concerne l'efficacité énergétique du processus et la qualité des produits séchés. Cependant, les études sur l'effet de ces processus sur l'arôme et la couleur des herbes culinaires séchées font encore défaut [38].

I.1.4. Séchage à l'air chaud :

Comme mentionné ci-dessus, les méthodes de séchage à énergie solaire présentent l'inconvénient majeur de temps de séchage trop longs. Dans l'industrie, la méthode de séchage des herbes la plus courante et la plus populaire est le séchage au four (également appelé "séchage par convection" ou "séchage à air chaud"), en particulier dans les pays non tropicaux où la lumière du soleil n'est pas suffisante pour le séchage au soleil et à l'ombre [11].

Le principal avantage du séchage à air chaud est la contrôlabilité du processus, dans laquelle les producteurs alimentaires ont un contrôle total sur les paramètres du processus tels que la température de séchage, le temps de séchage et la vitesse de l'air. Ces paramètres peuvent être ajustés pour obtenir les propriétés souhaitées du produit [11].

Les paramètres de traitement de nombreux types d'herbes ont été étudiés et optimisés pour une meilleure qualité des produits séchés. Cependant, après séchage à l'air chaud, une faible teneur en composés volatils totaux est obtenue [11, 39].

Le séchage à l'air chaud pourrait entraîner une dégradation majeure de l'arôme des herbes et une température de séchage élevée pourrait entraîner la dégradation des pigments. Par conséquent, des températures de séchage basses (35–50 °C) ont été suggérées pour la conservation des composés thermosensibles dans les produits séchés. Pendant le processus de séchage, le flux d'air chaud à travers les matériaux favorise l'évaporation de l'humidité et des composés volatils et crée un environnement propice aux réactions d'oxydation [11, 40-42].

Les autres inconvénients majeurs du séchage à air chaud sont le retrait élevé des produits et la consommation d'énergie élevée. De plus, le séchage à l'air chaud étant l'une des méthodes de transformation des aliments les plus énergivores, les efforts se sont concentrés sur la réduction de la consommation d'énergie, l'augmentation de l'efficacité du processus et la réduction du temps de séchage [11, 43].

Dans la section ci-dessous, les effets des paramètres de séchage à l'air chaud sur la dégradation de la qualité des herbes séchées seront passés en revue.

I.1.4.1. Effet de la température et de l'humidité de l'air sur la qualité des herbes séchées :

Il est recommandé de sécher les herbes par séchage à l'air chaud à 40–60 °C. Cependant, ces températures de séchage entraînent des modifications indésirables de l'arôme des herbes culinaires séchées [4, 42].

Des résultats similaires ont été observés dans de nombreux types d'herbes, telles que la *menthe poivrée* (augmentant les températures de séchage 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) [44-47].

Des températures de séchage supérieures à 60 °C entraînent la perte de la plupart des composés volatils 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.) [48].

De plus, l'augmentation de la température de séchage à l'air chaud induit de nombreux autres changements indésirables dans les produits séchés, tels que l'effondrement des tissus, la perte de composés bioactifs et une altération accrue de la couleur. Dans le cas de *Moringa Oleifera*, la couleur des feuilles séchées à 40 °C était mieux conservée par rapport à celle des feuilles séchées à 50 et 60 °C [49-52].

Structurellement, dans le cas de *Vernonia amygdalina*, le séchage des feuilles à 60°C a causé des dommages significativement plus importants aux surfaces épidermiques des feuilles, un rétrécissement des trichomes et un degré plus élevé de déformation de la paroi cellulaire que le séchage à 40 et 50 °C [53].

L'augmentation de la température de séchage a également réduit la capacité antioxydant de nombreux types d'herbes, à savoir le *romarin* (*Rosmarinus officinalis*), *l'agripaume* (*Leonuruscardia*) et la *menthe poivrée* (*Mentha piperita*) (des températures de séchage de 40 et 70 °C ont été comparées), la *reine des prés* (*Filipendula ulmaria*) et le *saule* (*Salix alba*) (les teneurs totales en phénols, salicylates et quercétine ont été comparées aux températures de séchage de 30 et 70 °C) [54, 55].

En revanche, certaines études rapportent que l'augmentation de la température de séchage a entraîné des quantités plus élevées de certains composés aromatiques. Ce fut le cas pour la *verveine citronnée* (*Aloysia citrodora*), dans laquelle une concentration plus élevée des composés volatils a été obtenue à la température de séchage de 50 °C par rapport au séchage à 30 et 40 °C [56].

Un résultat similaire a été observé dans 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 observé pour la teneur phytochimique dans le séchage de la tisane (contenant plusieurs types d'herbes dont *Centella asiatica*, *Mentha arvensis* et *Polygonum moins*), montrant que la

teneur phytochimique (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 [57, 58].

I.1.5. Lyophilisation (séchage à froid) :

La lyophilisation a été suggérée par plusieurs études comme une méthode de séchage appropriée pour préserver l'arôme frais des herbes en raison de sa faible température de fonctionnement [42].

Il a été largement rapporté que ce processus de séchage produisait des herbes séchées avec un meilleur arôme par rapport à d'autres méthodes de séchage dans de nombreux types d'herbes telles que la *menthe verte*, qui présentait moins de réduction des composés aromatiques par rapport aux feuilles séchées à l'air chaud. Des résultats similaires ont été rapportés dans les feuilles de *basilic* lorsque la lyophilisation a été comparée au séchage à l'air à 50 °C [59, 60].

La lyophilisation a montré une meilleure préservation du rendement et de la composition chimique de l'huile essentielle de 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 et au séchage aux micro-ondes à 500 et 700 W. La lyophilisation pourrait entraîner une perte majeure des composés aromatiques des herbes séchées [18, 51].

Il a été rapporté que la lyophilisation du persil a causé la perte de composants volatils majeurs tels que le p-mentha-1,3,8-triène et l'apiole [61].

Une perte d'arôme a également été observée dans le *basilic doux* lyophilisé (*Ocimum basilicum L.*) à l'aide d'un panneau sensoriel et, compte tenu du coût d'investissement élevé du processus de lyophilisation, le séchage à l'air chaud a été suggéré comme la meilleure méthode de séchage pour le séchage du *basilic doux*. Des résultats similaires ont été observés chez les feuilles de *laurier* (*Laurus nobilis*) [3, 62].

I.1.6. Séchage par micro-ondes :

Le séchage par micro-ondes est une technique de séchage qui est actuellement disponible dans l'industrie de la transformation des herbes.

Il permet une évaporation rapide de l'eau des aliments, offrant des temps de séchage relativement plus courts par rapport à de nombreuses méthodes de séchage (séchage par convection, séchage à l'ombre et au soleil, lyophilisation) et une consommation d'énergie réduite dans le processus de séchage [60, 63-65].

Les produits séchés aux micro-ondes ont montré moins de retrait, une meilleure couleur et une meilleure capacité de réhydratation par rapport au séchage à l'air chaud [66].

La qualité des produits séchés par micro-ondes est influencée par des paramètres de séchage tels que la puissance micro-ondes (W), le temps de séchage, la teneur en humidité initiale du produit et les propriétés diélectriques des matériaux [63].

L'augmentation de la puissance des micro-ondes de 360 à 900 W a réduit le temps de séchage du persil de 64% et le persil séché aux micro-ondes a montré une bonne rétention de couleur avec une couleur légèrement plus foncée que le persil frais [67].

I.1.7. Séchage sous vide par micro-ondes :

La combinaison du séchage par micro-ondes et sous vide a récemment attiré l'attention. Le processus est mené en utilisant l'irradiation par micro-ondes comme source de chauffage pour augmenter la température des matériaux alimentaires dans la chambre de séchage sous pression sous-atmosphérique. Le vide crée la force motrice de l'évaporation de l'eau, ce qui se traduit par des taux de séchage plus rapides par rapport au séchage par convection et au séchage par micro-ondes [11, 67].

Par rapport au séchage à l'air chaud, le séchage par micro-ondes et sous vide pourrait réduire le temps de séchage de 70 à 90 % et produire des produits de meilleure qualité. Le niveau de thymol dans *L. berlandieri* séché sous vide par micro-ondes était 1,3 fois plus élevé que ceux séchés par séchage à l'air [7, 68].

I.1.8. Séchage assisté par pompe à chaleur :

Le séchage par pompe à chaleur est un autre développement de la technique de séchage visant à augmenter l'efficacité du séchage par convection traditionnel. Une pompe à chaleur est généralement couplée à une autre unité de séchage de l'air pour augmenter la température initiale de l'air d'entrée. Le système pourrait être appelé « séchoir par pompe à chaleur ou séchoir assisté par pompe à chaleur ». Le séchoir par pompe à chaleur convient au séchage industriel des herbes car il peut fonctionner dans de larges plages de vitesse de l'air et de températures de séchage [9].

Un autre avantage majeur des sécheurs par pompe à chaleur est leur capacité à déshumidifier l'air de sortie de l'unité de séchage. L'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 [9].

Le séchage par pompe à chaleur pourrait fournir des produits séchés de meilleure qualité en raison de sa capacité à contrôler les propriétés de l'air pendant le processus. Le séchage solaire du *thé java* par pompe à chaleur (*Orthosiphon aristatus*) a montré une meilleure contrôlabilité de l'humidité relative de la salle de séchage par rapport aux séchoirs solaires ordinaires, en particulier pendant la nuit. Le système de déshumidification a réduit l'humidité relative de la salle de séchage de 10 à 15 % et a permis de maintenir l'humidité relative maximale de 65 %. De plus, le taux de séchage de la serre solaire intégrée à la pompe à chaleur était 3 à 4 fois meilleur que celui d'un séchoir à serre ordinaire [31].

Lorsque l'effet du séchage par pompe à chaleur sur la qualité d'*Andrographis paniculata* a été étudié, il a été constaté que le séchage par pompe à chaleur (avec fonction déshumidificateur, appelé séchoir déshumidificateur par pompe à chaleur) à 40, 50 et 60 °C entraînait des quantités plus élevées de composés bioactifs, y compris l'andrographolide,

le néo-andrographolide et les phénols totaux, par rapport aux échantillons séchés à l'air chaud aux mêmes températures de séchage.

Dans la même étude, il a été démontré que le séchage par pompe à chaleur était meilleur pour maintenir la forme originale des structures cellulaires du parenchyme des produits séchés que le séchage à l'air.

Une étude comparative sur l'effet du séchage par pompe à chaleur (à l'aide d'un sécheur de déshumidification par pompe à chaleur), le séchage par convection et la lyophilisation sur la qualité du *thé de java*, ont révélé que le *thé de java* séché par pompe à chaleur à la température de séchage de 60°C présentait une bonne rétention de la teneur totale en phénol et de l'activité antioxydant des produits séchés similaires aux produits lyophilisés [69].

De plus, le système séchoir déshumidificateur par pompe à chaleur a réduit le temps de séchage de 44,8 % par rapport au séchage par convection à la même température de séchage. De plus, la microstructure des produits séchés à l'aide de séchoir déshumidificateur par pompe à chaleur, a montré une structure cellulaire plus complète et plus régulière que le produit séché par convection.

Dans l'ensemble, le séchage par pompe à chaleur a donné des résultats prometteurs pour améliorer la teneur en composés bioactifs et les propriétés structurelles des produits séchés.

I.1.9. Méthodes de séchage hybrides :

Les méthodes de séchage hybrides sont la combinaison de deux ou plusieurs techniques de séchage pour sur monter le problème du séchage en une seule étape. Dans cet article, nous avons passé en revue le séchage par pompe à chaleur, le séchage assisté par l'énergie solaire, le séchage par micro-ondes et sous vide et le séchage par radiofréquence.

Ces techniques de séchage ont récemment attiré l'attention des chercheurs en raison de leur capacité à raccourcir le temps de traitement, à minimiser la dégradation de la qualité et à maintenir l'efficacité du processus [69].

À l'heure actuelle, les trois méthodes qui ont reçu le plus d'attention sont probablement le séchage assisté par l'énergie solaire, le séchage assisté par micro-ondes et le séchage assisté par pompe à chaleur. Cependant, les informations sur les effets de ces technologies hybrides sur la qualité des herbes séchées sont limitées [69,70].

I.2. Caractéristiques de qualité des herbes séchées :

Les herbes culinaires séchées ont généralement une valeur élevée, par conséquent, les attentes des consommateurs concernant la qualité du produit sont généralement élevées. Les spécifications de qualité des herbes séchées ont été répertoriées principalement pour assurer la sécurité chimique et microbiologique des produits, telles que la teneur en humidité, la densité apparente, les matières étrangères, la teneur en excréments, les aflatoxines et les métaux lourds. Parmi ces propriétés de qualité, la couleur et l'arôme sont probablement les caractéristiques de qualité les plus importantes affectant l'acceptation par les consommateurs [71].

I.2.1. Composés aromatiques :

L'huile essentielle est la principale contribution de l'arôme de l'herbe bien qu'elle soit présente en petites quantités. L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a défini le sens du terme "huile essentielle" comme un "produit obtenu à partir d'une matière première naturelle d'origine végétale, par distillation à la vapeur, par des procédés mécaniques à partir de l'épicarpe des agrumes, ou par voie sèche". Les huiles essentielles peuvent être utilisées dans de nombreux types d'applications, telles que la pharmacie, la cosmétique et les industries médicales et alimentaires [11, 72].

Dans les herbes fraîches, les huiles essentielles sont stockées à la surface des feuilles dans des structures spécialisées appelées trichomes, qui sont des appendices uni- ou multicellulaires dans les cellules épidermiques qui se développent vers l'extérieur à partir de la surface des organes végétaux tels que les feuilles, les racines ou les écorces [73].

Lors du séchage, la rétention des huiles essentielles dans les feuilles séchées dépend de l'intégrité des glandes sébacées dans le produit séché. Par conséquent, préserver l'intégrité des trichomes ou minimiser les dommages aux trichomes pendant le séchage pourrait améliorer le rendement en huiles essentielles et la qualité aromatique des herbes séchées. Les composés volatils dans les herbes peuvent également être trouvés sous des formes liées de manière glycosidique car ils sont solubles dans l'eau et peuvent s'accumuler dans les tissus végétaux [17, 74].

II.2.2. Couleur des herbes séchées

L'objectif principal de nombreuses études sur le séchage des herbes a été d'améliorer la couleur des produits séchés ou de réduire les changements de couleur pendant le séchage et pendant le stockage [75].

La dégradation de la couleur des herbes séchées est provoquée par la dégradation de pigments tels que la chlorophylle et l'anthocyanine. Pour les herbes vertes, la dégradation des chlorophylles est le changement le plus courant qui peut se produire pendant le processus de séchage [76].

I.3. Séchage solaire :

I.3.1. Séchoir naturel :

En raison de l'intense ensoleillement disponible dans les pays tropicaux, les différents produits sont séchés à l'air libre. (La figure I.1) illustre le principe du séchage au soleil ouvert.

Dans le séchage au soleil en plein air, la surface d'un produit (il peut s'agir de feuilles, d'herbes ou de plantes) est chauffée par deux sources :

- 1- Rayons solaires tombant directement sur la surface.
- 2- Chaleur disponible dans l'air ambiant. L'humidité est éliminée de la surface du produit par évaporation en utilisant la chaleur de ces deux sources de chaleur différentes. Une partie de la chaleur est perdue dans l'environnement par ces sources de chaleur par rayonnement, tandis qu'une partie de la chaleur est perdue à la surface du sol par conduction.

Les paramètres qui affectent le taux d'évaporation de l'humidité tels que (i) le rayonnement solaire (ii) la température ambiante (iii) la vitesse du vent et (iv) l'humidité relative de l'air.

Les facteurs suivants sont les facteurs importants qui affectent la qualité du matériau à sécher en utilisant le séchage au soleil ouvert:

- (a) Nature du transfert de chaleur
- (b) Taux de séchage

Quelques limitations du séchage au soleil à l'air libre sont données ci-dessous :

- (a) Il s'agit d'un processus à forte intensité de main-d'œuvre.
- (b) Le séchage n'est pas possible pendant la nuit et la saison des pluies.
- (c) La température requise pour le séchage n'est pas admissible à tout moment.

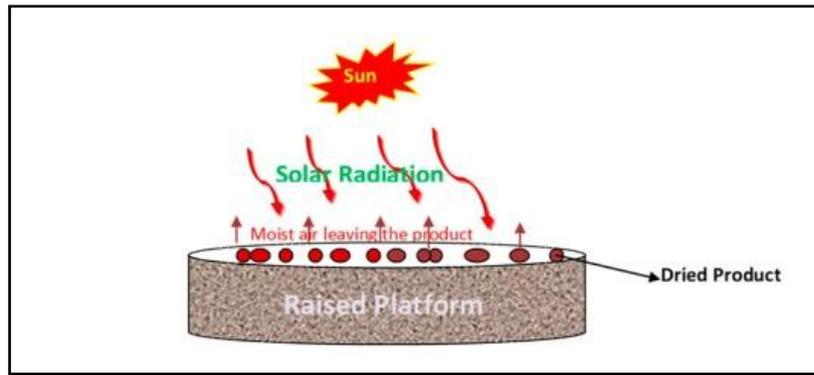


Figure I.1. Séchoir naturel [152]

I.3.2. Classement séchage solaire :

Les séchoirs solaires peuvent être classés en fonction de quelques critères. Bennamou a déclaré que le séchoir solaire est classé en mode actif et passif, et chaque catégorie est divisée en types de mode direct, indirect et mixte. Le séchage solaire peut également être classé en fonction du mode de chauffage, direct ou indirect, et de la manière dont l'énergie solaire est utilisée [77, 78].

Dans cette littérature, le séchoir solaire est classé en fonction de la méthode de flux d'air : mode passif ou actif, ainsi que de la méthode de transfert de chaleur du soleil au produit, qui sont : direct, indirect, hybride ou mixte. (La **figure I.2**) montre la classification des séchoirs solaires basée sur les deux critères.

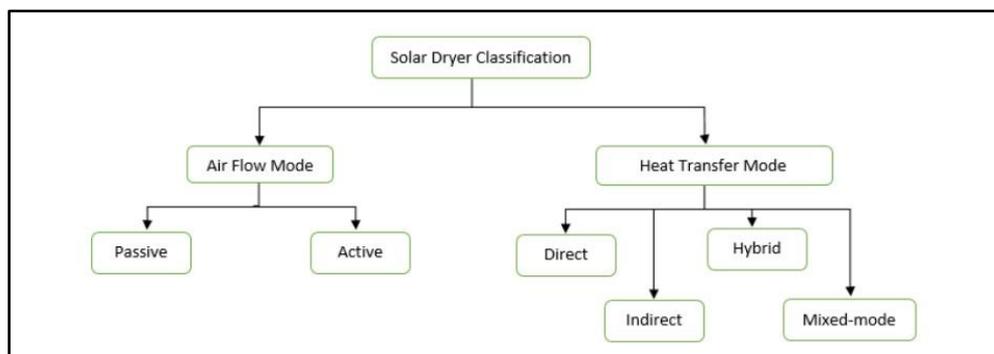


Figure I.2. Classement séchage solaire [152]

Ont présenté différents types de systèmes de séchoir solaire disponibles. L'article passe en revue les principes opérationnels et les conceptions depuis les premiers séchoirs solaires à convection naturelle jusqu'aux séchoirs solaires mis à jour en 2008. Deux principaux groupes de séchoirs solaires ont été identifiés : les séchoirs solaires passifs ou à convection naturelle et les séchoirs solaires à convection active ou forcée [79].

I.3.3. Mode flux d'air ;

Les séchoirs solaires peuvent être classés en deux groupes : passifs et actifs. L'énergie thermique sera transférée à la chambre de séchage par convection naturelle pour le séchoir solaire passif. En revanche, dans un séchoir solaire de type actif, les ventilateurs transfèrent la chaleur de la zone de captage solaire vers la chambre de séchage [78].

I.3.3.1 Séchoir solaire passif :

Le séchoir solaire en mode passif est également connu sous le nom de séchoir solaire à convection naturelle. L'efficacité de ce séchoir solaire dépend du mouvement naturel de l'air dû à la force de flottabilité, à la différence de pression du vent ou à une combinaison de ceux-ci. La technique est largement utilisée, en particulier dans les pays en développement, en raison de son faible coût initial et de sa maintenance. Il peut en outre être classé en méthode de séchage au soleil ouvert et en méthode de séchage des cultures à énergie solaire à circulation naturelle [80, 81].

Les cultures seront étalées sur le sol ou sur plaque afin qu'elles soient exposées au rayonnement solaire. Cependant, il présente de nombreux inconvénients, tels que les déchets produits et les pertes de récoltes dues aux conditions météorologiques et aux attaques d'insectes et de rongeurs [82].

Outre le séchage solaire ouvert, les séchoirs à circulation naturelle utilisent également le mode de mouvement d'air passif. L'air chauffé s'écoulera vers les cultures en cours de séchage en raison de la force de flottabilité ou de la pression du vent, ou même d'une combinaison des deux. (**La figure I.3**) montre le schéma d'un séchoir solaire à convection naturelle. Cependant, un séchoir solaire en mode passif a un faible taux de séchage en raison d'un mouvement d'air lent [83].

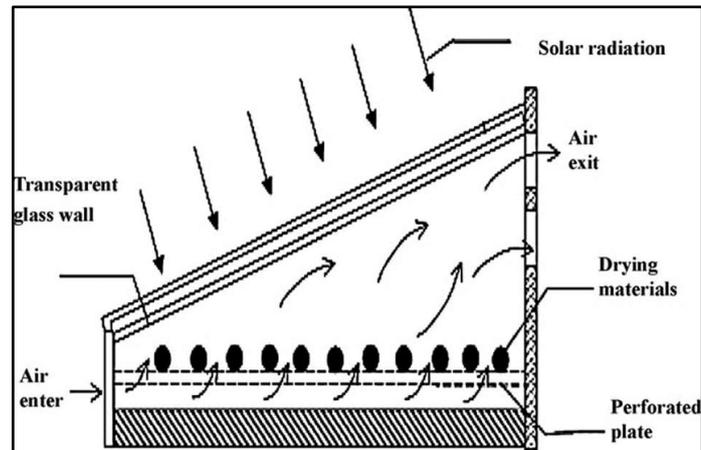


Figure I.3. Schéma séchoir solaire passif [153]

Un séchoir armoire est un exemple de séchoir solaire qui utilise la circulation d'air passive. Des trous sont pratiqués à la base et dans les parties supérieures des côtés pour permettre l'élimination de l'humidité due à la flottabilité. Une cheminée est ajoutée pour améliorer l'effet de flottabilité de l'humidité dans le séchoir. L'élimination de l'humidité à l'intérieur du système est essentielle pour empêcher l'humidité de se condenser à l'intérieur du couvercle en verre car cela peut endommager le produit séché. Cependant, un sèche-armoire convient au séchage de cultures en petits lots, par exemple la banane, l'ananas, la mangue, la pomme de terre, les carottes et les haricots verts. Une décoloration peut se produire dans la sècheuse car le produit est directement exposé au rayonnement solaire [84].

I.3.3.2. Séchoir solaire actif :

Le séchoir solaire à mode actif est également connu sous le nom de séchoir solaire à convection forcée. Le système de séchage utilise l'énergie solaire comme source de chaleur, et il est aidé par des combustibles électriques ou fossiles pour entraîner des moteurs ou des pompes pour assurer la circulation de l'air [81].

Les moyens externes (moteurs ou pompes) sont utilisés pour déplacer l'énergie solaire sous forme d'air chauffé du capteur solaire vers la zone de séchage. Ce mode convient aux activités de séchage à grande échelle car il peut fournir une température d'air plus élevée et un flux d'air continu. Les séchoirs solaires actifs sont idéaux pour sécher les cultures à forte teneur en humidité comme la papaye, les kiwis, le brinjal, le chou et les tranches de

chou-fleur [84]. (La figure I.4) ci-dessous montre le schéma d'un séchoir solaire à convection forcée.

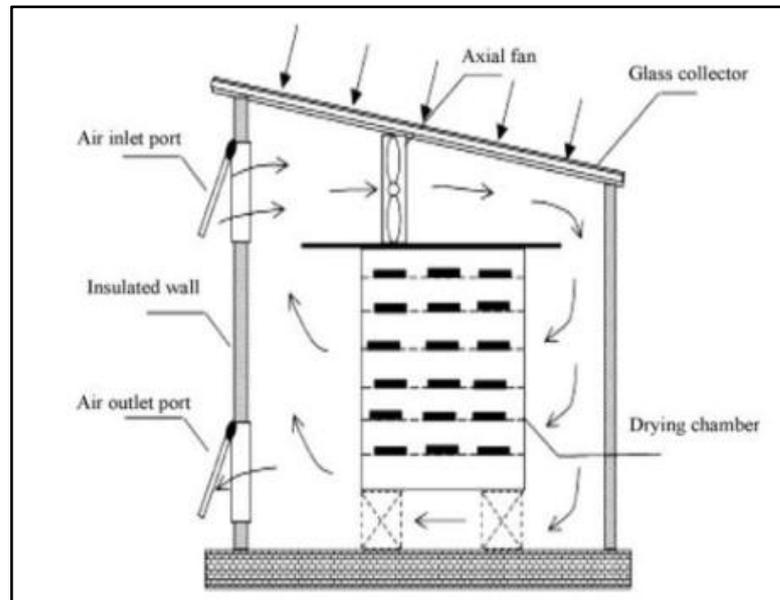


Figure I.4. Schéma séchoir solaire actif [153]

I.3.4. Mode de transfert de chaleur :

Les séchoirs solaires peuvent également être classés en fonction de leur méthode de transfert de chaleur. Ce sont des séchoirs solaires directs, indirects, mixtes et hybrides, et tous peuvent être en mode passif ou actif.

I.3.4.1. Séchoir solaire direct :

Dans le séchoir solaire direct, les produits qui seront séchés seront conservés dans une chambre de séchage fermée par un vitrage transparent en plastique ou en verre. Le rayonnement solaire pénètre dans le couvercle transparent et de la chaleur sera générée à l'intérieur de la chambre de séchage. La chaleur fera augmenter la température à l'intérieur de la chambre de séchage et l'humidité du produit s'évapore de sa surface jusqu'à ce qu'il soit séché. Un séchoir direct est très abordable et nécessite un petit budget pour la construction et l'entretien [85].

Cependant, par rapport au séchoir solaire hybride, un séchoir solaire direct présente un inconvénient en temps de fonctionnement. Les conditions météorologiques sont le principal facteur qui affecte les performances du sécheur direct. Les jours venteux et pluvieux allongent le temps de séchage du produit. En outre, un espace plus grand pour étaler le produit est nécessaire et une exposition directe au soleil peut également entraîner une détérioration du produit [86]. (La figure I.5) montre un séchoir solaire en armoire qui utilise le mode direct comme méthode de transfert de chaleur.

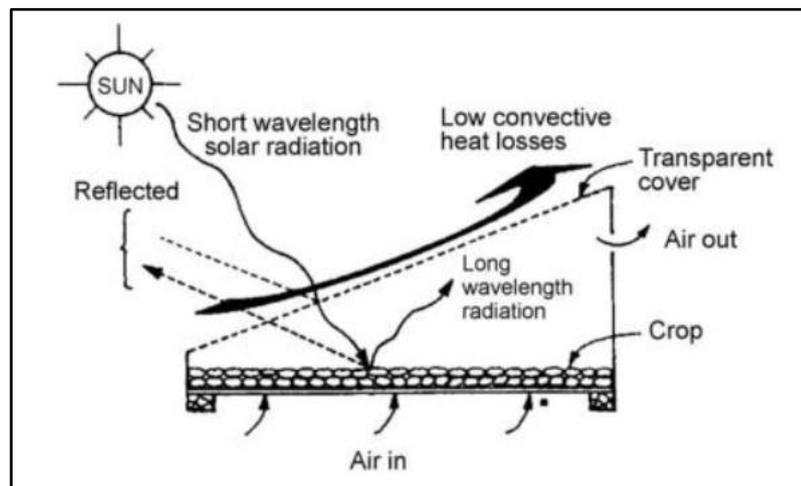


Figure I.5. Schéma séchoir solaire direct [153]

I.3.4.2. Séchoir solaire indirect :

Le séchoir solaire indirect se compose d'une chambre de séchage, d'un capteur solaire avec le ventilateur. Le capteur solaire et la chambre de séchage sont séparés, reliés par une conduite souple isolée [82, 87].

Il est préférable d'incliner le capteur solaire plutôt que de le placer horizontalement pour recevoir un maximum de rayonnement solaire. Ensuite, l'air du ventilateur transfère la chaleur via des conduits vers une chambre de séchage. En conséquence, les produits ne sont pas directement exposés au soleil, ce qui évite les dommages au produit, tels que la décoloration et la fissuration en surface, tout en conservant les vitamines des fruits en conserve [79, 82].

Comparé au séchoir solaire direct, le séchoir solaire indirect est plus efficace car il a un taux de séchage plus élevé. De plus, la vitesse de l'air, la température à l'intérieur de la chambre de séchage et la charge solide peuvent être contrôlée facilement, ce qui aidera à produire une meilleure qualité de produit. Cependant, un investissement initial plus élevé est nécessaire pour construire ce séchoir, et sa maintenance est plus élevée que le séchoir solaire direct [88, 89]. (La **figure I.6**) illustre le principe d'un séchoir solaire indirect.

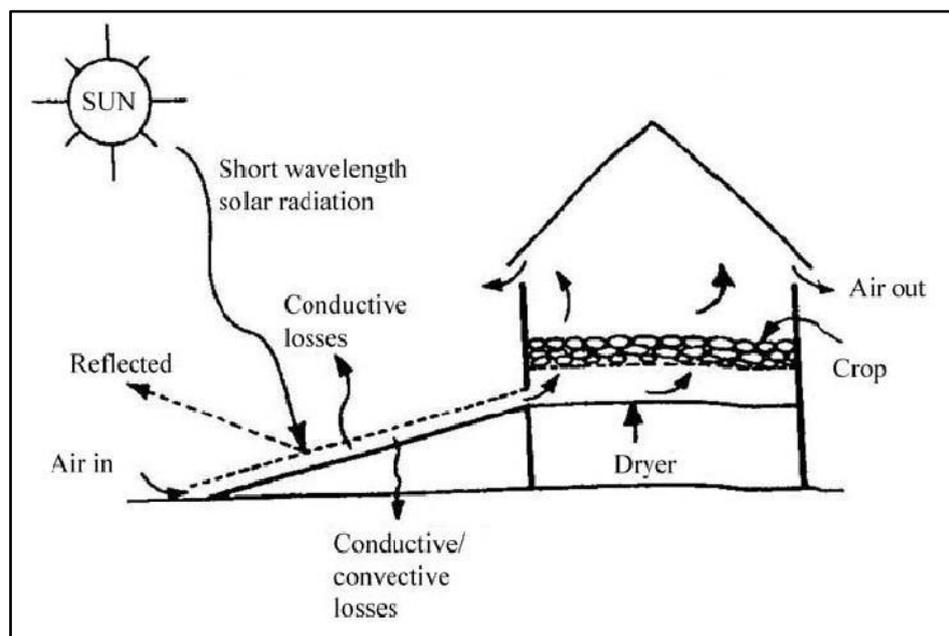


Figure I.6. Schéma Séchoir solaire indirect [153]

I.3.4.3. Séchoir solaire mixte :

Les caractéristiques des séchoirs solaires directs et indirects sont combinées dans les séchoirs solaires à mode mixte comme illustré à (**la figure I.7**). Un collecteur séparé préchauffera l'air pour ce type de séchoir solaire avant qu'il ne soit acheminé dans la chambre de séchage. Le rayonnement solaire pénétrera dans la chambre de séchage à travers un couvercle transparent pour fournir de la chaleur au produit qui sera séché [80, 87, 90].

Les séchoirs solaires à mode mixte ont le taux de séchage le plus élevé que les séchoirs solaires directs et indirects puisque les capteurs solaires et le rayonnement solaire direct sont utilisés simultanément comme source de chaleur. En utilisant un séchoir solaire à mode mixte, la température dépassera la température ambiante dans une période plus courte,

ce qui peut aider à atteindre un niveau d'humidité approprié dans le produit séché. Cependant, un tel séchoir solaire a une conception complexe et un coût initial plus élevé est nécessaire [88, 89].

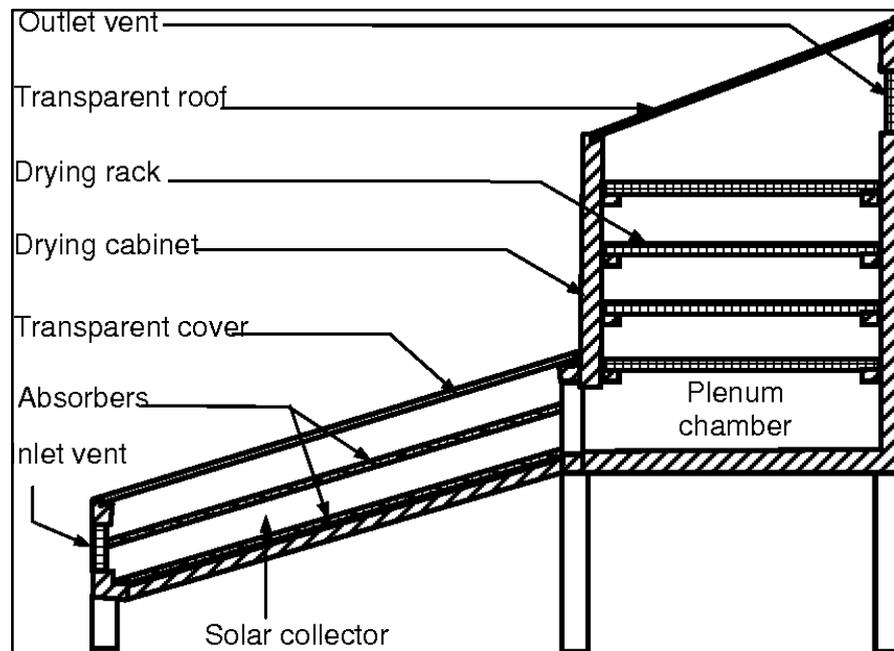


Figure I.7. Schéma séchoir solaire mixte [153]

I.3.4.4. Séchoir solaire hybride :

Les séchoirs solaires hybrides sont uniques car ils obtiennent de la chaleur à partir de plusieurs sources qui proviennent de l'énergie solaire par le soleil et d'une autre source telle que la biomasse et les combustibles fossiles [77, 91, 92].

La différence entre les séchoirs solaires hybrides et les séchoirs solaires mixtes est que le séchoir solaire mixte ne dépend que de l'énergie solaire. En revanche, le séchoir solaire hybride dépend de plusieurs sources d'énergie : l'énergie solaire et d'autres sources d'énergie alternatives, par exemple la biomasse. Le séchoir solaire hybride est capable de fonctionner en l'absence d'énergie solaire [80].

I.4. Séchage solaire des herbes médicinales :

Au cours des trois dernières décennies, des progrès significatifs ont été observés avec l'utilisation de séchoirs solaires à la place des séchoirs conventionnels pour le séchage des herbes médicinales. Pourtant, il reste encore beaucoup à faire pour améliorer la conception et les méthodes des différents séchoirs solaires pour le séchage des herbes médicinales. Le (tableau I.1) présente le résumé de l'examen des travaux de recherche récents qui ont été effectués sur le séchage solaire des herbes médicinales [93].

Tableau I.1. Résumé des recherches récentes sur le séchage solaire des herbes médicinales [93].

Auteurs	Feuilles d'herbes examinées	Quantité de feuilles en (kg)	Pays	Rayonnement solaire (w/m^2)	Nature du séchoir	Résultats	Remarques/Recommandations
Singh et al. (2021)	Feuilles de fenugrec	6.4	Inde	800-900	Convection forcée en mode indirect.	<ul style="list-style-type: none"> - L'efficacité thermique du séchoir solaire était de 34,1 % et de 5,7 % pour l'OSD. - L'acide ascorbique, la teneur totale en chlorophylle et la couleur étaient meilleurs dans le séchoir solaire. - La période de récupération était de 604 jours de séchage. 	- 14 séchoirs ont été vendus à des petits entrepreneurs pour le compte de la commercialisation.
Bahammou et al. (2020)	Rupturewort	-	Maroc	≈850	Séchoir solaire à convection naturelle et forcée.	<ul style="list-style-type: none"> - La diffusivité effective de l'humidité est passée de $2,5312 \times 10^{-9}$ à $18,0511 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$. - Les échantillons séchés ont montré la plus grande quantité d'antioxydants. - Énergie d'activation rapportée à 2938,46 kJ/kg. - Les teneurs en flavonoïdes totaux et phénoliques ont diminué d'environ 46 et 10 % respectivement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle LESPAM jugé le meilleur pour les courbes de sorption. - Les modèles Midilli et Kucuk sont mieux adaptés aux courbes de séchage.
Hidar et al.	Feuilles de	-	Maroc	≈860	Séchoir solaire	- La diffusivité	- La température du

(2020)	stévia				à convection forcée indirecte.	effective de l'humidité variait de $5,07 \times 10^{-11}$ et $3,14 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. - Énergie d'activation rapportée à 37,81 kJ / mol. - La teneur totale en composés phénoliques, en flavonoïdes et en chlorophylle a diminué avec l'augmentation de la température de l'air	flux d'air affectera la dégradation de la qualité et les composants bioactifs.
Shalaby et al. (2020)	Feuilles de basilic doux	-	Egypte	1109	séchoir solaire à convection forcée en mode indirect.	- Nombre d'heures prises en OSD : 32 h - Nombre d'heures passées au séchoir solaire avec stockage d'énergie : 60 h. - Les composés organiques volatils ont été trouvés peu plus élevés que les échantillons séchés à l'air libre.	- Temps de séchage réduit de 48,33%
Soodmand - Moghaddam et al. (2020)	Feuilles de verveine citronnelle	-	Iran	-	Séchoir à flux continu équipé d'un système de préchauffage solaire.	- Teneur en humidité réduite d'environ 86,8 %.	- Le modèle Midilli et Kucuk a été jugé le mieux adapté.
Lakshmi et al. (2019)	Feuilles de stévia	10	Inde	567	Séchoir solaire à convection forcée en mode mixte.	- 5,5 h prises pour réduire le taux d'humidité à environ 5,3 %. - L'efficacité globale du séchoir était de 33,5 %. - L'efficacité exergétique moyenne était de 59,1 %. - La période de récupération était de 0,65 ans.	*
Bahammou et al. (2019)	Marrube, feuilles de Marrubium vulgare	-	Maroc	1050	Séchoir solaire indirect	- Grande quantité de phénols trouvés pour les échantillons séchés au soleil.	- L'efficacité énergétique était proportionnelle à la température de séchage ; également indirectement proportionnel au débit d'air fourni. - Modèle Midilli-Kucuk jugé le mieux adapté.
Tellez et al.	Feuilles de	-	Mexique	950-990	Séchoir solaire	- La dégradation des	- Les modèles à

(2018)	stévia					direct et indirect	tons des échantillons dépendait fortement de la température de l'air de séchage. - La décoloration des échantillons a été trouvée moindre.	deux termes Exponentiels et Weibull sont les mieux adaptés au séchage direct. - Modèle Weibull jugé le mieux adapté au séchage solaire indirect.
Morad et al. (2017)	Plantes de menthe poivrée	-	Egypte	~650		Séchoir tunnel solaire à effet de serre	- Temps de séchage des feuilles : 8h. - Temps de séchage pour toute la plante : 9h. - La teneur en huile volatile la plus élevée a été trouvée dans les feuilles en tant qu'échantillons comparés lors du séchage à la plante entière.	- The drying rate increased by about 24% with the use of a fan for circulating the heated air.
Bhardwaj et al. (2017)	Valeriana Jatamansi	-	Inde	~900		Séchoir solaire indirect avec MCP.	- Teneur en humidité réduite de 89,9 %. - 0,16% de plus de valépotriates trouvés avec l'utilisation de MCP.	- Temps de séchage réduit de 37,50 % et 64,29 % en utilisant le MCP par rapport à la pompe à chaleur et au séchage à l'ombre.
Kareem et al. (2017)	Roselle	-	-	635.49		Aérotherme solaire multi-passes à convection forcée avec armoire.	- 21 h de temps moindre pour la décoloration des échantillons dans le séchoir solaire par rapport au séchage au soleil à l'air libre. - Période de récupération signalée comme 2,14 ans.	*
Mghazli et al. (2017)	Feuilles de romarin	-	-	-		Convection forcée indirecte	- Énergie d'activation rapportée à 54,37 KJ/mol.	- Le modèle Midilli-Kucuk a été jugé le mieux adapté au séchage cinétique.
Lahnine et al. (2016)	Thyme	-	-	-		Séchoir solaire à convection	- L'utilisation d'acide citrique a montré un effet néfaste sur l'échantillon séché. - La température et le débit d'air ont affecté la qualité de séchage des échantillons.	- Les modèles Wang-Singh et Midilli-Kucuk sont les mieux adaptés.
Cipliene et	Agripaume	-	Lituanie	576 ± 268		Séchoir solaire	- L'opération de	- La configuration

al. (2015)					indirect	séchage continu a été effectuée pour les échantillons à une température de 35 ± 6 °C en utilisant l'énergie stockée.	proposée utilisée pour une journée autour de l'opération.
Gulcimen et al. (2016)	Basilic	-	Turquie	750	Séchoir armoire à convection forcée indirecte	- Efficacité du capteur solaire rapportée comme 42, 51, 63% à des débits de 0,012, 0,026, 0,033 respectivement.	- Modèle de page trouvé comme le mieux adapté. - Un nouveau modèle mathématique développé pour une meilleure utilisation de l'énergie solaire dans le collecteur.
Sallam et al. (2015)	Menthe	7.2	Gizeh	50 à 944	Convection naturelle et forcée	- Taux d'humidité réduit de 5,4% en convection naturelle et de 86,8% en convection forcée.	- Le taux de séchage de la menthe était plus élevé en convection forcée.
El-Sebaï et Shalaby et al. (2013)	Thymus et Menthe	-	Egypte	1000	Convection forcée en mode indirect	- Taux d'humidité réduit de 95% pour le Thym et de 85% pour la Menthe. - Le temps de séchage pour le Thym était de 34 h et de 5 h pour la Menthe.	- Modèles de page et de page modifiés trouvés les meilleurs pour le thym. - Modèle Midilli et Kucuk trouvé meilleur pour Mint.
Fargali et al. (2008)	Plante médicinale	-	Egypte	-	Séchoir solaire photovoltaïque, solaire thermique et biogaz	- La technique de contrôle développée peut être utilisée pour différentes sources d'énergie et peut effectuer des opérations continues par temps nuageux et nocturne.	- L'intégration de multiples sources d'énergie comble les énormes besoins en énergie thermique et électrique.
Mohamed et al. (2005)	Feuilles de Citrus aurantium	-	-	230-980	Convection forcée indirecte	- Teneur en humidité réduite de 84,4%.	- Régression linéaire multiple utilisée pour trouver les constantes des modèles. - Modèle Midilli-Kucuk jugé le meilleur.

I.5. Prétraitements pour le séchage des herbes :

Les prétraitements avant le séchage sont des stratégies de transformation visant à obtenir des herbes séchées de haute qualité, à raccourcir le temps de séchage et à réduire la consommation d'énergie. Une bonne mise en œuvre des prétraitements ne devrait créer qu'une modification minimale des paramètres du processus de séchage afin de réduire les coûts de suivi de la modification. (Le **tableau I.2**) résume les études examinées dans cette section sur l'effet des prétraitements sur la qualité des herbes séchées. Il a été rapporté que plusieurs prétraitements offrent des avantages pour le séchage des herbes, tels que le blanchiment, le champ électrique pulsé et le traitement par ultrasons. Dans cette section, l'effet des prétraitements sur la qualité des herbes séchées avant diverses méthodes de séchage sera examiné [94, 95].

I.5.1. Blanchiment :

Le blanchiment offre des avantages au séchage de nombreux types d'herbes. Le principal avantage du blanchiment est la réduction de la dégradation des couleurs. Il a été rapporté que le blanchiment réduisait le temps de séchage du basilic. Le blanchiment à la vapeur pendant 15 s a multiplié par 10 le taux de séchage par rapport aux feuilles non traitées [96].

Les feuilles de basilic séchées et blanchies à la vapeur ont également montré une meilleure rétention de la couleur et un rapport chlorophylle a/b accru. Des résultats similaires ont été observés dans les feuilles de persil; le persil blanchi à la vapeur a montré un taux de séchage 30% plus rapide et la consommation d'énergie a été réduite de 72% par rapport au séchage des feuilles non traitées. De plus, le persil séché blanchi a montré une bonne rétention de la teneur en lutéine et une meilleure rétention de la couleur [97].

Un résultat similaire a été obtenu dans des feuilles d'aneth blanchies dans de l'eau chaude pendant 1 min avant le séchage avec plusieurs méthodes de séchage, y compris le séchage à flux continu (45 °C), le séchage à flux croisés (40 °C), le séchage sous vide (45 °C), et la lyophilisation [98].

Le blanchiment a diminué le temps de séchage pour toutes les méthodes de séchage testées. Cependant, il a été signalé que le blanchiment entraînait une perte plus élevée de la teneur totale en huile essentielle des produits séchés. Les résultats opposés ont été observés dans les feuilles de coriandre blanchies (80 °C dans l'eau), où le taux de séchage était plus lent par rapport aux feuilles non traitées [99].

Néanmoins, le blanchiment a entraîné une meilleure rétention de la chlorophylle et une plus grande capacité de réhydratation des produits séchés par rapport aux produits séchés non blanchis. Des résultats similaires ont été observés chez le basilic [100].

L'utilisation du blanchiment en combinaison avec des agents chimiques pourrait apporter des avantages aux produits séchés ; l'ajout de métabisulfite de potassium à la solution de blanchiment a amélioré la rétention de l'acide ascorbique, du bêta-carotène et de la chlorophylle des feuilles séchées d'amarante et de fenugrec [101].

Il existe différentes techniques de blanchiment pour les herbes, telles que le blanchiment à l'eau, le blanchiment à la vapeur et le blanchiment aux micro-ondes [102].

La marjolaine et le romarin séchés blanchis traités avec toutes ces techniques de blanchiment ont montré une meilleure rétention de la couleur par rapport aux produits séchés non blanchis. De plus, le blanchiment à l'eau a montré la meilleure rétention de couleur, suivi du blanchiment aux micro-ondes et à la vapeur. Cependant, le blanchiment aux micro-ondes a montré une teneur plus élevée en acide ascorbique et de meilleures propriétés texturales. Le blanchiment sous vide, où les herbes sont emballées dans un sac sous vide puis blanchies dans de l'eau chaude, a permis une meilleure rétention des composés bioactifs dans le produit séché. L'effet du blanchiment à l'eau et du blanchiment sous vide (à 100 °C) sur la qualité du thé java séché avant le séchage par convection, le séchage par déshumidification par pompe à chaleur, le séchage solaire en mode mixte et la lyophilisation a été rapporté [103].

Les résultats ont montré que le blanchiment sous vide entraînait des teneurs plus élevées en sinensétine et en eupatorine dans le produit séché par rapport au blanchiment à

l'eau. En outre, les feuilles séchées blanchies sous vide (séchées à l'aide d'un séchoir à pompe à chaleur) ont montré une meilleure intégrité de la paroi cellulaire que les échantillons non blanchis.

Le blanchiment peut également nuire à la qualité de l'herbe. Il a été rapporté qu'il cause une perte significative des propriétés antioxydantes de certains types d'herbes telles que le basilic clou de girofle, *Basella alba*, *Corchorus olitorius* et *Solanum macrocarpon* [104].

De plus, le blanchiment a également été signalé comme provoquant la dégradation de l'arôme de certains types d'herbes telles que le basilic, où la destruction des glandes sébacées a été observée. Le blanchiment a entraîné une perte plus élevée de composés aromatiques dans les échantillons séchés avec plusieurs méthodes de séchage, notamment le séchage à l'air (50°C), le séchage par micro-ondes et la lyophilisation. L'échantillon lyophilisé non blanchi était le seul échantillon qui ne montrait aucune réduction des composés aromatiques.

I.5.2. Champ électrique pulsé (CEP) :

Le champ électrique pulsé CEP est une méthode de traitement non thermique qui applique un champ électrique externe aux cellules ou aux tissus, partie provoquant de la membrane cellulaire. Le CEP a attiré beaucoup d'attention en raison de sa large gamme d'applications dans la transformation des aliments, comme l'extraction, le séchage et l'inactivation microbienne. Plusieurs études sur l'effet du CEP sur le séchage de plusieurs types de matières premières végétales ont été menées [105-110].

La plupart de ces études se sont concentrées sur l'utilisation de la perméabilisations irréversible (les cellules ne survivent pas à l'application de CEP) des tissus végétaux, provoquant des dommages permanents à la membrane cellulaire et entraînant une augmentation du coefficient de diffusion de l'humidité et une réduction drastique du temps de séchage. Cette réduction du temps de séchage pourrait donner des résultats favorables dans le séchage des aliments sensibles à la chaleur telle que les herbes [11].

À notre connaissance, seules deux études ont étudié l'effet de la perméabilisations réversible (les cellules survivent à l'application de PEF) en tant que prétraitement pour le séchage sur la qualité des herbes. L'électroporation réversible et irréversible a permis d'électroporer les cellules de garde des stomates des feuilles de basilic [106, 110].

L'électroporation des cellules de garde a provoqué une ouverture stomatique soutenue pendant le processus de séchage à l'air chaud, ce qui a augmenté la vitesse de séchage et amélioré la couleur, l'arôme et la capacité de réhydratation des échantillons traités. ont étudié l'effet de la perméabilisations réversible en combinaison avec différents procédés de séchage (séchage à l'air chaud, séchage sous vide et lyophilisation) sur la qualité du basilic. Cette étude a montré que le traitement de perméabilisations réversible des tissus réduisait le temps de séchage pour chaque méthode de séchage testée (57 % pour le séchage à l'air chaud, 33 % pour le séchage sous vide et 25 % pour la lyophilisation) [110].

De plus, les feuilles traitées de manière réversible au PEF ont montré une meilleure préservation de l'intégrité des trichomes avec le séchage à l'air chaud et sous vide par rapport aux feuilles non traitées. Cependant, les trichomes des échantillons lyophilisés ont été endommagés dans les feuilles traitées au CEP et non traitées.

I.5.3. Ultrason :

Les ultrasons sont un prétraitement non thermique pour le séchage des matières alimentaires. Le processus est conduit en appliquant des ultrasons de haute puissance avec des basses fréquences (20-100 kHz) et des intensités élevées (10-1000 W/cm) au matériau alimentaire, ce qui entraîne un transfert de masse accru sans chauffage ou avec seulement un chauffage très subtil [111].

Les ultrasons induisent la formation de micropores à la surface des matériaux, ce qui se traduit par un moindre effet de cémentation au sommet des surfaces des matériaux lors du séchage, ce qui inhiberait l'élimination de l'eau. Il a été rapporté que ce traitement améliore le taux de séchage du séchage par convection des aliments à base de plantes. Les études sur les ultrasons en tant que prétraitement pour les processus de séchage ont été rapportées dans de nombreux types d'aliments [112-117].

Dans les herbes, le persil séché traité aux ultrasons a montré une teneur totale en composés phénoliques, en chlorophylle et en lutéine plus élevée par rapport aux feuilles non traitées. Cependant, il a été signalé que la meilleure méthode de prétraitement du persil était le blanchiment à la vapeur, compte tenu de la teneur en polyphénols, de l'activité antioxydante, de la chlorophylle a, de la chlorophylle b et de la lutéine. L'effet des Ultrasons de Haute Puissance (UHP) en tant que prétraitement pour le processus de séchage au dioxyde de carbone supercritique (scCO₂) des feuilles de coriandre a été signalé [118, 119].

Le prétraitement UHP a été utilisé pour améliorer le temps de séchage et a fourni un meilleur effet d'inactivation des micro-organismes par rapport au produit séché non traité. Des résultats similaires ont été observés dans le séchage des feuilles de thym, où le traitement par ultrasons a entraîné une réduction du temps de séchage de 30 % par rapport aux feuilles non traitées. Cependant, l'effet décroissant du temps de séchage du prétraitement par ultrasons n'a été observé qu'à une température de séchage inférieure à 70 °C (des températures de séchage de 40, 50, 60, 70 et 80° C ont été étudiées) [120].

Tableau I.2. Effets des prétraitements sur la qualité des herbes séchées [94, 95].

Prétraitement	Couleur	Teneur en chlorophylle	Huile essentielle	Profil composé aromatique	Propriétés structurelles	Contenu bioactif
Blanchiment	- Amélioration de la rétention de la couleur de l'aneth séché en combinaison avec le séchage à l'air chaud, le séchage sous vide et la lyophilisation. Amélioré aussi en basilic, coriandre et persil séchés à l'air chaud.	- Amélioration de la teneur en chlorophylle dans de nombreux produits séchés tels que le basilic et le persil en combinaison avec le séchage à l'air chaud.	- Diminution de la teneur en huile essentielle de l'aneth en combinaison avec le séchage à l'air chaud, le séchage sous vide et la lyophilisation.	- Dégradation de l'arôme du basilic lorsqu'il est combiné à l'air chaud, au micro-ondes et à la lyophilisation.	- Améliorer l'intégrité de la paroi cellulaire des feuilles de Java séchées séchées avec une pompe à chaleur déshumidifier le séchage mais augmenter les dommages de séchage à la structure des trichomes dans le basilic séché à l'air chaud.	- Préserve les composés bioactifs tels que la lutéine dans le persil séché avec de l'air et la sinensetine et l'eupatorine dans le thé de Java séché avec un séchage par convection, un séchage déshumidifié par pompe à chaleur, un séchage solaire en mode mixte et une lyophilisation.
Ultrason	- Pas de données disponibles	- Amélioration de la rétention de la chlorophylle dans le persil séché à l'air chaud.	- Pas de données disponibles	- Pas de données disponibles	- Pas de données disponibles	- Composés bioactifs conservés, comme la lutéine dans le persil séché à l'air chaud.
Champ électrique pulsé (CEP)	- Meilleure rétention de la couleur du basilic séché avant le séchage à l'air chaud.	- Pas de données disponibles.	-Amélioration de la conservation des trichomes dans le basilic avant le séchage à l'air chaud et sous vide.	- Augmentation de la rétention des composés aromatiques du basilic séché à l'air chaud (uniquement avec perméabilisation réversible).	- Diminution de l'effondrement des cellules du basilic lorsqu'il est combiné avec de l'air chaud et un séchage sous vide.	- Pas de données disponibles.

Chapitre II

Généralité sur les plantes utilisées.

Introduction:

Les plantes aromatiques, également connues sous le nom d'herbes et d'épices, sont utilisées au Moyen-Orient depuis environ 5000 avant JC pour leurs propriétés conservatrices et médicinales, en plus d'améliorer l'arôme et la saveur des aliments [121, 122, 123].

Leur utilisation ne diminue pas aujourd'hui et selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), près de 80 % de la population de la planète, en particulier dans les pays en développement, dépend encore des plantes médicinales pour leurs soins de santé [124, 125].

De plus, des additifs alimentaires dérivés de plantes, également appelés phytogéniques ou phytobiotiques ou botaniques, peuvent être inclus dans les régimes alimentaires des animaux pour améliorer leur productivité et les propriétés des aliments et des produits animaux qui en résultent. Parmi ces additifs naturels, les plantes aromatiques, leurs extraits et leurs huiles essentielles ont été examinés en raison de leurs avantages par rapport aux antibiotiques en tant que promoteurs de croissance. Ils sont sans résidus et généralement reconnus comme sûrs [126-128].

II.1. Le genre de *Pituranthos* :

Le genre *Pituranthos* est représenté par 12 espèces largement réparties en Afrique du Nord [129].

Dans la flore d'Algérie, ce genre est représenté par quatre espèces, à savoir :

- *Pituranthos chloranthus*.
- *Pituranthos batandieri* Maire.
- *Pituranthos scoparius*.
- *Pituranthos reboudii*. [130].

II.1.1. *Pituranthos scoparius* :

II.1.1.1. Définition :

Pituranthos scoparius (Aussi appelé *Deverra scoparia*), en arabe (Guezzah) est une plante endémique d'Afrique du Nord (Mauritanie, Maroc, Algérie et Tunisie) (**Figure II.1.**) poussant spontanément dans les alpages et répandue sur les hauts plateaux et dans tout le Sahara. Les plantes forment des touffes dressées avec des tiges non divariquées qui sont en général totalement aphyllées [129-132] (**Figure II.2.**).

Les tiges florifères présentent des ombelles latérales à pédoncules courts (1-3 cm). Les fleurs sont blanches et le fruit est plus long que large, hérissé de poils dressés [130] (**Figure II.3.**).



Figure II.1. Répartition géographique en Afrique du Nord de la plante *pituranthos scoparius* [154].



Figure II.2. Photo originale Partie aérienne de *Pituranthos scoparius* Oued Ntissa
Ghardaïa: Mai 2022.



Figure II.3. Photo originale Fleures de la plante *Pituranthos scoparius*.

II.1.1.2. Médecine traditionnelle et connaissance locale :

Pituranthos scoparius sont utilisé en médecine populaire pour le traitement des spasmes, des douleurs, du diabète, des hépatites, des troubles digestifs, des infections urinaires et pour les soins post-partum [133, 134].

Pituranthos scoparius est aussi communément appelé « Tattaï » par les Touaregs qui l'utilisaient dans les aliments comme arôme pour les repas et le pain [137, 138].

II.1.1.3 Compositions chimiques :

Des études phytochimiques ont révélé que *Pituranthos scoparius* contient une grande variété de composés.

Cinq flavonoïdes glycosylés ont été isolés dans un extrait butanolique (apigénine 7-O-glucoside ou apigétrine, apigénine 7-O-rhamnoside, apigénine-6,8-di-C-glucoside, isorhamnétine-3-O-glucoside et apigénine-6,8 - di-C-glucoside (vicenine-2)) [138].

Deux isocoumarines ont été isolées de l'extrait à l'acétate d'éthyle de la racine de *Pituranthos scoparius* : la 3-n-propyl-5-méthoxy-6-hydroxy-isocoumarine et la 3-n-propyl-5,7-diméthoxy-6-hydroxy-isocoumarine [138].

Deux acides cinnamiques (acide 5-O-caféoyl quinique et acide 5-féruloyl quinique) et treize flavonoïdes connus (vicenine-2, six dérivés Oglycosylés de la quercétine et six de l'isorhamnetine) ont été identifiés dans des extraits méthanoliques et aqueux [139].

II.1.2. Généralité sur les huiles essentielles :

II.1.2.1. Définition, localisation et répartition des huiles essentielle :

Les huiles essentielles, également appelées huile odoriférante volatile, sont des liquides huileux aromatiques extraits de différentes parties de plantes, par exemple, des feuilles, des écorces, des fleurs, des bourgeons, des graines, etc. Ils peuvent être extraits des matières végétales par plusieurs méthodes, distillation à la vapeur, expression, etc. Parmi toutes les méthodes, par exemple, la méthode de distillation à la vapeur a été largement utilisée, en particulier pour la production à l'échelle commerciale [140, 141].

Les huiles essentielles ont été largement utilisées comme arômes alimentaires. Les huiles essentielles trouvées dans de nombreuses plantes différentes, en particulier les plantes aromatiques, varient en odeur et en saveur, qui sont régies par les types et la quantité de constituants présents dans les huiles. Presque n'importe quelle partie d'une plante peut être la source de l'huile, qui pourrait être extraite et pleinement exploitée pour des applications alimentaires ou autres [142].

II.1.2.2. Composition chimique des huiles essentielles :

Plusieurs plantes contiennent des huiles essentielles, cependant, les parties des plantes, qui constituent la principale source d'huile essentielle, peuvent être différentes. Ceux-ci incluent les racines, les pelures, les feuilles, les graines, les fruits, les écorces, etc. Les huiles essentielles végétales sont généralement un mélange complexe de composés naturels, à la fois polaires et non polaires [143].

III.1.2.3. Composition chimique des huiles essentielles de *Pituranthos scoparius* :

Ont rapporté la composition d'un échantillon d'huile isolé à partir de fleurs récoltées en automne à M'sila (Centre Algérie). La composition était principalement représentée par les monoterpènes, suivis des dérivés phénylpropanoïdes. Les principaux constituants de l'huile essentielle étaient la myristicine (24,1%), l' α -pinène (17,4%) et l' α -phellandrène (15,6%) [144].

Les huiles obtenues à partir des parties aériennes récoltées au stade de la floraison en octobre, de quatre localités d'Algérie (Boussâada (M'sila), T'Kout (Batna), El Kantra et M'chouneche (Biskra)) contenaient du sabinène (14,8-24,8%), α -pinène (8,3-23,3%) et α -terpinène (3,7-7,7%) comme composants principaux. La myristicine (7,6 %) et l'apiole d'aneth (6,6 %) présentaient des quantités notables pour l'échantillon d'El Kantra, tandis que l'apiole d'aneth atteignait 16,8 % dans l'échantillon de M'chouneche [145].

Ont étudié la composition des parties aériennes fraîches et séchées (tiges et feuilles) de *P. scoparius* collectés à Souk Ahras (est de l'Algérie). Les deux huiles présentaient une composition dominée par les hydrocarbures monoterpéniques : α -pinène (34,4 % et 23,6 %, respectivement), sabinène (16,3 % et 26,5 %, respectivement) et p-cymène (10,1 % et 8,6 %, respectivement), mais pas de phénylpropanoïde. Dérivés ont été trouvés [146].

Ont également étudié la composition d'échantillons d'huile de parties aériennes isolées de plantes récoltées en mars dans la province de Tamanrasset (Hoggar, sud de l'Algérie). Cet échantillon d'huile était caractérisé par une teneur élevée en limonène (46,9 %) suivi de 1,8- cinéole (7,6 %). Parmi les composants inhabituels des huiles essentielles, le (3Z)-butylidène-phthalide (2,6 %) et le (3E)-butylidène-phthalide (1,2 %) ont également été trouvés dans cet échantillon [147].

II.2. *Aloysia citrodora*:

Aloysia citrodora est largement utilisée à des fins médicinales et aromatiques en Amérique du Sud. Selon les données de la littérature, les rapports sur l'utilisation traditionnelle de cette espèce remontent au 17^{ème} siècle, montrant son importance ethnopharmacologique en tant que plante médicinale utilisée par la culture Inca [148].

Les « kallawayas », un groupe itinérant de guérisseurs traditionnels des Andes, appelaient la plante « quechua » ou « wari pankara » qui était utilisée comme digestif, antispasmodique et remède contre la bronchite et les problèmes cardiaques [149].

L'utilisation la plus courante de cette plante aromatique était la préparation d'infusions. De nombreuses bioactivité ont été confirmées dernièrement dans la fraction volatile [150].



Figure II.4. Photo originale de la plante *Aloysia citrodora* Ntissa Ghardaïa: Avril 2022.

II.3. Méthodes d'extraction des huiles essentielles

Pour l'extraction des huiles essentielles il y a plusieurs méthodes, chaque méthode a les avantages et les inconvénients. Le (Tableau II.1) présente les avantages et les inconvénients de ces principales méthodes.

Tableau II.1. Avantages et inconvénients de différentes méthodes d'extraction [151]

Procédés d'extraction	Avantages	Inconvénients
Hydrodistillation	Plus simple, rendement d'extraction élevé, huiles essentielle de bonne qualité, contacte intime entre l'eau et l'huile (DAHIA, 2009).	Chauffage prolongé et très puissant engendre la dégradation de certaines molécules aromatiques (HELLAL, 2011).
Distillation par entraînement à la vapeur d'eau	Absence d'altérations hydrolytiques,	Consomme beaucoup du temps DAHIA, 2009).
Hydrodiffusion	économie d'énergie (méthode plus rapide) (HELLAL, 2011).	Consommation de vapeur (HELLAL, 2011).
Expression à froid	Huile essentielle de haute qualité sans dégradation (DAHIA, 2009).	Rendement en huile faible, méthode non généralisée, extrait pauvre en colorants et antioxydants (DAHIA, 2009).
Extraction assistée par micro-onde	Méthode très rapide, rendement en huile élevé, gain de temps d'extraction et conditions de travail convenables (BRUNETON, 1999 ; HELLAL, 2011).	Risque de détérioration des composants responsables de l'odeur (DAHIA, 2009).
Extraction par les solvants et les graisses	Pouvoir d'extraction par les solvants très élevé que l'eau, extraits riches en composés volatils et non volatils (HELLAL, 2011).	Problème de toxicité par les solvants organiques et résiduels (HELLAL, 2011).
Extraction par fluides supercritique	Le CO ₂ est relativement non toxique, ininflammable, disponible et éliminé aisément de l'extrait. Bon pouvoir d'extraction, la haute qualité d'huile extraite (HELLAL, 2011 ; DAHIA, 2009)	La baisse polarité du dioxyde de carbone supercritique qui est le solvant d'extraction le plus employé (HELLAL, 2011).

Chapitre III

Matériels et méthodes

Partie 1: MATERIEL DU SECHAGE:

III.1 MATERIEL AU CHAMP EXPERIMENTAL DE L'URAER

Les expériences ont été menées à la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa, situé à une latitude de 32,37° Nord et une longitude de 3,77 Ouest.

III.1.1 Description du prototype expérimental:

Dans cette partie, nous allons faire une description générale des modèles qui ont été essayés dans le cadre d'un mémoire de master (**Figure III.1**).

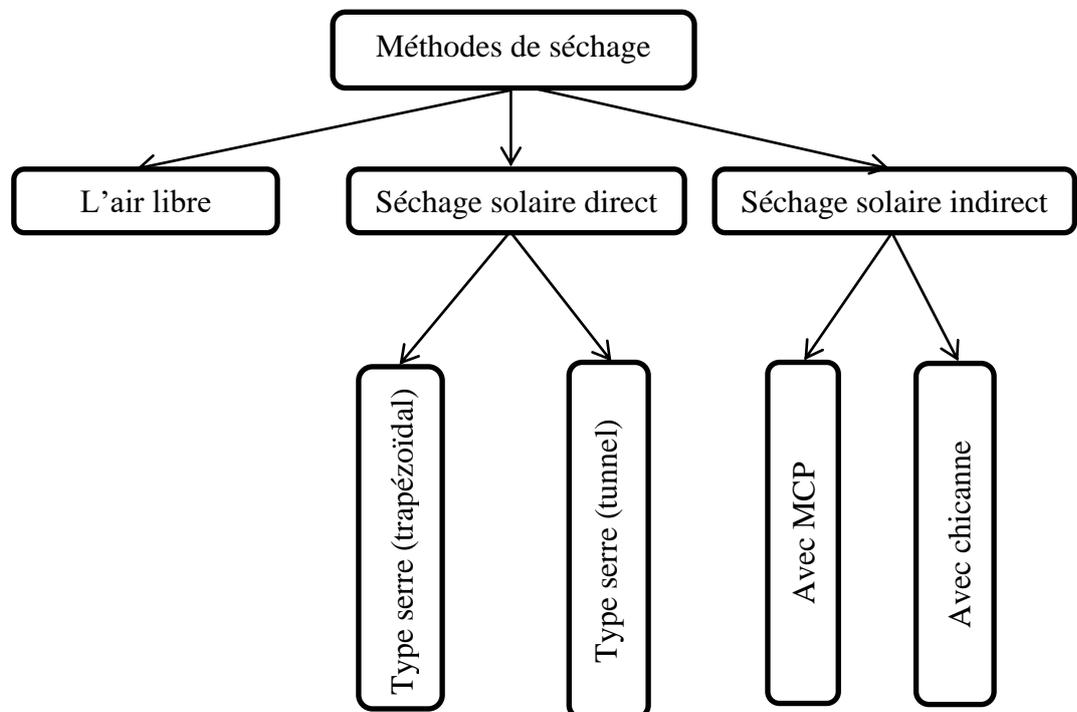


Figure III.1. Schéma des méthodes de séchage

III.1.1.1. Séchage indirect:

Nous considérons deux séchoirs solaires de type indirect, ces deux séchoirs solaires ont été instrumentés de sorte à pouvoir étudier le comportement thermique et la cinétique de séchage. Le séchoir de type indirect à une unité de production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage de 5 mm d'épaisseur, de surface inclinée, l'absorbeur en tôle d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm peints en noire mate de

dimension $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. L'isolation thermique est en polystyrène. Pour notre cas, on a utilisé du polystyrène d'épaisseur 4 cm au-dessus du contreplaqué et sur les parties latérales. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 2.5 cm.

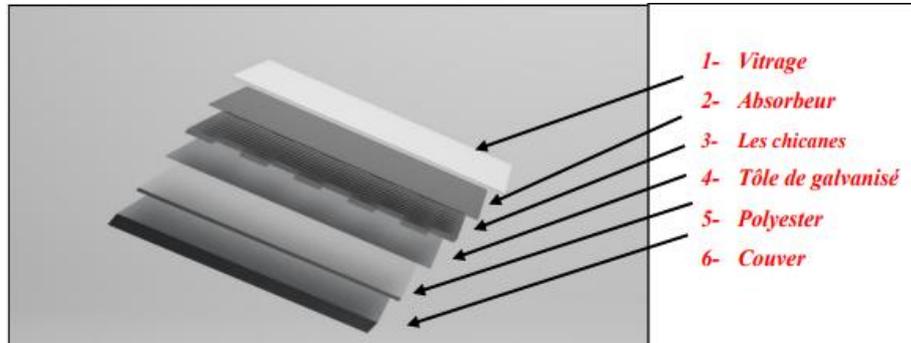


Figure III.2. Dessin technique des composants du capteur *S*



Figure III.3. Le prototype utilisé pour sécher *P. scoparius* et *Louisa*. Le modèle de gauche est MCP et celui de droite avec chicanne.

A. Capteur solaire à air avec chicannes OSF (Offset Strip Fins):

Ce système dispose d'un capteur plan à air doté de chicannes, dont elles permettent de rendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque absorbante et d'augmenter la surface de contact avec elle, afin d'améliorer le rendement thermique (**Figure III.4**).

Les dimensions et la forme des chicannes intégrées dans le capteur solaire à air avec chicannes (**Figure III.5**) [Yang, M., Yang, X., Li, X., Wang, Z., & Wang, P. (2014)].

$$L_{\text{fin}} = 200 \text{ mm} \quad H_{\text{fin}} = 50 \text{ mm} \quad S_{\text{fin}} = 40 \text{ mm}$$

$$D_{\text{fin}} = 40 \text{ mm} \quad t_{\text{fin}} = 0.5 \text{ mm}$$

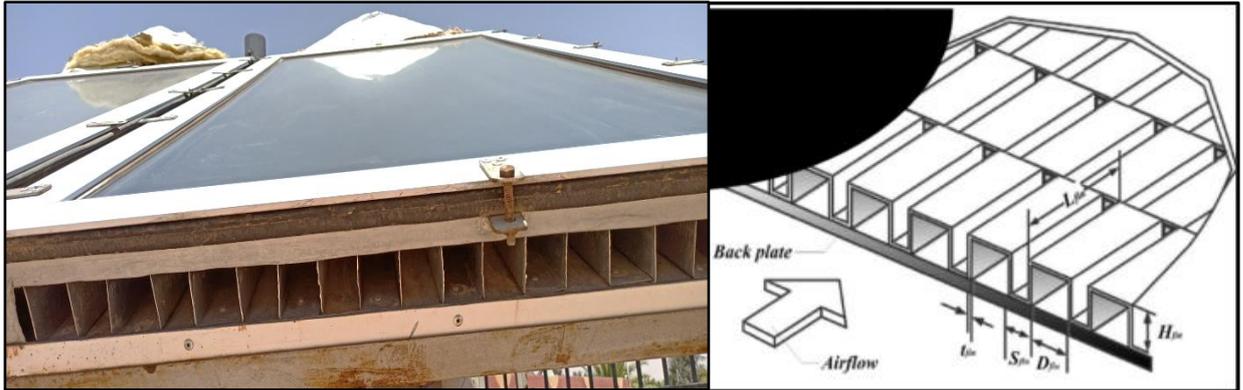


Figure III.4. Capteur solaire avec chicanes

B. Capteur solaire à air avec MCP:

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



Figure III.5. Capture solaire avec MCP

C. L'armoire de séchage:

Il mesure 1,17 mètre de haut, 0,55 mètre de long et 0,55 mètre de large. 1 claie (étagère) sur lesquelles est placé le produit à sécher. L'air chaud entre par haut et traverse les racks avec un flux de chaleur forcé des ventilateurs ce qui crée un écoulement forcé (**Figure III.6**)



Figure III.6. Photographie d'une armoire de séchage (frigo)

III.1.1.2. Séchage direct:

Nous avons deux types de séchoirs (serre trapézoïdal, et serre tunnel).

A. Séchoir type serre (trapézoïdal):

A une hauteur de 1 m, une longueur de 2 m et une largeur de 1 m. Cette pièce contient 4 étagères (étagères) sur lesquelles sont placés les produits à sécher. L'air entre par le haut et traverse les racks avec un flux de chaleur forcé généré par les ventilateurs créant un flux forcé (**Figure III.7**)



Figure III.7. Séchoirs solaire direct de type serre (trapézoïdal)

B. Séchoir type serre (tunnel):

Ce système contient un couvercle en polycarbonate, qui présente une isolation thermique partielle ; il est recouvert d'une forme semi-cylindrique pour faciliter le passage de la lumière du soleil de tous les côtés et pour élever sa température. Nous avons ajouté un matériau de stockage thermique (MCP) au milieu de la serre pour stocker le maximum d'énergie (**Figure III.8**).



Figure III.8. Séchoirs solaire direct de type serre (tunnel)

III.1.1.3. Acquisition et traitement des données

L'Acquisitions de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22bit) un système de commutation 40 voies Pilotée par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données (FigIII.9).

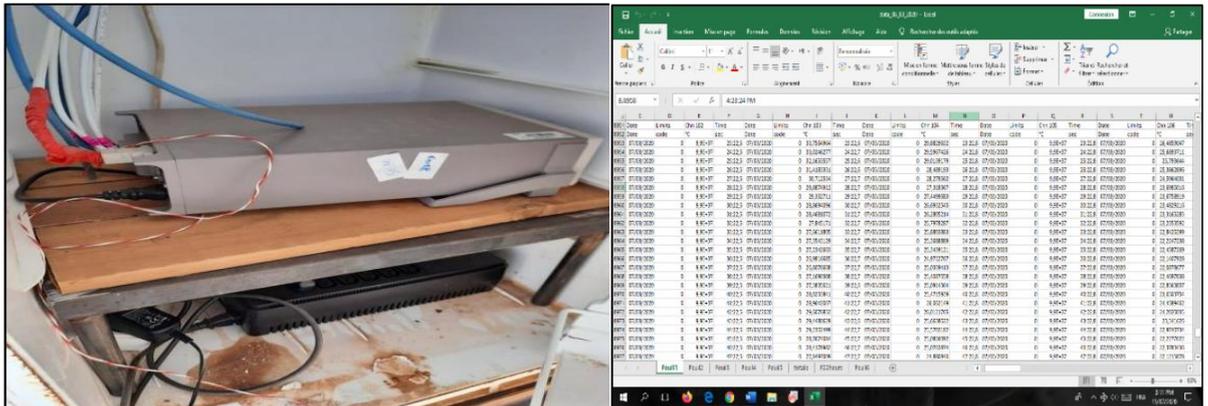


Figure III.9. Photographie de système d'acquisition et de traitement des données



Figure III.10. Acquisition et de traitement des données-Recorder PCE-T 1200

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

III.2.1. Etuve

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



Figure III.11. Photographies du l'Etuve utiliser pour déterminer la teneur en matière sèche

III.2.2. Dessiccateur

Le dessiccateur est un appareil servant à la dessiccation, ou encore servant à empêcher que l'humidité ne pénètre un corps. Le récipient fermé contient un agent desséchant appelé dessiccant (déshydratant). Le couvercle est graissé (généralement avec de la graisse silicone) pour fermer hermétiquement.



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

III.2.3. Balance:

C'est un instrument de mesure qui sert à suivre la masse.



Figure III.13. Balance KERN ABJ10mg-220g [155]



Figure III.14. Balance KERN PCB 3500-2: 3500g [156]

III.3. MATERIEL VEGETAL:

III.3.1. *Aloysia citrodora* (Louisa):

Aloysia citrodora (Louisa) a été fournie par notre fermes été dans la région de périmètre Agricole Ntissa (10 km au nord de Ghardaïa), Nous avons récolté le 12/04/2022 à 7h : 00 La teneur en eau initiale de *Aloysia citrodora* était de 91,12 %.



Figure III.15. Photo originale de *Louisa*

III.3.2. *Pituranthos scoparius* (Guezzah):

Pituranthos scoparius (Guezzah) a été fournie par la région de périmètre Agricole Ntissa (10 km au nord de Ghardaïa), Nous l'avons récolté le 11/05/2022 à 19h00 La teneur en eau initiale de *Pituranthos scoparius* était 54.30 %.



Figure III.16. Photo originale de *Pituranthos scoparius*.

III.3.3. Protocole de séchage de *Louisa*:

✓ **Préparation de l'échantillon:**

Triage et lavage de *Louisa* à l'eau, puis égouttés les branches. Il est coupé en petits morceaux et distribué en quantités égales dans cinq paniers, ces derniers placés sur cinq séchoirs différents (avec chicannes, avec MCP, tunnel, trapézoïdal, air libre). La quantité de produit à sécher est de 2 kg.

Nous prélevons un petit échantillon de *Louisa* préparé, puis coupons ces racines en fines tranches de 2 à 4 mm d'épaisseur, ces dernières ont été mises à l'étuve pour déterminer la teneur en eau initiale. Pour déterminer notre cinétique de séchage nous avons le protocole suivant :

• **Étape 1:prétraitement:**



Figure III.17.Triage, lavage et découpage de *Louisa*

• **Étape 2:** Préparation les cinq coupelles pour déterminer la teneur en initiale



Figure III.18. Préparation les cinq coupelles

- **Étape 3:** Placé les échantillons sur les cinq séchoirs

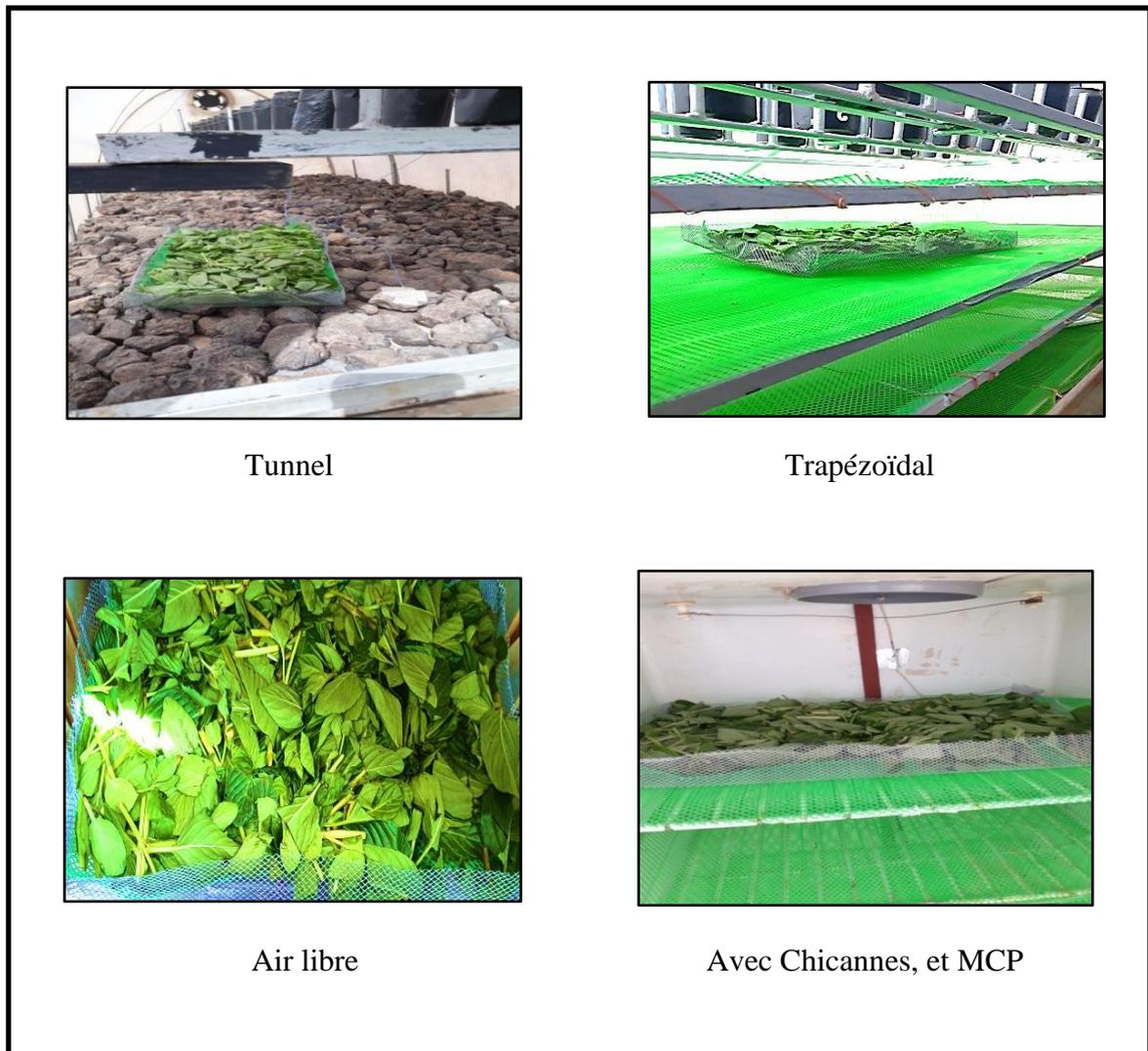


Figure III.19. Les échantillons les séchoirs

III.3.4. Protocole de séchage de *Pituranthos scoparius*:

✓ Préparation de l'échantillon:

Triage le *Pituranthos scoparius* (Guezzah) puis découpage à moyens morceaux d'environ 4 à 5 cm et distribué en quantités égales dans quatre paniers, ces derniers étant placés sur quatre séchoirs différents (avec chicanes, avec MCP, trapézoïdal, air libre). La quantité de produit à sécher est de 5 kg.

Nous prélevons un petit échantillon de Guezzah préparé, puis coupons ces racines en fines tranches de 0.5 à 1 cm d'épaisseurs, ces dernières ont été mises à l'étuve pour déterminer la teneur en eau initiale. Pour déterminer notre cinétique de séchage nous avons le protocole suivant :

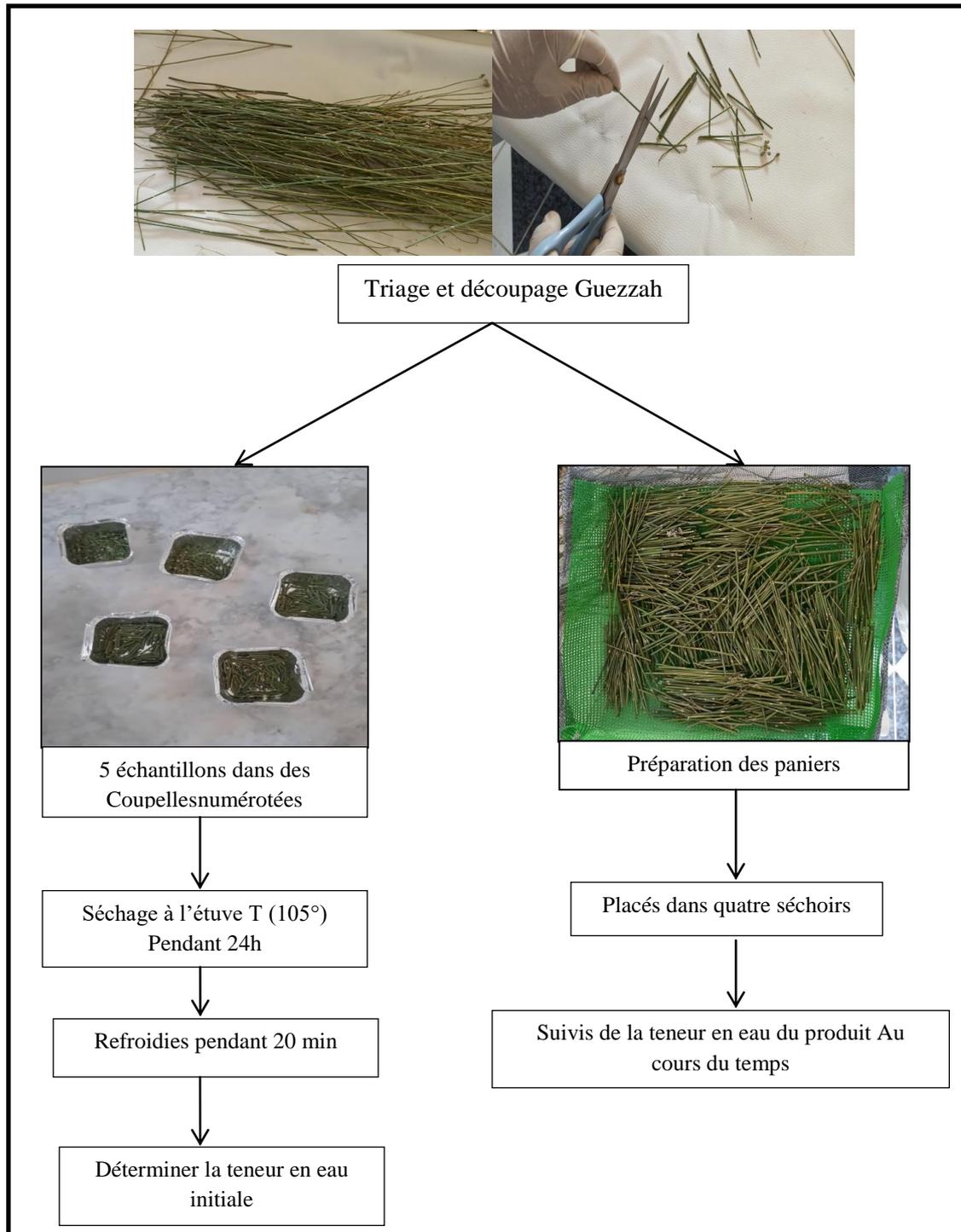


Figure III.20. Schéma représentant le protocole de séchage de la *Pituranthos scoparius*

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

Des échantillons ont été prélevés afin de mesurer la teneur en eau à base humide et sèche. Ils sont séchés à 105°C dans une étuve ventilée. A l'aide des masses de produit mesurées on peut calculer les teneurs en eau en deux bases humide et sèche. La teneur en eau est calculée selon la formule suivante :

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

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

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

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

III.5. Modélisation des cinétiques de séchage:

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

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \dots \quad (\text{Eq III. 2})$$

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

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad \dots \quad (\text{Eq III. 3})$$

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

Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage. Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite **MR** en fonction du temps. Ces formules contiennent des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats théoriques avec les courbes expérimentales de séchage.

Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'investigation expérimental pour lequel elles ont été établies. (**Le Tableau III.1**) regroupe quelques équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche minces d'un produit.

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi ces dix différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le (**Tableau III.1**) Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant le logiciel « **Origin Pro 9.0** ».

Le coefficient (**R2**) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage (**Balbay et al. 2012**). En plus de (**R2**) les différents paramètres statistiques tels que le khicarré réduit (χ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) ont été utilisés pour déterminer la qualité de l'ajustement.

Ces coefficients peuvent être calculés comme suite (**Naderinezhad et al. 2016; Ruhanian et al. 2016**) :

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

N°	Modèles	Équations	Références
1	<i>Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model</i>	$MR = ex(-kt)$	[Lewis. 1921]
2	<i>Page Model</i>	$MR = exp(-kx^n)$	[Xanthopoulos et al. 2007]
3	<i>Herdersonand_Pabis (Single term, Generalized exponential) Model</i>	$MR = Aex(-kt)$	[Zhang, et al. 1991]
4	<i>Modied Page Model</i>	$MR = exp(-(kx)^n)$	[Midilli, et al. 2002]
5	<i>Logarithmic Model</i>	$MR = Aex(-kt) + c$	[Yaldiz et al. 2002]
6	<i>Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model</i>	$MR = Aex(-kt^n) + bt$	[Midilli et al. 2002]
7	<i>DiffusionApproximation (Diffusion Approach) Model</i>	$MR = Aex(-kt) + (1 - A) exp(-kbt)$	[Baltbay et al. 2012]
8	<i>Verma et al. (Modified TwoTerm Exponential) Model</i>	$MR = Aexp(-k1t) + (1 - A) exp(-k2t)$	[Ruiz, et al. 2013]
9	<i>Two-Terms Model</i>	$MR = Aex(-k1t) + bexp(-k2t)$	[Akpınar et al. 2004]
10	<i>Two-Terms Exponential Model</i>	$MR = Aex(-kt) + (1 - A) exp(-kAt)$	[Corzo, et al. 2011]

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

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad \dots \quad (\text{Eq III. 5})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad \dots \quad (\text{Eq III. 6})$$

Avec

$$\overline{MR}_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \quad \dots \quad (\text{Eq III. 7})$$

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

III.6. Détermination de la diffusivité effective de l'eau:

Le taux de transfert de masse par diffusion pure est proportionnel au gradient de concentration de la teneur en eau, avec le coefficient de diffusion effective. Ainsi, la détermination de ce dernier coefficient est essentielle pour mieux décrire le transfert de masse en utilisant la loi de **Fick** similaire, dont l'équation est exprimée par [Vasić et al. 2016] :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla[D_{eff}\nabla MR] \quad \dots \quad (\text{Eq III. 8})$$

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

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla[D_{eff}\nabla^2 MR] \quad \dots \quad (\text{Eq III. 9})$$

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

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 2D_{eff}t / 4L^2) \quad \dots \quad (\text{Eq III. 10})$$

L'équation peut être réarrangée et exprimée comme suit:

$$\mathbf{Ln(MR) = Ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad \dots \quad \mathbf{(Eq III. 11)}$$

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

$$\mathbf{Slope(k) = \frac{-\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \dots \quad \mathbf{(Eq III. 12)}$$

Partie 2 : HUILE ESSENTIELLE

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet des méthodes de séchage sur la teneur en huile essentielle de plante *Pituranthos scoparius* qui ont été essayés dans le cadre d'un mémoire de master.

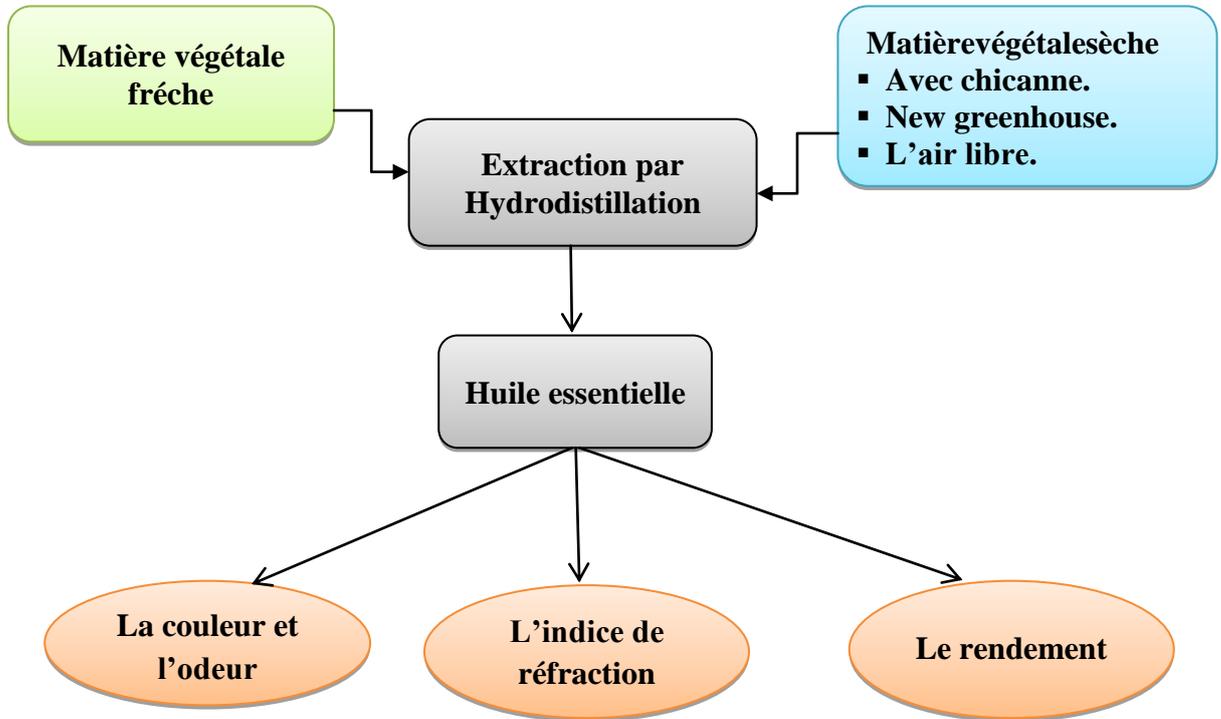


Figure III.21. Schéma général de la procédure expérimentale.

III.1. MATERIEL VEGETAL

Ce travail a été appliqué à la partie aérienne de *Pituranthos scoparius* récoltés dans la région de Ghardaïa à différentes périodes et que nous avons séchées, résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.2. Période de récolte, d'extraction et la durée de séchage.

Tempe de récolte <i>P. scoparius</i>	Méthode de séchage	La durée de séchage <i>P.scoparius</i>	Temps d'extraction <i>P. scoparius</i>
10/05/2022	Avec chicanne	11/05/2022 à 14/05/2022	16/05/2022
10/05/2022	type serre	11/05/2022 à 13/05/2022	17/05/2022
10/05/2022	L'air libre	11/05/2022 à 16/05/2022	18/05/2022
27/04/2022	Fraiche		28/04/2022

III.2. Matériels au laboratoire:

A. Hydrodistillation

Une quantité de 90 g des parties aériennes séchées ou fraiche de la plante Guezzah coupées en morceaux sont injectées dans un ballon à fond rond de 1L imprégnés d'eau distillée (environ 700ml). Le mélange est ensuite porté à l'ébullition environ 3 heures. Les vapeurs, entraînant avec elles l'huile essentielle, se condensent en traversant le réfrigérant et chutent dans une ampoule à décanter (**Figure III.20**).



Figure III.22. Photo original de montage d'hydrodistillation utilisé.

B. Décantation

Pour séparer la phase qui contient l'huile de la phase aqueuse. On met l'extrait obtenu dans une ampoule à décanter, par la suite laisser le mélange rester quelque minute pour stabiliser puis séparer.



Figure III.23.Décantation.



Huile essentiel

Figure III.24. L'HE obtenue après l'hydrodistillation et la décantation

C. L'indice de réfraction

Pour mesurer l'indice de réfraction on utilise le réfractomètre et Pour calculer on utilise la formule suivant :

$$n_d = n_T + 0.0045 (T - 20 \text{ } ^\circ\text{c}) \quad \dots \quad (\text{Eq III. 13})$$



Figure III.25. Réfractomètre

D. Calcul du rendement

Le rendement d'extraction de l'huile essentielle est déterminé par mesure de la quantité obtenue de l'huile essentielle durant l'hydrodistillation par unité de masse de matière traitée.

Le rendement, exprimé en pourcentage, est calculé par la formule suivante :

$$R_{HEs}\% = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \quad \dots \quad (\text{Eq III. 11})$$

Où $R_{HEs}\%$: rendement de l'huile essentielle en pourcentage ;

P_1 : poids de l'huile essentielle en g ;

P_2 : poids des parties utilisées de la plante en g.

Chapitre IV

Résultats et discussion

Les expériences ont été menées à la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa. En suivant le comportement thermique des prototypes des séchoirs solaires. Les caractéristiques de séchage de *Louisa* et de *P. scoparius* sont étudiées sur cinq et quatre jours respectivement. La performance thermique des prototypes des séchoirs solaires.

Les figures ci-dessous (**Figure IV.1**) présentent une vue photographique d'échantillons de produits fraîches et séchés.



Louisa fraîche



Louisa sèche



P. scoparius sèche

Figure IV.1. Photographies d'échantillons de *Louisa* et *P. scoparius*

IV. Séchage de *Louisa* et de *P. scoparius* dans les séchoirs direct, indirect et air libre:

IV.1. Cas 1 : séchage d'*Aloysia citrodora* (Louisa) le 12 avril 2022:

IV.1.1. Comportements thermique :

A. Prototype de séchoir solaire direct

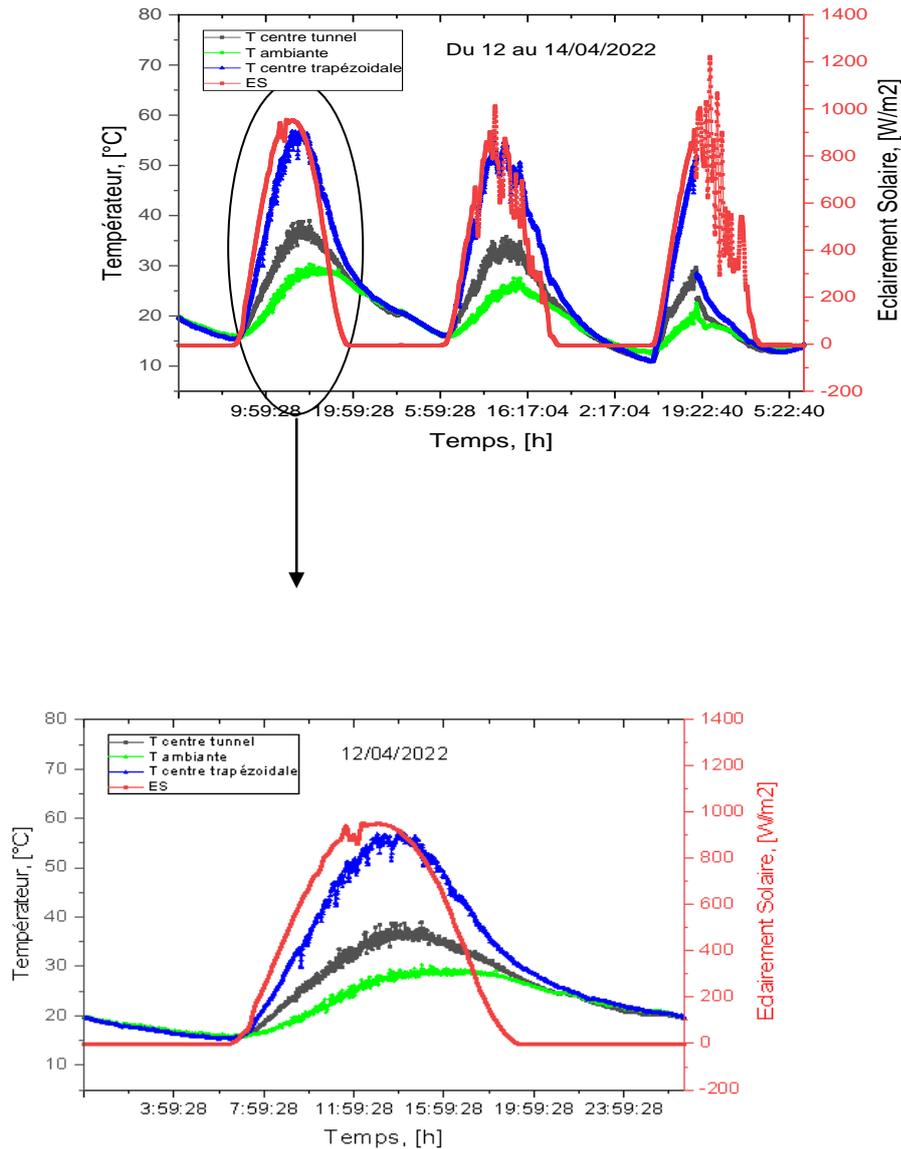


Figure IV.2 : Evolution des températures de prototype de séchoir solaire direct durant journées de séchage d'*Aloysia citrodora* (Louisa) du 12 au 14 avril 2022

IV.1.2. Cinétique de séchage

Louisa a été lavée et triée avant d'être placée dans les séchoirs solaires de type serre (tunnel), chicanne, MCP et air libre. Une quantité des échantillons de 228.85 g pour le séchoir Chicanne et de 222.23 g pour le séchoir de MCP et une quantité de 224.35 g pour le séchoir de type serre et de 214.7 g a été prélevée pour le séchage à air libre. (Figure IV.3) montre les caractéristiques de séchage de *Louisa* en termes de teneur en eau.

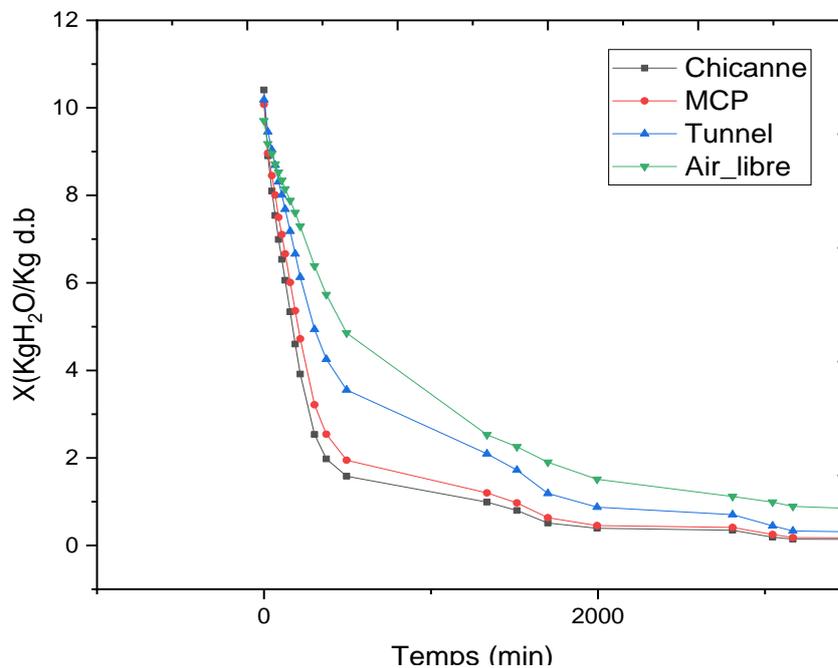


Figure IV.3. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour *Louisa*

En observant la courbe de teneur en eau, on distingue deux périodes de séchage. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et un deuxième où cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage.

Dans les séchoirs en Chicanne, MCP et tunnel, la perte en eau contenue dans *Louisa* a été très rapide (chute de poids), en atteignant un temps de 500 min, et une phase de ralentissement jusqu'à la fin du séchage.

IV.1.3. Modélisation empiriques du processus de séchage en couche mince

Les résultats de l'analyse de régression sont donnés dans le **tableau IV.1** pour le séchage à l'air libre, dans le séchoir solaire avec chicanne, MCP et type serre (tunnel). Le modèle le plus adapté a été évalué en fonction du coefficient de corrélation (R^2), du chi-carré réduit (X^2) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le modèle ayant la valeur la plus élevée de R^2 et les valeurs inférieures de X^2 et RMSE à été sélectionné comme le meilleur modèle pour représenter le processus de séchage de *Louisa* dans ce prototype. Les deux modèles **Diffusion Approximation** et **Verma** à donne le meilleur accord entre le taux d'humidité expérimental et prévu, car il correspond le mieux aux données expérimentales en premier. Le modèle de **Diffusion Approximation** plus approprié pour le séchage de Louisa dans les trois types de séchoirs(**Figure IV.4 et tableau IV.1**).

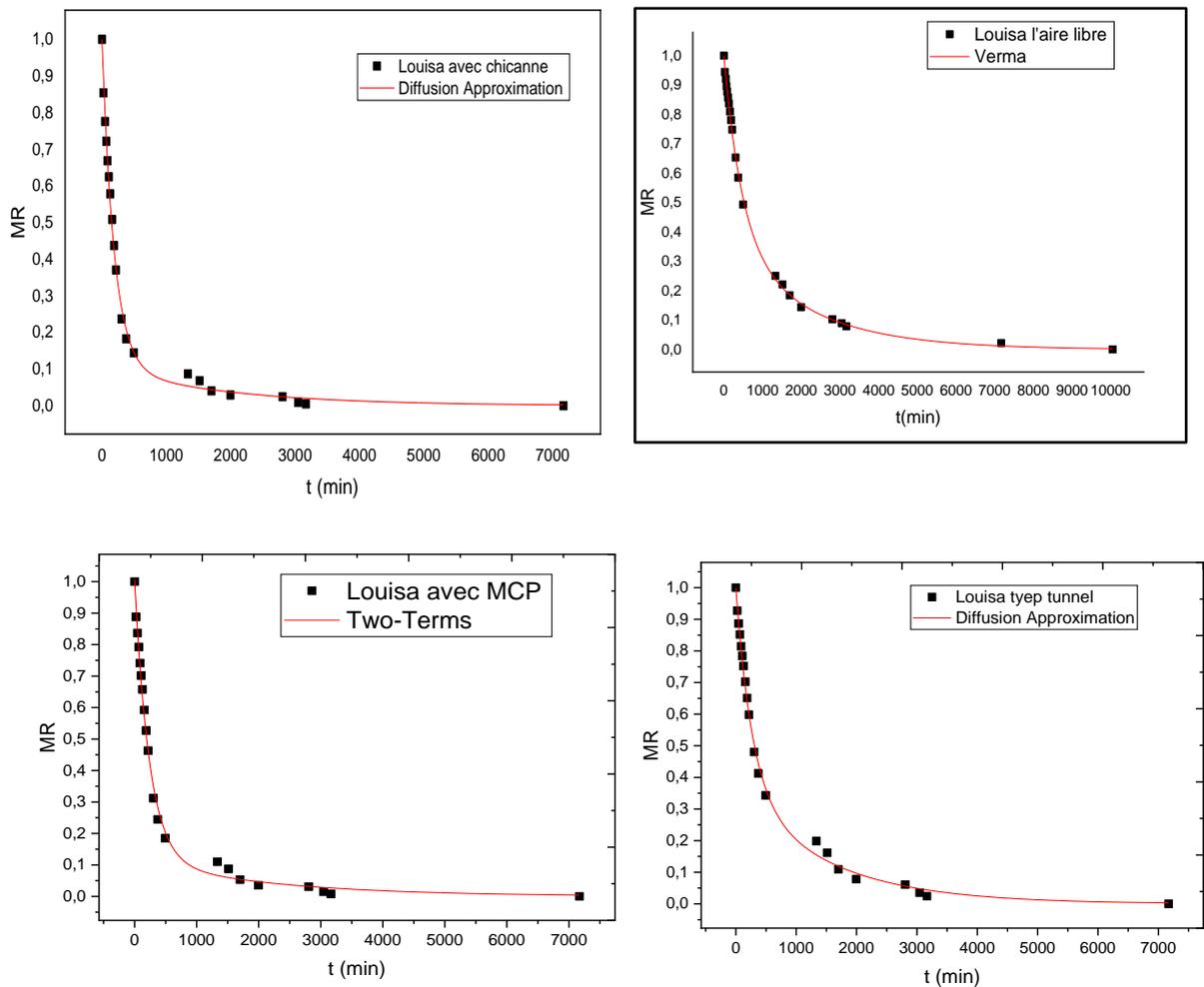


Figure IV.4. Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différentes produits

Tableau IV.1. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour *Louisa*.

système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMS E	X ²	
			K1	K2	N	A	B				C
Avec chicanne	1	Newton	0,0045						0,990	0,0323	0,00104
	2	Page	0,0071		0,91171				0,991	0,0311	9,648E-4
	3	Henderson and Pabis	0,00431			0,97191			0,991	0,0316	9,959E-4
	4	Modied Page	0,00439		0,90975				0,991	0,0311	9,647E-4
	5	Logarithmic	0,00462			0,94677		0,0318	0,995	0,0243	5,896E-4
	6	Midilli-Kucuk	0,00587		0,94533	0,98654	4,920E-6		0,992	0,0308	9,465E-4
	7	Diffusion Approximation	0,00535			0,89279	0,0980		0,996	0,0207	4,289E-4
	8	Verma et al	0,00417	0,99183		0,95282			0,991	0,0313	9,773E-4
	9	Two-Terms	0,00516	4,860E-4		0,88858	0,0980		0,997	0,0208	4,320E-4
	10	Two-TermsExponential	0,00704			0,44287			0,991	0,0311	9,693E-4
Avec MCP	1	Newton	0,0035						0,989	0,0361	0,0013
	2	Page	0,00402		0,97358				0,989	0,0368	0,00136
	3	Henderson and Pabis	0,00346			0,9921			0,989	0,0369	0,00136
	4	Modied Page	0,00345		0,96739				0,989	0,0368	0,00136
	5	Logarithmic	0,00375			0,96141		0,0381	0,994	0,0283	8,024E-4
	6	Midilli-Kucuk	0,00345		1,00148	0,99306	6,234E-6		0,990	0,0363	0,00132
	7	Diffusion Approximation	0,0035			1	1		0,989	0,0380	0,00144
	8	Verma et al	0,00343	4378,4		0,98752			0,989	0,0378	0,00143
	9	Two-Terms	0,00422	4,701E-4		0,88786	0,11873		0,997	0,0246	6,068E-4
	10	Two-TermsExponential	0,00517			0,46524			0,990	0,0352	0,00124

La suite de tableau IV.1.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMSE	X ²	
			K1	K2	n	A	B				C
Tunnel	1	Newton	0,0022						0,9767	0,0535	0,0029
	2	Page	0,0080		0,7632				0,9910	0,0341	0,0011
	3	Henderson and Pabis	0,0019			0,9558			0,9791	0,0520	0,0027
	4	Modied Page	0,0018		0,7596				0,9910	0,0340	0,0012
	5	Logarithmic	0,0024			0,9173		0,0681	0,990	0,0369	0,0014
	6	Midilli-Kucuk	0,0103		0,7329	1,0351	2,65E-6		0,9922	0,0336	0,0011
	7	Diffusion Approximation	6,703E-4			0,3679	5,5660		0,9970	0,0201	4,06E-4
	8	Verma et al	0,0018	6566,12		0,9353			0,9803	0,0519	0,0027
	9	Two-Terms	0,0039	6,830E-4		0,6298	0,3790		0,9971	0,0204	4,20E-4
	10	Two-Terms Exponential	0,00553			0,2593			0,9886	0,0384	0,0015
L'air libre	1	Newton	0,0012						0,9868	0,0418	0,0018
	2	Page			0,8222	0,0037			0,9973	0,0193	3,722E-4
	3	Henderson and Pabis	0,0010			0,9520			0,9915	0,0343	0,0011
	4	Modied Page	0,0011		0,81995				0,9973	0,0193	3,719E-4
	5	Logarithmic	0,0013			0,9148		0,0556	0,9952	0,0264	6,954E-4
	6	Midilli-Kucuk	0,0043		0,8043	1,0150	1,600E-6		0,9977	0,0189	3,575E-4
	7	Diffusion Approximation	0,0022			0,6143	0,2245		0,9990	0,0119	1,422E-4
	8	Verma et al	4,816E-4	0,0022			0,3857		0,9990	0,0119	1,422E-4
	9	Two-Terms	0,0010	4,2460		0,9426	0,0574		0,9925	0,0339	0,0012
	10	Two-Terms Exponential	0,0037			0,2312			0,9972	0,0199	0,0079

IV.1.4. Détermination de la diffusivité effective de l'eau de *Louisa* :

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

volumique de l'échantillon est négligeable. La diffusivité effective de l'eau est déterminée au moyen de la solution analytique de la deuxième loi de Fick développée par Crank (1975) dans le cas d'une plaque infinie. La linéarisation du premier terme de l'équation (Eq III.8) permet la détermination de la diffusivité effective au moyen des droites qui représentent $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage (t). D'après l'équation (Eq III.8), la pente des droites présentées dans les figures IV.5 A, B, C et D est, avec L la demi-épaisseur des échantillons de Louisa.

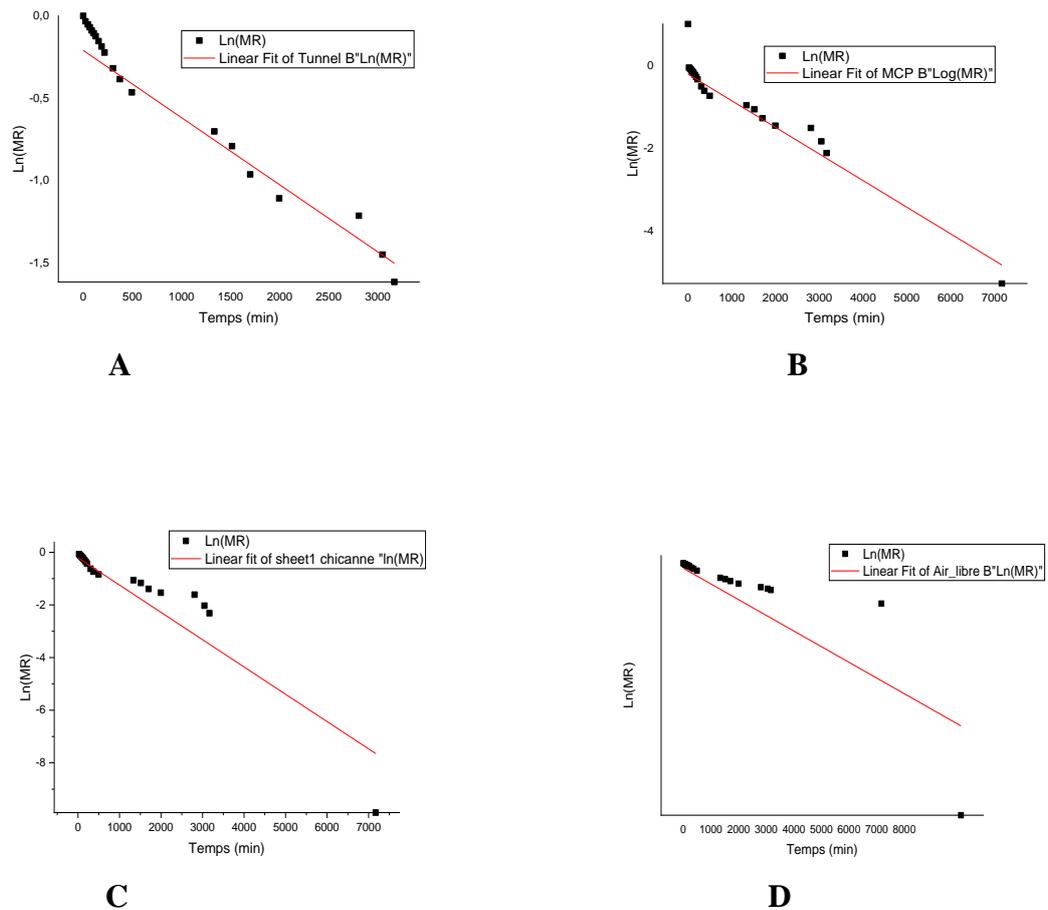


Figure IV.5. Variation de $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage des échantillons de Louisa

Tableau IV.2. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la Louisa en couche mince

	Slope (k)	Diffusivité	R²	RMSE	X²
Chicanne	-0,00104	1.053E-10	0,8858	0,82751	0,68477
MCP	-6,41976E-4	0.650E-10	0,95026	0,33827	0,11443
Tunnel	-4,08156E-4	0.414E-10	0,97172	0,12249	0,015
L'airlibre	-6,4463E-4	0.653E-10	0,74875	1,1763	1,38368

IV.2. Cas 2 : séchage *P.scoparius* (Guezzah) le 11 mai 2022:

IV.2.1. Comportements thermique :

A. prototype de séchoir solaire direct

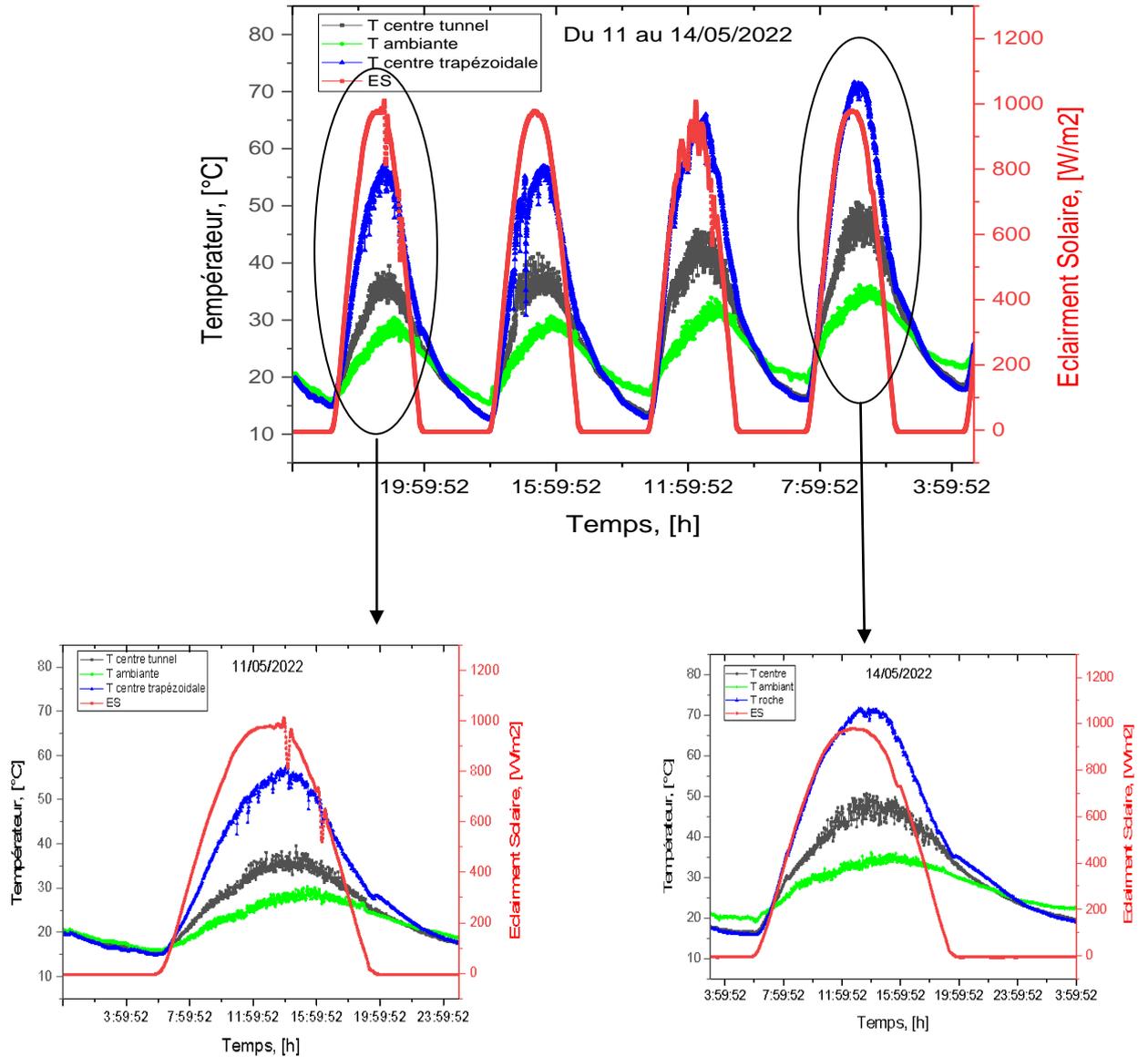


Figure IV.6. Evolution des températures de prototype de séchoir solaire direct durant journées de séchage *P.scoparius* (Guezzah) du 11 au 14 mai 2022

B. prototype de séchoir solaire indirect

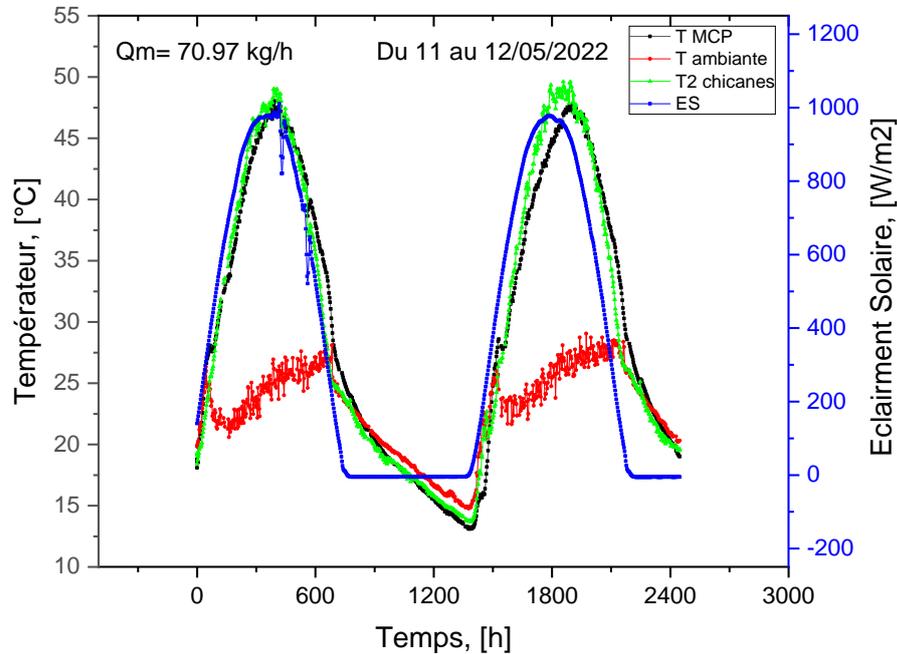


Figure IV.7. Evolution des températures de prototype de séchoir solaire indirect durant journées de séchage *P.scoparius* (Guezzah) du 11 au 12 mai 2022

IV.2.2. Cinétique de séchage

P.scoparius à été trier avant d'être place dans les séchoirs solaires de type serre (trapézoïdal), chicanne, MCP et air libre. Une quantité des échantillons de 208.26 g pour le séchoir Chicanne et de 212.03 g pour le séchoir de MCP et une quantité de 194.96 g pour le séchoir de type serre et de 183.88 g à été prélevé pour le séchage à air libre. **La figure IV.8** montre les caractéristiques de séchage de *P.scoparius* en termes de teneur en eau.

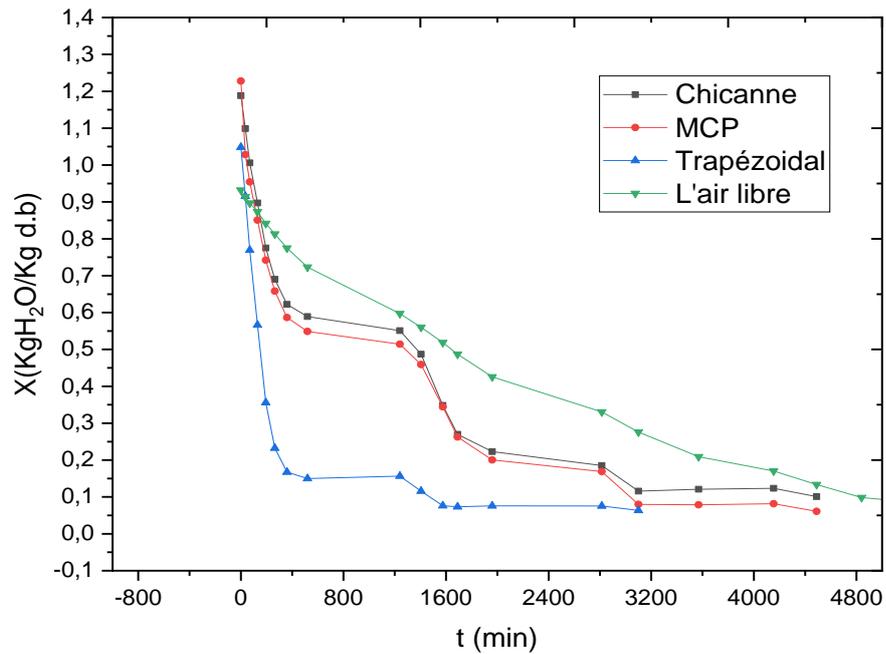


Figure IV.8. Variation de la teneur en eau en fonction du temps pour *P.scoparius*

En observant la courbe de teneur en eau, on distingue deux périodes de séchage. La première dans laquelle la teneur en eau diminue rapidement, et un deuxième où cette diminution devient plus lente jusqu'à la fin de séchage.

On remarque dans le séchoir en type serre (trapézoïdal) la perte en eau contenue dans Guezzah a été très rapide (chute de poids) par rapport aux autres séchoirs.

IV.2.3. Modélisation empiriques du processus de séchage en couche mince

Les résultats de l'analyse de régression sont donnés dans le **tableau IV.1** pour le séchage à l'air libre, dans le séchoir solaire avec chicanne, MCP et type serre (trapézoïdal),

Le modèle **Two-Terms** plus approprié pour le séchage de Guezah dans les tous types de séchoirs. (**Figure IV.9** et **tableau IV.3**).

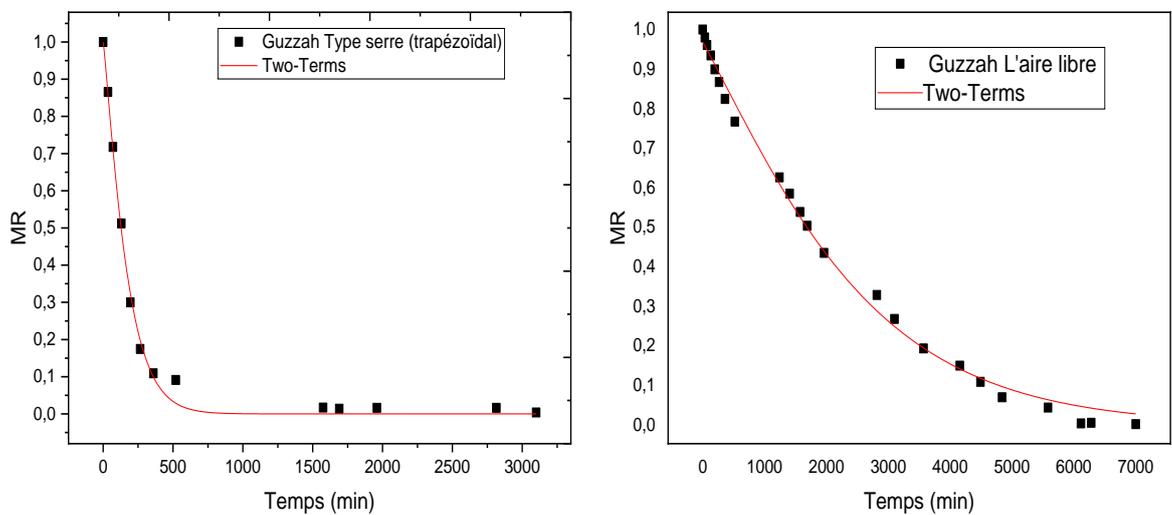


Figure IV.9. Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits

Tableau IV.3. Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour *Guezzah*.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMS E	X ²	
			K1	K2	N	A	B				C
Avec chicanne	1	Newton	0,0012						0,8924	0,1081	0,0117
	2	Page	0,0143		0,637				0,9645	0,0640	0,0041
	3	Henderson and Pabis	9,084E-4			0,8543			0,9363	0,0857	0,0074
	4	Modied Page	0,0013		0,6386				0,9645	0,0640	0,0041
	5	Logarithmic	0,0010			0,8359		0,0274	0,9371	0,0880	0,0078
	6	Midilli-Kucuk	0,0261		0,5347	1,0258	-2,45E-5		0,9706	0,0623	0,0039
	7	Diffusion Approximation	0,0012			11554	1		0,8924	0,1151	0,0133
	8	Verma et al	8,394E-4	4,47		0,8106			0,9513	0,0774	0,006
	9	Two-Terms	0,0092	6,659E-4		0,3643	0,6550		0,9757	0,0567	0,0032
	10	Two-TermsExponential	0,0056			0,0849			0,9375	0,0849	0,0072
Avec MCP	1	Newton	0,0014						0,8347	0,1260	0,0159
	2	Page	0,0254		0,5629				0,9645	0,0602	0,0037
	3	Henderson and Pabis	8,829E-4			0,7994			0,9245	0,0878	0,0078
	4	Modied Page	0,0015		0,5628				0,9645	0,0602	0,0037
	5	Logarithmic	9,683E-4			0,7839		0,0229	0,9251	0,0902	0,0082
	6	Midilli-Kucuk	0,0476		0,4471	1,0116	-3,38E-5		0,9759	0,0530	0,0028
	7	Diffusion Approximation	7,893E-4			0,7411	6000		0,9565	0,0688	0,0047
	8	Verma et al	7,893E-4	4,47		0,7411			0,9565	0,0688	0,0047
	9	Two-Terms	0,0118	6,485E-4		0,3727	0,6204		0,9769	0,0520	0,0377
	10	Two-TermsExponential	0,0061			0,1807			0,8982	0,1019	0,0104

La suite de tableau IV.3.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles					R ²	RMSE	X ²	
			K1	K2	n	A	B				C
type serre (trapézoïdal)	1	Newton	0,0012						0,8924	0,1081	0,0117
	2	Page	0,0143		0,637				0,9645	0,0640	0,0041
	3	Henderson and Pabis	9,08E-4			0,8543			0,9363	0,0857	0,0074
	4	Modied Page	0,0013		0,6387				0,9645	0,0640	0,0041
	5	Logarithmic	0,0010			0,8359		0,0274	0,9371	0,0880	0,0075
	6	Midilli-Kucuk	0,0261		0,5347	1,0258	-2,45E-5		0,9706	0,0623	0,0039
	7	Diffusion Approximation	0,0012			11554	1		0,8924	0,1151	0,0132
	8	Verma et al	8,39E-4	4,47		0,8106			0,9513	0,0774	0,0060
	9	Two-Terms	0,0092	6,66E-4		0,3643	0,6550		0,9757	0,0566	0,0032
	10	Two-Terms Exponential	0,0056			0,0849			0,9375	0,0849	0,0072
L'air libre	1	Newton	0,0014						0,8347	0,1260	0,0159
	2	Page	0,0254		0,5628				0,9645	0,0602	0,0036
	3	Henderson and Pabis	8,83E-4			0,7994			0,9245	0,0878	0,0077
	4	Modied Page	0,0015		0,5628				0,9645	0,0602	0,0036
	5	Logarithmic	9,68E-4			0,7838		0,0229	0,9251	0,0903	0,0082
	6	Midilli-Kucuk	0,0475		0,4471	1,0116	-3,38E-5		0,9759	0,0530	0,0028
	7	Diffusion Approximation	7,89E-4			0,7411	6000		0,9565	0,0688	0,0047
	8	Verma et al	7,89306E-4	4,47		0,7411			0,9565	0,0688	0,0047
	9	Two-Terms	0,0118	6,49E-4		0,3727	0,6204		0,9769	0,0519	0,0377
	10	Two-Terms Exponential	0,0060			0,1807			0,8982	0,1019	0,0104

IV.2.4. Détermination de la diffusivité effective de l'eau de *Guezzah* :

La pente des droites présentées dans les figures IV.10.

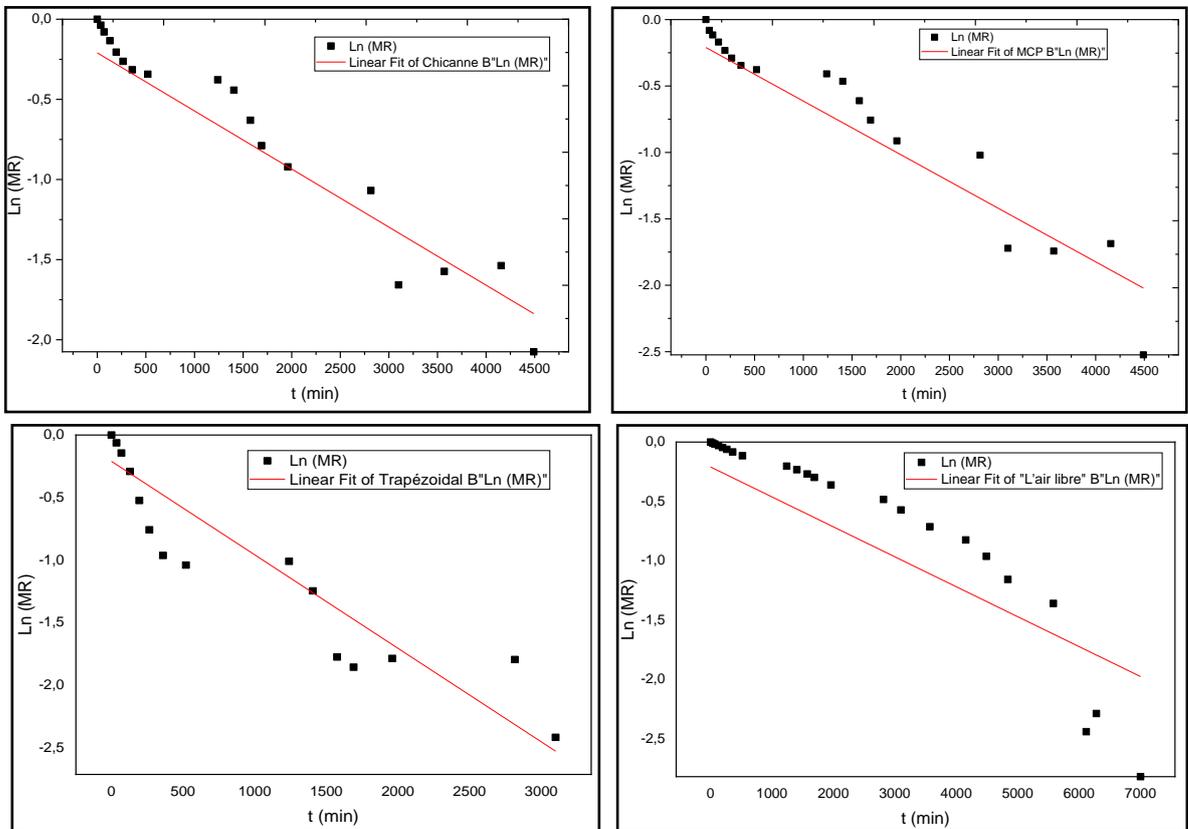


Figure IV.10. Variation de $\text{Ln}(MR)$ en fonction du temps de séchage des échantillons de *Guezzah*.

Généralement, une diffusivité effective est utilisée en raison d'informations limitées sur le mécanisme du mouvement de l'humidité pendant le séchage vu la complexité du processus. Les résultats sont présentés dans le tableaux IV.4 Pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives (D_{eff}) lors du séchage des échantillons de Guezzah.

Tableau IV.4. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de la *P.scoparius* en couche mince

	Slope (k)	Diffusivité	R²	RMSE	X²
Chicanne	-3,62384E-4	0.367E-10	0,96583	0,17705	0,03135
MCP	-4,03423E-4	0.409E-10	0,95554	0,22213	0,04934
Trapézoïdal	-7,4761E-4	0.757E-10	0,9477	0,30182	0,09109
L'air libre	-2,52356E-4	0.256E-10	0,86815	0,39038	0,1524

IV.2.5. Les huiles essentielles de *P.scoparius*.

Après l'extraction et la décantation, on obtient une quantité d'HE de quatre expériences, résumées dans le tableau au-dessous.

Tableau IV.5. Quantités d'HE obtenues de *P. scoparius*.

Type de séchoir	La masse de plante	La massed'HE après l'extraction
Avec chicanne	81.0533 g	0.5676 g
Trapézoïdal	93.7954 g	0.5978 g
L'air libre	110.4045 g	0.3841 g
Plante fraîche	152.96g	0.7444g

IV.2.5.1. Calcul de rendement:

On pèse l'HE obtenue afin de calculer le rendement de l'extraction par rapport à la masse de la matière végétale fraîche selon la loi suivante :

$$\% \text{ huiles} = \frac{\text{Le poids d'huiles à obtenu après l'extraction}}{\text{Poids de matière végétal}} \times 100$$

Le poids de la matière végétal fraîche 152.96 g, et le poids d'huiles essentielles après l'extraction 0.7444 g.

Exemple de calcul de rendement:

$$\% \text{ huiles} = \frac{0.7444}{152.96} \times 100 = 0.4867\%$$

Les résultats des calculs classés dans un tableau comme suit:

Tableau IV.6. Rendements d'HE obtenues de *P. scoparius*.

Type de séchoir	Le rendement (%)
Avec chicanne	0.7163
Type trapézoïdal	0.6374
L'air libre	0.3479
Plante fraîche	0.4867

IV.2.5.2. Propriétés organoleptiques:

A l'issue des distillations, les propriétés organoleptiques des HE obtenue à été classées au tableau suivant:

Tableau IV.7. Propriétés organoleptiques des HE obtenues de *P. scoparius*.

Les propriétés organoleptiques d'HE de <i>P. scoparius</i>	Avec chicanne	Trapézoïdal	L'air libre	Plante fraîche
Aspect	Liquide	Liquide	Liquide	Liquide
Couleur	Jaune ambré	Jaune ambré	Jaune ambré	Jaune ambré
Odeur	Agréable	Agréable	Agréable	Agréable

Les caractéristiques organoleptiques pour chaque plante sont les mêmes dans tous les type des séchoirs.

IV.2.5.3. L'indice de réfraction :

Pour calculer l'indice de réfraction on utilise la formule suivant:

$$nd = nT + 0.0045 (T - 20 \text{ } ^\circ\text{c})$$

Tous les résultats de mesure obtenus soit par l'appareil ou bien par les calculs sont classés dans les tableaux suivants:

Tableau IV.8. Réfraction d'HE obtenues de *P. scoparius*.

Type de séchoir	L'indice de réfraction
Avec chicanne	1.489
Trapézoïdal	1.485
L'air libre	1.491
Plante fraîche	1.480

Conclusion générale et perspectives

Trois méthodes de séchage solaire (séchoir solaire direct de type serre, séchoir solaire indirect et séchage solaire à air libre) ont été étudiés comme technique de conservation pour le séchage des herbes aromatiques dans les conditions climatiques semi-aride. Deux plantes ont été étudiées à savoir l'Aloysiacitrodora (Louisa) et l'Pituranthosscoparius (Guezzah) de la région de Ghardaïa ont été étudiées. Le séchoir solaire direct de type serre a atteint une température de l'air de séchage plus élevée de 65 °C, tandis que le séchoir solaire indirect a atteint 50 °C. De même, le séchoir solaire direct a montré un taux de séchage plus élevé de 200 min, contre 300 min comme déterminé pour le séchoir solaire indirect. Sur les deux conceptions, le séchoir solaire indirect semble être le plus adapté et fournit des résultats plus proches du séchage au séchoir industriel et/ou de l'herbe fraîche. On pourrait conclure aussi que les procédés de séchage solaire direct et indirect sont comparable au séchage naturel à l'air libre (au soleil) en ce qui concerne le pourcentage de perte d'eau du matériel végétal, cependant les procédés de séchage solaire est supposé être plus rapide que le séchage naturel à l'air libre. Les plantes séchées par ces procédés maintenaient leur teneur en huile essentielle aussi élevée que possible. Du point de vue qualitatif, les procédés de séchage solaire fournissent également une atmosphère isolée qui minimise la contamination du matériel végétal. De plus, ces procédés était comparable ou même meilleure que le séchage naturel à l'air libre en ce qui concerne la teneur en huiles essentielles des herbes séchées (Aloysiacitrodora (Louisa) et Pituranthosscoparius (Guezzah)). D'après les résultats précédents, il a été constaté que le procédé de séchoir solaire de type indirect est plus adapté au séchage des plantes étudiées. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de Master ne traite qu'une première étape dans l'étude des procédés de séchage solaire des plantes médicinales et aromatiques. D'autres travaux de recherche expérimentaux méritent donc d'être réalisés au futur dans le but d'améliorer les performances des procédés de séchage solaire et de contrôler les conditions opératoires de séchage solaire quelles que soient les conditions météorologiques, qui ont des effets sur l'élévation de la température de séchage. Enfin, une étude fine de qualité du produit fini s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation des prototypes de séchage solaire direct de type serre et indirect et de nous permet de mieux comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent au cours du séchage.

Références

- [1] Heeger, E.F., 1989. Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaues. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt.
- [2] Qaas, F. and Schiele, E., 2001. Einfluss der Energiekosten auf die Rentabilität im Trocknungsbetrieb. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen*, 6 (3), 144-145
- [3] M. C. Díaz-Maroto, M. S. Pérez-Coello, and M. D. Cabezudo, "Effect of Drying Method on the Volatiles in Bay Leaf (*Laurus nobilis* L.)," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 50, no. 16. American Chemical Society (ACS), pp. 4520–4524, Jul. 01, 2002. doi: 10.1021/jf011573d.
- [4] M. Shaw, V. Meda, L. Tabil Jr., and A. Opoku Jr., "Drying and Color Characteristics of Coriander Foliage Using Convective Thin-Layer and Microwave Drying," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 41, no. 2. Informa UK Limited, pp. 56–65, Jan. 2006. doi: 10.1080/08327823.2006.11688559.
- [5] I. Ceylan and A. E. Gürel, "Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for *mint leaves*," *Applied Thermal Engineering*, vol. 106. Elsevier BV, pp. 899–905, Aug. 2016. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.077.
- [6] D. Arslan and M. M. Özcan, "Evaluation of Drying Methods with Respect to Drying Kinetics, Mineral Content, and Color Characteristics of *Savory Leaves*," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 5, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, pp. 983–991, Jan. 21, 2011. doi: 10.1007/s11947-010-0498-y.
- [7] S. K. Giri and S. Prasad, "Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms," *Journal of Food Engineering*, vol. 78, no. 2. Elsevier BV, pp. 512–521, Jan. 2007. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.10.021.
- [8] J. M. Łechtańska, J. Szadzińska, and S. J. Kowalski, "Microwave- and infrared-assisted convective drying of *green pepper*: Quality and energy considerations," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 98. Elsevier BV, pp. 155–164, Dec. 2015. doi: 10.1016/j.cep.2015.10.001.
- [9] 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. doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.022
- [10] S. Tarhan, İ. Telci, M. Taner Tuncay, and H. Polatci, "*Peppermint* Drying Performance of Contact Dryer in Terms of Product Quality, Energy Consumption, and Drying Duration," *Drying Technology*, vol. 29, no. 6. Informa UK Limited, pp. 642–651, Apr. 29, 2011. doi: 10.1080/07373937.2010.520421.
- [11] A. Orphanides, V. Goulas, and V. Gekas, "Drying Technologies: Vehicle to High-Quality Herbs," *Food Engineering Reviews*, vol. 8, no. 2. Springer Science and Business Media LLC, pp. 164–180, Jun. 13, 2015. doi: 10.1007/s12393-015-9128-9.
- [12] 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. doi: 10.1007/s12393-011-9044-6.

- [13] 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. doi: 10.1002/ffj.1340.
- [14] A. R. Mohamed Hanaa, Y. I. Sallam, A. S. El-Leithy, and S. E. Aly, "*Lemongrass (Cymbopogon citratus)* essential oil as affected by drying methods," *Annals of Agricultural Sciences*, vol. 57, no. 2. Elsevier BV, pp. 113–116, Dec. 2012. doi: 10.1016/j.aoas.2012.08.004.
- [15] M. B. Hassanpouraghdam, A. Hassani, L. Vojodi, and N. Farsad-Akhtar, "Drying Method Affects Essential Oil Content and Composition of *Basil (Ocimum basilicum L.)*," *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, vol. 13, no. 6. Informa UK Limited, pp. 759–766, Jan. 2010. doi: 10.1080/0972060x.2010.10643892.
- [16] O. R. Alara, N. H. Abdurahman, S. K. Abdul Mudalip, and O. A. Olalere, "Mathematical modeling of thin layer drying using open sun and shade of *Vernonia amygdalina* leaves," *Agriculture and Natural Resources*, vol. 52, no. 1. Kasetsart University and Development Institute, pp. 53–58, Feb. 2018. doi: 10.1016/j.anres.2018.05.013.
- [17] 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. doi: 10.1016/j.jarmap.2015.06.001.
- [18] A. Ghasemi Pirbalouti, E. Mahdad, and L. Craker, "Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two *basil landraces*," *Food Chemistry*, vol. 141, no. 3. Elsevier BV, pp. 2440–2449, Dec. 2013. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.05.098.
- [19] 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. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.015.
- [20] 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. doi: 10.1002/ffj.1340.
- [21] M. B. Hassanpouraghdam, A. Hassani, L. Vojodi, and N. Farsad-Akhtar, "Drying Method Affects Essential Oil Content and Composition of *Basil (Ocimum basilicum L.)*," *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, vol. 13, no. 6. Informa UK Limited, pp. 759–766, Jan. 2010. doi: 10.1080/0972060x.2010.10643892.
- [22] Khorshidi, J., R. Mohammadi, T. Fakhr, and H. Nourbakhsh. 2009. Influence of drying methods, extraction time, and organ type on essential oil content of *rosemary (Rosmarinus officinalis L.)*. *Natural Science* 7 (11):42–4.

- [23] Sz. Sárosi, L. Sipos, Z. Kókai, Zs. Pluhár, B. Szilvássy, and I. Novák, “Effect of different drying techniques on the aroma profile of *Thymus vulgaris* analyzed by GC–MS and sensory profile methods,” *Industrial Crops and Products*, vol. 46. Elsevier BV, pp. 210–216, Apr. 2013. doi: 10.1016/j.indcrop.2013.01.028.
- [24] Rababah, T. M., M. Al-U’datt, M. Alhamad, M. Al-Mahasneh, K. Ereifej, J. Andrade, B. Altarifi, A. Almajwal, and W. Yang. 2015. Effects of drying process on total phenolics, antioxidant activity and flavonoid contents of common *Mediterranean herbs*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8 (2):145–50.
- [25] S. Abdullah, A. R. Shaari, and A. Azimi, “Effect of Drying Methods on Metabolites Composition of *MisaiKucing (Orthosiphonstamineus)* Leaves,” *APCBEE Procedia*, vol. 2. Elsevier BV, pp. 178–182, 2012. doi: 10.1016/j.apcbee.2012.06.032.
- [26] 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. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.09.020.
- [27] M. Rahimmalek and S. A. H. Goli, “Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymysdaenensis* subsp. daenensis. Celak leaves,” *Industrial Crops and Products*, vol. 42. Elsevier BV, pp. 613–619, Mar. 2013. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.06.012.
- [28] D. K. Rabha, P. Muthukumar, and C. Somayaji, “Experimental investigation of thin layer drying kinetics of *ghost chilli pepper (Capsicum Chinense Jacq.)* dried in a forced convection solar tunnel dryer,” *Renewable Energy*, vol. 105. Elsevier BV, pp. 583–589, May 2017. doi: 10.1016/j.renene.2016.12.091.
- [29] M. M. Morad, M. A. El-Shazly, K. I. Wasfy, and H. A. M. El-Maghawry, “Thermal analysis and performance evaluation of a solar tunnel greenhouse dryer for drying *peppermint plants*,” *Renewable Energy*, vol. 101. Elsevier BV, pp. 992–1004, Feb. 2017. doi: 10.1016/j.renene.2016.09.042.
- [30] S. H. Gan et al., “Drying characteristics of *OrthosiphonstamineusBenth* by solar-assisted heat pump drying,” *Drying Technology*, vol. 35, no. 14. Informa UK Limited, pp. 1755–1764, Jul. 25, 2017. doi: 10.1080/07373937.2016.1275673.
- [31] 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. doi: 10.1080/07373937.2016.1271984.
- [32] A. A. El-Sebaili and S. M. Shalaby, “Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying *thymus* and *mint*,” *Energy Conversion and Management*, vol. 74. Elsevier BV, pp. 109–116, Oct. 2013. doi: 10.1016/j.enconman.2013.05.006.
- [33] S. Mghazli, M. Ouhammou, N. Hidar, L. Lahnine, A. Idlimam, and M. Mahrouz, “Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan *rosemary leaves*,” *Renewable Energy*, vol. 108. Elsevier BV, pp. 303–310, Aug. 2017. doi: 10.1016/j.renene.2017.02.022.

- [34] H. Mortezaipoor, B. Ghobadian, S. Minaei, and M. H. Khoshtaghaza, “Saffron Drying with a Heat Pump–Assisted Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Dryer,” *Drying Technology*, vol. 30, no. 6. Informa UK Limited, pp. 560–566, May 2012. doi: 10.1080/07373937.2011.645261.
- [35] S. H. Gan et al., “Drying characteristics of *OrthosiphonstamineusBenth* by solar-assisted heat pump drying,” *Drying Technology*, vol. 35, no. 14. Informa UK Limited, pp. 1755–1764, Jul. 25, 2017. doi: 10.1080/07373937.2016.1275673.
- [36] Sevik, S. 2014. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. *Solar Energy* 105:190–205.
- [37] B. M. A. Amer, K. Gottschalk, and M. A. Hossain, “Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of *chamomile*,” *Renewable Energy*, vol. 121. Elsevier BV, pp. 539–547, Jun. 2018. doi: 10.1016/j.renene.2018.01.055
- [38] Yahya, M., M. Othman, K. Sopian, W. Daud, and B. Yatim. 2004. Quality of *pegaga* leaf dried in a solar assisted dehumidification drying system. *Proceedings of the 14th IDS*, 1049–54.
- [39] L. Y. W. Chua, C. H. Chong, B. L. Chua, and A. Figiel, “Influence of Drying Methods on the Antibacterial, Antioxidant and Essential Oil Volatile Composition of Herbs: a Review,” *Food and Bioprocess Technology*, vol. 12, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, pp. 450–476, Jan. 03, 2019. doi: 10.1007/s11947-018-2227-x.
- [40] C. W. Fennell et al., “Assessing African medicinal plants for efficacy and safety: pharmacological screening and toxicology,” *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 94, no. 2–3. Elsevier BV, pp. 205–217, Oct. 2004. doi: 10.1016/j.jep.2004.05.012.
- [41] J. Müller, G. Reisinger, J. Kisgeci, E. Kotta, M. Tesic, and W. Mühlbauer, “Development of a greenhouse-type solar dryer for medicinal plants and herbs,” *Solar & Wind Technology*, vol. 6, no. 5. Elsevier BV, pp. 523–530, Jan. 1989. doi: 10.1016/0741-983x(89)90086-6.
- [42] Antal, T. 2010. Inspection of the technological characteristics influencing the quality of dried fruits and vegetables. PhD diss., University of Debrecen, Debrecen, Hungary.
- [43] Y.-C. Won, S. C. Min, and D.-U. Lee, “Accelerated Drying and Improved Color Properties of Red Pepper by Pretreatment of Pulsed Electric Fields,” *Drying Technology*, vol. 33, no. 8. Informa UK Limited, pp. 926–932, Dec. 31, 2014. doi: 10.1080/07373937.2014.999371.
- [44] V. C. T. Peters et al., “High-Throughput Flavor Analysis and Mapping of Flavor Alterations Induced by Different Genotypes of *Mentha* by Means of UHPLC-MS/MS,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 70, no. 18. American Chemical Society (ACS), pp. 5668–5679, Apr. 27, 2022. doi: 10.1021/acs.jafc.2c01689.
- [45] W. Jirapakkul, P. Tinchana, and S. Chaiseri, “Effect of drying temperature on key odourants in *kaffir lime* (*Citrus hystrix*D.C.,*Rutaceae*) leaves,” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 48, no. 1. Wiley, pp. 143–149, Sep. 11, 2012. doi: 10.1111/j.1365-2621.2012.03170.x.

- [46] Abaas, I., M. Hamzah, and A. Majeed. 2013. Analysis with evaluation of drying temperature on essential oil content of *achilleafrayrantissima* l. And *artemisia* herb-alba l. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences 5 (3):913–4.
- [47] 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. doi: 10.1016/s0308-8146(96)00242-7.
- [48] S. G. Deans, K. P. Svoboda, and M. C. Bartlett, “Effect of Microwave Oven and Warm-Air Drying on the Microflora and Volatile Oil Profile of *Culinary* Herbs,” Journal of Essential Oil Research, vol. 3, no. 5. Informa UK Limited, pp. 341–347, Sep. 1991. doi: 10.1080/10412905.1991.9697954.
- [49] F. Prothon, L. Ahrné, and I. Sjöholm, “Mechanisms and Prevention of Plant Tissue Collapse during Dehydration: A Critical Review,” Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 43, no. 4. Informa UK Limited, pp. 447–479, Jul. 2003. doi: 10.1080/10408690390826581.
- [50] A. H. Tambunan, Yudistira, Kisdiyani, and Hernani, “FREEZE DRYING CHARACTERISTICS OF MEDICINAL HERBS,” Drying Technology, vol. 19, no. 2. Informa UK Limited, pp. 325–331, Feb. 28, 2001. doi: 10.1081/drt-100102907.
- [51] Á. Calín-Sánchez, A. Figiel, K. Lech, A. Szumny, and Á. A. Carbonell-Barrachina, “Effects of Drying Methods on the Composition of *Thyme* (*Thymus vulgaris*L.) Essential Oil,” Drying Technology, vol. 31, no. 2. Informa UK Limited, pp. 224–235, Jan. 25, 2013. doi: 10.1080/07373937.2012.725686.
- [52] G. Thamkaew, I. Sjöholm, and F. G. Galindo, “A review of drying methods for improving the quality of dried herbs,” Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 61, no. 11. Informa UK Limited, pp. 1763–1786, May 19, 2020. doi: 10.1080/10408398.2020.1765309.
- [53] O. R. Alara, N. H. Abdurahman, and O. A. Olalere, “Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernoniaamygdalina* leaves,” Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, vol. 18, no. 3. Elsevier BV, pp. 309–315, Jul. 2019. doi: 10.1016/j.jssas.2017.09.003.
- [54] W. Yi and H. Y. Wetzstein, “Effects of Drying and Extraction Conditions on the Biochemical Activity of Selected Herbs,” HortScience, vol. 46, no. 1. American Society for Horticultural Science, pp. 70–73, Jan. 2011. doi: 10.21273/hortsci.46.1.70.
- [55] N. Harbourne, E. Marete, J. C. Jacquier, and D. O’Riordan, “Effect of drying methods on the phenolic constituents of *meadowsweet* (*Filipendulaulmaria*) and *willow* (*Salix alba*),” LWT - Food Science and Technology, vol. 42, no. 9. Elsevier BV, pp. 1468–1473, Nov. 2009. doi: 10.1016/j.lwt.2009.05.005.

- [56] R. Shahhoseini, H. Ghorbani, S. R. Karimi, A. Estaji, and M. Moghaddam, “Qualitative and Quantitative Changes in the Essential Oil of *Lemon Verbena (Lippiacitriodora)* as Affected by Drying Condition,” *Drying Technology*, vol. 31, no. 9. Informa UK Limited, pp. 1020–1028, Jul. 04, 2013. doi: 10.1080/07373937.2013.771649.
- [57] Piga, A., M. Usai, M. Marchetti, M. Foddai, A. Del Caro, P. Meier, V. Onorati, and F. Vinci. 2007. Influence of different drying parameters on the composition of volatile compounds of *thyme* and *rosemary cultivated* in sardinia. Paper presentat at the 3rd CIGR. Section VI International Symposium on Food and Agricultural Products: Processing and Innovations, in Naples, Italy.
- [58] Mahanom, H., A. Azizah, and M. Dzulkifly. 1999. Effect of different drying methods on concentrations of several phytochemicals in herbal preparation of 8 medicinal plants leaves. *Malaysian Journal of Science* 5:47–54.
- [59] T. Antal, A. Figiel, B. Kerekes, and L. Sikolya, “Effect of Drying Methods on the Quality of the Essential Oil of Spearmint *Leaves (MenthaspicataL.)*,” *Drying Technology*, vol. 29, no. 15. Informa UK Limited, pp. 1836–1844, Dec. 2011. doi: 10.1080/07373937.2011.606519.
- [60] L. F. Di Cesare, E. Forni, D. Viscardi, and R. C. Nani, “Changes in the Chemical Composition of *Basil* Caused by Different Drying Procedures,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 51, no. 12. American Chemical Society (ACS), pp. 3575–3581, May 06, 2003. doi: 10.1021/jf021080o.
- [61] D.-M. M., P.-C. M., and C. M., “Effect of different drying methods on the volatile components of *parsley (Petroselinumcrispum L.)*,” *European Food Research and Technology*, vol. 215, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, pp. 227–230, Sep. 01, 2002. doi: 10.1007/s00217-002-0529-7.
- [62] M. C. Díaz-Maroto, E. Sánchez Palomo, L. Castro, M. González Viñas, and M. S. Pérez-Coello, “Changes produced in the aroma compounds and structural integrity of *basil (OcimumbasilicumL)* during drying,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 84, no. 15. Wiley, pp. 2070–2076, Aug. 31, 2004. doi: 10.1002/jsfa.1921.
- [63] J. A. Moses, T. Norton, K. Alagusundaram, and B. K. Tiwari, “Novel Drying Techniques for the Food Industry,” *Food Engineering Reviews*, vol. 6, no. 3. Springer Science and Business Media LLC, pp. 43–55, May 23, 2014. doi: 10.1007/s12393-014-9078-7.
- [64] D. Wray and H. S. Ramaswamy, “Novel Concepts in Microwave Drying of Foods,” *Drying Technology*, vol. 33, no. 7. Informa UK Limited, pp. 769–783, Jan. 29, 2015. doi: 10.1080/07373937.2014.985793.
- [65] M. ZHANG et al., “Separation, Purification and Identification of Antioxidant Compositions in Black Rice,” *Agricultural Sciences in China*, vol. 5, no. 6. Elsevier BV, pp. 431–440, Jun. 2006. doi: 10.1016/s1671-2927(06)60073-4.
- [66] Kathirvel, K., K. R. Naik, Y. Garipey, V. Orsat, and G. Raghavan. 2006. Microwave drying-a promising alternative for the herb processing industry. In 2006 ASAE Annual Meeting, 1: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

- [67] Y. Soysal, “Microwave Drying Characteristics of Parsley,” *Biosystems Engineering*, vol. 89, no. 2. Elsevier BV, pp. 167–173, Oct. 2004. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.07.008.
- [68] A. N. Yousif, T. D. Durance, C. H. Scaman, and B. Girard, “Headspace Volatiles and Physical Characteristics of Vacuum-microwave, Air, and Freeze-dried *Oregano (LippiaberlandieriSchauer)*,” *Journal of Food Science*, vol. 65, no. 6. Wiley, pp. 926–930, Sep. 2000. doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb09394.x.
- [69] 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. doi: 10.1016/s0924-2244(01)00102-9.
- [70] W. Jin, A. S. Mujumdar, M. Zhang, and W. Shi, “Novel Drying Techniques for Spices and Herbs: a Review,” *Food Engineering Reviews*, vol. 10, no. 1. Springer Science and Business Media LLC, pp. 34–45, Jul. 15, 2017. doi: 10.1007/s12393-017-9165-7.
- [71] S. Schaarschmidt, “Public and private standards for dried culinary herbs and spices—Part I: Standards defining the physical and chemical product quality and safety,” *Food Control*, vol. 70. Elsevier BV, pp. 339–349, Dec. 2016. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.06.004.
- [72] L. J. RAO, M. SINGH, B. RAGHAVAN, and K. O. ABRAHAM, “*ROSEMARY (ROSMARINUS OFFICINALIS L.)*: IMPACT OF DRYING ON ITS FLAVOR QUALITY,” *Journal of Food Quality*, vol. 21, no. 2. Wiley, pp. 107–115, Apr. 1998. doi: 10.1111/j.1745-4557.1998.tb00508.x.
- [73] E. Werker, “Trichome diversity and development,” *Advances in Botanical Research*. Elsevier, pp. 1–35, 2000. doi: 10.1016/s0065-2296(00)31005-9.
- [74] P. Winterhalter and G. K. Skouroumounis, “Glycoconjugated aroma compounds: Occurrence, role and biotechnological transformation,” *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 73–105, 1997. doi: 10.1007/bfb0102063.
- [75] O. Baritau, H. Richard, J. Touche, and M. Derbesy, “Effects of drying and storage of herbs and spices on the essential oil. Part I. *Basil, ocimumbasilicum L.*,” *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 7, no. 5. Wiley, pp. 267–271, Oct. 1992. doi: 10.1002/ffj.2730070507.
- [76] K. Rayaguru and W. Routray, “Effect of drying conditions on drying kinetics and quality of aromatic *Pandanus amaryllifolius* leaves,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 47, no. 6. Springer Science and Business Media LLC, pp. 668–673, Nov. 24, 2010. doi: 10.1007/s13197-010-0114-1.
- [77] 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. doi: 10.5923/j.ijee.20120205.01.
- [78] E. C. López-Vidaña, L. L. Méndez-Lagunas, and J. Rodríguez-Ramírez, “Efficiency of a hybrid solar-gas dryer,” *Sol. Energy*, vol. 93, pp. 23–31, 2013.

- [79] 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. doi: 10.1016/j.rser.2008.08.015.
- [80] 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. doi: 10.1016/j.energy.2018.05.197.
- [81] 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. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.018.
- [82] V. Tomar, G. N. Tiwari, and B. Norton, “Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components,” *Solar Energy*, vol. 154. Elsevier BV, pp. 2–13, Sep. 2017. doi: 10.1016/j.solener.2017.05.066.
- [83] 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. doi: 10.1016/j.energy.2018.05.197.
- [84] 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. doi: 10.1016/j.tifs.2003.07.003.
- [85] M. Zarezade and A. Mostafaiepour, “Identifying the effective factors on implementing the solar dryers for Yazd province, Iran,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57. Elsevier BV, pp. 765–775, May 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.060.
- [86] Shubham and S. Nain, “Evolution and Advancements in Solar Drying Technologies: A Review,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Singapore, pp. 249–260, 2021. doi: 10.1007/978-981-16-1186-5_21.
- [87] O. Prakash, V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar, and A. Kumar, “Review on various modelling techniques for the solar dryers,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62. Elsevier BV, pp. 396–417, Sep. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.028.
- [88] S. Kapadiya and M. A. Desai, “Solar Drying of Natural and Food Products : A Review,” *Int. J. Agric. Food Sci. Technol.*, vol. 5, no. 6, p. 565, 2014.
- [89] P. C. Phadke, P. V. Walke, and V. M. Kriplani, “A review on indirect solar dryers,” *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, 2015.
- [90] A. G. M. B. Mustayen, S. Mekhilef, and R. Saidur, “Performance study of different solar dryers: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34. Elsevier BV, pp. 463–470, Jun. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.020.
- [91] A. Kouchakzadeh, “The hybrid drying of pistachios by solar energy and high electric field,” *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 18, no. 1, pp. 129–137, 2016.

- [92] A. Reyes, A. Mahn, and F. Vásquez, “Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material,” *Energy Conversion and Management*, vol. 83. Elsevier BV, pp. 241–248, Jul. 2014. doi: 10.1016/j.enconman.2014.03.077.
- [93] T. S. S. Bhaskara Rao and S. Murugan, “Solar drying of medicinal herbs: A review,” *Solar Energy*, vol. 223. Elsevier BV, pp. 415–436, Jul. 2021. doi: 10.1016/j.solener.2021.05.065.
- [94] L.-Z. Deng et al., “Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 59, no. 9. Informa UK Limited, pp. 1408–1432, Dec. 20, 2017. doi: 10.1080/10408398.2017.1409192.
- [95] Rooy, L., and G. 2012. Commercial imperatives. In *Handbook of food process design*, 2 volume set, ed. J. Ahmed and M. S. Rahman, 1436–70. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- [96] T. Rocha, A. Lebert, and C. Marty-Audouin, “Effect of Pretreatments and Drying Conditions on Drying Rate and Colour Retention of *Basil (Ocimum basilicum)*,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 26, no. 5. Elsevier BV, pp. 456–463, Oct. 1993. doi: 10.1006/fstl.1993.1090.
- [97] M. Sledz, A. Wiktor, K. Rybak, M. Nowacka, and D. Witrowa-Rajchert, “The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves,” *Applied Acoustics*, vol. 103. Elsevier BV, pp. 148–156, Feb. 2016. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.05.006.
- [98] B. RAGHAVAN, K. O. ABRAHAM, M. L. SHANKARANARAYANA, and W. D. KOLLER, “STUDIES ON FLAVOR CHANGES DURING DRYING OF *DILL (Anethum sowa Roxb.)* LEAVES,” *Journal of Food Quality*, vol. 17, no. 6. Wiley, pp. 457–466, Dec. 1994. doi: 10.1111/j.1745-4557.1994.tb00166.x.
- [99] J. Ahmed, U. S. Shivhare, and G. Singh, “Drying Characteristics and Product Quality of Coriander Leaves,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 79, no. 2. Elsevier BV, pp. 103–106, Jun. 2001. doi: 10.1205/096030801750286258.
- [100] Nani, R. C., L. F. Di Cesare, D. Viscardi, A. Brambilla, and G. Bertolo. 2001. Effect of blanching and drying methods on the quality of dried *basil (O. basilicum l.)* and *sage (Salvia officinalis l.)*. Proceedings of ICEF 8.
- [101] P. S. Negi and S. K. Roy, “Effect of Blanching and Drying Methods on β -Carotene, Ascorbic acid and Chlorophyll Retention of Leafy Vegetables,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 33, no. 4. Elsevier BV, pp. 295–298, Jun. 2000. doi: 10.1006/fstl.2000.0659.
- [102] M. Singh, B. Raghavan, and K. O. Abraham, “Processing of *marjoram (Majorana hortensis Moench.)* and *rosemary (Rosmarinus officinalis L.)*. Effect of blanching methods on quality,” *Food / Nahrung*, vol. 40, no. 5. Wiley, pp. 264–266, 1996. doi: 10.1002/food.19960400507.

- [103] V. Klungboonkrong, S. Phoungchandang, and B. Lamsal, “Drying of *Orthosiphonaristatus* leaves: Mathematical modeling, drying characteristics, and quality aspects,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 205, no. 9. Informa UK Limited, pp. 1239–1251, Jul. 03, 2018. doi: 10.1080/00986445.2018.1443080.
- [104] G. Oboh, “Effect of blanching on the antioxidant properties of some tropical green leafy vegetables,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 38, no. 5. Elsevier BV, pp. 513–517, Aug. 2005. doi: 10.1016/j.lwt.2004.07.007.
- [105] M. K. Khan, K. Ahmad, S. Hassan, M. Imran, N. Ahmad, and C. Xu, “Effect of novel technologies on polyphenols during food processing,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 45. Elsevier BV, pp. 361–381, Feb. 2018. doi: 10.1016/j.ifset.2017.12.006.
- [106] S. Kwao, S. Al-Hamimi, M. E. V. Damas, A. G. Rasmusson, and F. Gómez Galindo, “Effect of guard cells electroporation on drying kinetics and aroma compounds of Genovese *basil* (*Ocimum basilicum L.*) leaves,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 38. Elsevier BV, pp. 15–23, Dec. 2016. doi: 10.1016/j.ifset.2016.09.011.
- [107] H. Huang et al., “Matrine inhibits the progression of prostate cancer by promoting expression of GADD45B,” *The Prostate*, vol. 78, no. 5. Wiley, pp. 327–335, Jan. 21, 2018. doi: 10.1002/pros.23469.
- [108] R. Ostermeier, P. Giersemehl, C. Siemer, S. Töpfl, and H. Jäger, “Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions,” *Journal of Food Engineering*, vol. 237. Elsevier BV, pp. 110–117, Nov. 2018. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010.
- [109] O. Parniakov, O. Bals, N. Lebovka, and E. Vorobiev, “Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 35. Elsevier BV, pp. 52–57, Jun. 2016. doi: 10.1016/j.ifset.2016.04.002.
- [110] A. Telfser and F. Gómez Galindo, “Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried *basil* (*Ocimum basilicum L.*) leaves,” *LWT*, vol. 99. Elsevier BV, pp. 148–155, Jan. 2019. doi: 10.1016/j.lwt.2018.09.062.
- [111] B. K. Tiwari and T. J. Mason, “Ultrasound Processing of Fluid Foods,” *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods*. Elsevier, pp. 135–165, 2012. doi: 10.1016/b978-0-12-381470-8.00006-2.
- [112] De La Fuente-Blanco, S., E. Riera-Franco De Sarabia, V. M. AcostaAparicio, A. Blanco-Blanco, and J. A. Gallego-Juarez. 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics* 44:e523–7.
- [113] S. J. Kowalski and A. Rybicki, “Ultrasound in wet biological materials subjected to drying,” *Journal of Food Engineering*, vol. 212. Elsevier BV, pp. 271–282, Nov. 2017. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.05.032.
- [114] F. A. N. Fernandes and S. Rodrigues, “Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana,” *Journal of Food Engineering*, vol. 82, no. 2. Elsevier BV, pp. 261–267, Sep. 2007. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.02.032.

- [115] J. Gamboa-Santos, A. Montilla, J. A. Cárcel, M. Villamiel, and J. V. Garcia-Perez, “Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry,” *Journal of Food Engineering*, vol. 128. Elsevier BV, pp. 132–139, May 2014. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.12.021.
- [116] J. V. García-Pérez, J. A. Cárcel, J. Benedito, and A. Mulet, “Power Ultrasound Mass Transfer Enhancement in Food Drying,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 85, no. 3. Elsevier BV, pp. 247–254, Sep. 2007. doi: 10.1205/fbp07010.
- [117] J. V. Santacatalina, D. Fissore, J. A. Cárcel, A. Mulet, and J. V. García-Pérez, “Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound,” *Journal of Food Engineering*, vol. 151. Elsevier BV, pp. 7–15, Apr. 2015. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.11.013.
- [118] M. Dadan, K. Rybak, A. Wiktor, M. Nowacka, J. Zubernik, and D. Witrowa-Rajchert, “Selected chemical composition changes in microwave-convective dried parsley leaves affected by ultrasound and steaming pre-treatments – An optimization approach,” *Food Chemistry*, vol. 239. Elsevier BV, pp. 242–251, Jan. 2018. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.06.061.
- [119] F. Michelino, A. Zambon, M. T. Vizzotto, S. Cozzi, and S. Spilimbergo, “High power ultrasound combined with supercritical carbon dioxide for the drying and microbial inactivation of coriander,” *Journal of CO2 Utilization*, vol. 24. Elsevier BV, pp. 516–521, Mar. 2018. doi: 10.1016/j.jcou.2018.02.010.
- [120] J. Rodríguez, A. Mulet, and J. Bon, “Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity,” *Journal of Food Engineering*, vol. 127. Elsevier BV, pp. 93–102, Apr. 2014. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.12.002.
- [121] J. Chang, “Medicinal herbs: Drugs or dietary supplements?,” *Biochemical Pharmacology*, vol. 59, no. 3. Elsevier BV, pp. 211–219, Feb. 2000. doi: 10.1016/s0006-2952(99)00243-9.
- [122] T. S. C. Li, “The range of medicinal herbs and spices,” *Handbook of Herbs and Spices*. Elsevier, pp. 113–125, 2006. doi: 10.1533/9781845691717.2.113.
- [123] R. Piccaglia, M. Marotti, E. Giovanelli, S. G. Deans, and E. Eaglesham, “Antibacterial and antioxidant properties of Mediterranean aromatic plants,” *Industrial Crops and Products*, vol. 2, no. 1. Elsevier BV, pp. 47–50, Aug. 1993. doi: 10.1016/0926-6690(93)90010-7.
- [124] H. Collin, “Herbs, spices and cardiovascular disease,” *Handbook of Herbs and Spices*. Elsevier, pp. 126–137, 2006. doi: 10.1533/9781845691717.2.126.
- [125] A. Gurib-Fakim, “Medicinal plants: Traditions of yesterday and drugs of tomorrow,” *Molecular Aspects of Medicine*, vol. 27, no. 1. Elsevier BV, pp. 1–93, Feb. 2006. doi: 10.1016/j.mam.2005.07.008.
- [126] Windisch, W.; Rohrer, E.; Schedle, K. Phytogetic feed additives to young piglets and poultry: Mechanisms and application. In *Phytogenics in Animal Nutrition: Natural Concepts to Optimize Gut Health and Performance*; Steiner, T., Ed.; Nottingham University Press: Nottingham, UK, 2009; pp. 19–38.

- [127] A. Brenes and E. Roura, "Essential oils in poultry nutrition: Main effects and modes of action," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 158, no. 1–2. Elsevier BV, pp. 1–14, Jun. 2010. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2010.03.007.
- [128] V. H. Varel, "Livestock manure odor abatement with plant-derived oils and nitrogen conservation with urease inhibitors: A review¹," *Journal of Animal Science*, vol. 80, no. E-suppl_2. Oxford University Press (OUP), pp. E1–E7, Jan. 01, 2002. doi: 10.2527/animalsci2002.80e-suppl_2e1x.
- [129] A. Dobignard, C. Chatelain, 'Index synonymique de la flore d'Afrique du nord Dicotyledoneae: Acanthaceae – Asteraceae', éditions des conservatoires et jardins botaniques, Genève, 2011, 2, 111.
- [130] P. Quézel, S. Santa, 'Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales', Edition CNRS, Tome II, Paris, 1963, 1169.
- [131] P. Ozenda, 'Flore et végétation du Sahara', 3ème Edition CNRS, Paris, 1991, 662.
- [132] J. El Oualidi, H. Khamar, M. Fennane, M. Ibn Tattou, S. Chauvet, M. Sghir Taleb, 'Checklist des endémiques et spécimens types de la flore vasculaire de l'Afrique du Nord', Document de l'Institut Scientifique, 2012, 25.
- [133] V. Hammiche and K. Maiza, "Traditional medicine in Central Sahara: Pharmacopoeia of Tassili N'ajjer," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 105, no. 3. Elsevier BV, pp. 358–367, May 2006. doi: 10.1016/j.jep.2005.11.028.
- [134] A. Boudjelal et al., "Herbalists and wild medicinal plants in M'Sila (North Algeria): An ethnopharmacology survey," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 148, no. 2. Elsevier BV, pp. 395–402, Jul. 2013. doi: 10.1016/j.jep.2013.03.082.
- [135] E. Le Floch, 'Contribution à une étude ethnobotanique de la flore tunisienne', Imprimerie Officielle de la République Tunisienne, Tunisie, 1983, 402.
- [136] A.-C. Benchelah, H. Bouziane, and M. Maka, "Fleurs du Sahara, arbres et arbustes, voyage au cœur de leurs usages avec les Touaregs du Tassili," *Phytothérapie*, vol. 2, no. 6. Lavoisier, pp. 191–197, Nov. 2004. doi: 10.1007/s10298-004-0052-z.
- [137] L. Benmekhbi, A. Kabouche, Z. Kabouche, B. Ait-Kaki, R. Touzani, and C. Bruneau, "Five glycosylated flavonoids from the antibacterial butanolic extract of *Pituranthos scoparius*," *Chemistry of Natural Compounds*, vol. 44, no. 5. Springer Science and Business Media LLC, pp. 639–641, Sep. 2008. doi: 10.1007/s10600-008-9133-9.
- [138] H. Hamada, B. Mohammed, G. Massiot, C. Long, and C. Lavaud, "Alkylated Isocoumarins from *Pituranthos Scoparius*," *Natural Product Research*, vol. 18, no. 5. Informa UK Limited, pp. 409–413, Oct. 2004. doi: 10.1080/14786410310001639259.
- [139] M. Dahia, L. Siracusa, H. Laouer, and G. Ruberto, "Constituents of the Polar Extracts from Algerian *Pituranthos scoparius*," *Natural Product Communications*, vol. 4, no. 12. SAGE Publications, p. 1934578X0900401, Dec. 2009. doi: 10.1177/1934578x0900401216.

- [140] Cassel E, Vargas RMF. 2006. Experiments and modeling of the *Cymbopogonwinterianus* essential oil extraction by steam distillation. *J Mexican Chem Soc* 50:126–9.
- [141] P. Di Leo Lira et al., “Essential oil and by-products of distillation of *bay leaves* (*Laurus nobilis* L.) from Argentina,” *Industrial Crops and Products*, vol. 30, no. 2. Elsevier BV, pp. 259–264, Sep. 2009. doi: 10.1016/j.indcrop.2009.04.005.
- [142] S. Burt, “Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review,” *International Journal of Food Microbiology*, vol. 94, no. 3. Elsevier BV, pp. 223–253, Aug. 2004. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022.
- [143] P. Masango, “Cleaner production of essential oils by steam distillation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 8. Elsevier BV, pp. 833–839, Jun. 2005. doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.039.
- [144] T. Smaili, A. Zellagui, N. Gherraf, G. Flamini, and P. L. Cioni, “Essential oil content of the flowers of *Pituranthos scoparius* in Algeria,” *Medicinal Plants - International Journal of Phytomedicines and Related Industries*, vol. 3, no. 2. Diva Enterprises Private Limited, p. 177, 2011. doi: 10.5958/j.0975-4261.3.2.030.
- [145] T. Lograda, M. Ramdani, A. Kiram, P. Chalard, G. Figueredo, ‘Variation of essential oils composition of *Pituranthos scoparius* in Algeria’, *Global J. Res. Med. Plants & Indigen. Med.* 2013, 2, 1-9.
- [146] A. Chikhouné et al., “Antioxidant effect induced by the essential oil of *Pituranthos scoparius* in a formulation of a whey spread emulsion,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 41, no. 5. Wiley, p. e13163, Jan. 09, 2017. doi: 10.1111/jfpp.13163.
- [147] A. Ksouri, T. Dob, A. Belkebir, D. Dahmane, and A. Nouasri, “Volatile compounds and biological activities of aerial parts of <i>Pituranthos scoparius</i> (Coss and Dur) Schinz (*Apiaceae*) from Hoggar, southern Algeria,” *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, vol. 16, no. 1. African Journals Online (AJOL), p. 51, Feb. 02, 2017. doi: 10.4314/tjpr.v16i1.7.
- [148] M. A. Elechosa et al., “Essential oil chemotypes of *Aloysia citrodora* (*Verbenaceae*) in Northwestern Argentina,” *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 74. Elsevier BV, pp. 19–29, Oct. 2017. doi: 10.1016/j.bse.2017.07.003.
- [149] P. C. Santos-Gomes, M. Fernandes-Ferreira, and A. M. S. Vicente, “Composition of the Essential Oils from Flowers and Leaves of *Vervain* [*Aloysia triphylla* (L’Herit.) Britton] Grown in Portugal,” *Journal of Essential Oil Research*, vol. 17, no. 1. Informa UK Limited, pp. 73–78, Jan. 2005. doi: 10.1080/10412905.2005.9698835.
- [150] A. Gil, C. M. Van Baren, P. M. Di Leo Lira, and A. L. Bandoni, “Identification of the Genotype from the Content and Composition of the Essential Oil of *Lemon Verbena* (*Aloysia citriodora* Palau),” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 55, no. 21. American Chemical Society (ACS), pp. 8664–8669, Sep. 20, 2007. doi: 10.1021/jf0708387.

- [151] A. Amina, mémoire master 2021, UNIVERSITE LARBI TEBESSI-TEBESSA. Etude comparative des travaux réalisés sur la plante *pituranthos scoparius*.
- [152] M. C. Ndukwu, M. Simo-Tagne, and L. Bennamoun, “Solar drying research of medicinal and aromatic plants: An African experience with assessment of the economic and environmental impact.,” African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, vol. 13, no. 2. Informa UK Limited, pp. 247–260, Jul. 10, 2020. doi: 10.1080/20421338.2020.1776061.
- [153] A. Abdul Razak, M. A. S. M. Tarminzi, M. A. A. Azmi, Y. H. Ming, M. Akramin, and N. Mokhtar, “Recent advances in solar drying system: A Review,” International Journal of Engineering Technology and Sciences, vol. 8, no. 1. Universiti Malaysia Pahang Publishing, pp. 1–13, Aug. 26, 2021. doi: 10.15282/ijets.8.1.2021.1001.
- [154] <https://www.ecpm.org/maghreb-moratoire-condamnations-a-mort-2/>
- [155] <https://profilab24.com/en/laboratory/balances-scales/kern-abj-nm-analytical-balance>
- [156] <https://www.denios.co.uk/kern-precision-balance-pcb-up-to-3-5-kg-d-0-01-g-266422/266422>