



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Khaled Slimani & Fadi chams eddine Taouririt

Le : Mercredi 12 juin 2024

Etude du séchage solaire des quelques légumes

Jury :

Pr.	Moummi Abdelhafide	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Hamdi Omar	MAB	Université de Biskra	Rapporteur
M.	Zellouf Miloud	MCB	Université de Biskra	Examineur

شكر وامتنان:

بعد أن منّ الله علينا بإنجاز هذا العمل، فإننا نتوجه إليه سبحانه وتعالى أولاً وأخيراً بجميع ألوان الحمد والشكر على فضله وكرمه الذي غمرنا به فوفقنا إلى ما نحن فيه راجين منه أن ينفعنا بما علمنا ويعلمنا ما جهلنا ويجعله حجة لنا لا علينا ونسأله دوام نعمه وكرمه، وانطلاقاً من قوله صلى الله عليه وسلم: "من لا يشكر الناس لا يشكر الله"

نتقدم بالشكر والعرفان والامتنان إلى الأستاذ المشرف " **عمر حامدي** " على إشرافه على هذه المذكرة وعلى الجهد الكبير الذي بذله معنا، وعلى نصائحه القيمة التي مهدت لنا الطريق لإتمام هذه الدراسة، فله منا فائق التقدير والاحترام، كما نتوجه في هذا المقام بالشكر الخاص لأساتذتنا الذين رافقونا طيلة المشوار الدراسي ولم يبخلوا علينا في تقديم يد العون لنا.

وندين بالشكر أيضاً إلى كل موظفي القسم الهندسة الميكانيكية، الذين ساعدونا من خلال تقديم جميع التسهيلات ومختلف التوضيحات والمعلومات المقدمة من طرفهم لإنجاز هذا البحث. وفي الختام نشكر كل من ساعدنا وساهم في هذا العمل سواء من قريب أو بعيد حتى ولو بكلمة طيبة أو ابتسامة عطرة.

شكراً جزيلاً

اهداء

لوالدي الأعماء:

أهديكما هذا العمل بكل فخر وامتنان، فأنتما شعله تنير دربي وقلبي بالأمان،
شكراً لكما على الدعم والحب اللامتناهي، أدعو الله أن يحفظكما دوماً.

لأخواتي:

إلى المحبة التي لا تنضب ... والخير بلا حدود ... أنتما زهرات حياتي ... تمددنها بعبق
أبدي ... أنتما جوهرتي الثمينة وكنزي الغالي، حماكما الله

لعائلي:

أنتم أكثر من مجرد عائلة، أنتم الدعم والحب الذي لا ينضب.

لأحبائي:

شكراً لكم ... لكم مني حبي وامتناني.

إلى أساتذتي وأهل الفضل علي الذين غمروني بالحب والتقدير والنصيحة والتوجيه
والإرشاد.

إلى كل هؤلاء أهديتهم هذا العمل المتواضع؛ سائلاً الله العلي التقدير أن ينفعنا به
ويمدنا بتوفيقه.

خالد سليمان

إهداء

لم تكن الرحلة قصيرة، ولا ينبغي لها أن تكون، ولم يكن الحلم سهلاً، ولا الطريق مخوفاً بالتسهيلات، ولكنني وصلت وفعلتها أخيراً بفضل الله عز وجل أولاً وأخيراً، فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا النهايات
أهدي تخرجي وثمرة جهدي

إلى من أحمل اسمه بكل افتخار واعتزاز، الذي أفنى عمره من أجلنا ومن أجل إيصالنا نحو القمم وكان دافعاً لتحقيقنا النجاح والتفوق أبي الغالي.

إلى القلب الحنون وقرة العين الساهرة طوال هذه السنين والتي كانت معي في جميع حالاتي وضغوطاتي، إلى نبع الحنان وغاليتي أمي الحبيبة.

إلى إخوتي وأخواتي، سندي الذين كانوا خير الداعمين بكافة المحافل، وإلى كل فرد من أفراد عائلتي كل باسمه وصفته (أخوال، أعمام، خالات، عمات وكل أولادهم).

إلى منارة العلم والعلماء، إلى الصرح الشامخ، إلى الذين حملوا على أعناقهم أقدس رسالة في هذه الحياة ومن مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة أساتذتنا الأفاضل.

إلى كل زملائي وأصدقائي ومن ساندوني من قريب أو بعيد لإنجاح هذا العمل.

إلى من شاركتني هذا العمل وكانت عوناً لي في كل خطوة فيه من التحضير

إلى الإلقاء.

حفظكم الله ورعاكم وأطال في عمركم

فادي شمس الدين تاوريريت

Nomenclature

D :	diamètre du produit	(mm)
Deff :	diffusivités efficaces	
Ep :	épaisseur du produit	(mm)
M :	masse de produit	(g)
X :	teneur en humidité initiale	
Ms:	Masse sèche de produit	(g) ou (kg)
Xr:	taux humidité d'équilibre	(%, base humide)
Mh:	Masse humide de produit	(g) ou (kg)
Ha :	Humidité absolue de l'air	[kg v. kg as-1]
Hr:	humidité relative	(%)
P :	pression totale du mélange de gaz	[Pa]
Pv :	pression de vapeur	[Pa]
Pv :	pression de vapeur d'eau	[Pa]
Ps(t) :	pression de saturation à la même température	[Pa]
Pva :	pression de vapeur d'air	[Pa]
T :	température	(°C)
t :	temps de séchage	(s, min, h)
Ta :	température ambiante	(°C)
Te :	température entrée	(°C)
Ts :	température sortie	(°C)
Tch:	température de la chambre de séchage	(°C)
-dx/dt	vitesse de séchage	(Kg eau / kg)
V :	vitesse de l'air	
χ :	Humidité absolue d'un solide	(m/s)
χ h:	teneur en humidité sur une base humide	(kg/kg (<i>Md</i>))

Liste de figure

Chapitre I

Figure (I-1) Périodes du séchage.....	5
Figure (I-2) tomates séchage au soleil.....	10
Figure (I-3) Le séchage à l'air chaud.....	10
Figure (I-4) Sécheuse électrique	11
Figure (I-5) Schéma du lyophilisateur.	12
Figure (I-6) Principe de la déshydratation osmotique..	12
Figure (I-7) Un système de roues déshydratantes pour une application de séchage.....	13
Figure (I-8) Principe du séchage par micro-onde (UHF).....	13
Figure (I-9) Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect.....	14
Figure (I-10) Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct.	15
Figure (I-11) les séchoirs solaires mixtes.....	16
Figure (I-12) les séchoirs solaires hybrides.....	17

Chapiter II

Figure (II- 1) Tour de séchage solaire.....	23
Figure (II- 2) Aspects de la tomate avant et après séchage	23
Figure (II- 3) Variation du taux d'humidité de la tomate en fonction du temps de séchage	24
Figure (II- 4) Variation de la vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps de séchage	24
Figure (II- 5) Linéarisation des fonctions $\ln(D_{eff}) = f(1/T)$	24
Figure (II- 6) Effect of temperature on the effective diffusivity of water in pumpkin slices.....	25
Figure (II- 7) Influence of temperature on the effective diffusivity	25
Figure (II- 8) Effets de différentes méthodes de séchage sur la teneur totale en phénols des tranches d'oignon.....	26
Figure (II- 9) Variations du taux d'humidité en fonction du temps de séchage au four et au soleil des tranches d'oignon.	26
Figure (II- 10) Variation of the water content according to different temperatures as function of the time.	27
Figure (II- 11) Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.....	27

Figure (II- 12) Variation de la teneur en eau en fonction du temps (a) Associé à 1 panneau ; (b) associé à 2 panneaux	28
Figure (II- 13) Qualité visuelle de l'aspect de la pomme de terre séchée de la variété Désirée	28
Figure (II- 14) Schéma des systèmes de séchage solaire et de séchage à basse température.	29
Figure (II- 15) Température de l'air (a) et humidité relative (b) de la chambre du séchoir pendant la journée.....	30
Figure (II- 16) (a) Température de l'air et humidité relative de la chambre du séchoir pendant la nuit ; (b) teneur en humidité en fonction du temps de séchage pour deux méthodes de séchage.	30
Figure (II- 17) Représentation schématique du séchoir tunnel solaire.....	31
Figure (II- 18) Changement dans les moyens de séchage, température et humidité relative à l'entrée, au milieu et à la sortie du tunnel solaire (Rhin, RHm et Rho sont respectivement l'humidité relative à l'entrée, au milieu et à la sortie du tunnel sol	32
Figure (II- 19) Variation des taux d'humidité expérimentaux et prédits par le modèle de Page avec le temps de séchage pour le séchage en tunnel solaire	32
Figure (II- 20) Courbes de séchage en couche mince des pommes selon les méthodes de séchage indiquées	32
Figure (II- 21) Réduction du poids des échantillons de bananes par séchage IR et air chaud.	33
Figure (II- 22) Taux de séchage des différentes méthodes et conditions de séchage des tranches de banane	33
Figure (II- 23) Courbes de lyophilisation de toutes les méthodes et traitements de séchage des tranches de banane.	33
Figure (II- 24) Retrait d'épaisseur de tranches de banane déshydratées sous différents traitements.	33
Figure (II- 25) Effet du traitement par trempage acide sur l'apparence des bananes séchées. (a) Échantillons de bananes non traitées, (b) Échantillons de bananes traitées à l'acide	34
Figure (II- 26) Schéma schématique du séchoir solaire expérimental de type fermé associé au module PV comme source d'énergie électrique complémentaire et à son système de déshumidification.....	35
Figure (II- 27) Échantillons de citron séchés de couleur vive sous séchage solaire complémentaire en utilisant la méthode d'augmentation progressive de la température (de 36 à 52 C).....	35
Figure (II- 28) Échantillons de citron séchés de couleur brun foncé utilisant la méthode de séchage à l'air chaud à température constante de 60 C.....	35
Figure (II- 29) Valeurs b^* en fonction de l'activité de l'eau (A_w) à différentes températures de séchage.....	36

Figure (II- 30) Courbe Aw en fonction du temps obtenue pendant le séchage en utilisant des changements progressifs de température (36–52 C) et une exposition solaire complémentaire.	36
Figure (II- 31) Processus de séchage des raisins : (a) séchage au soleil à ciel ouvert (b) séchoir solaire à convection naturelle et (c) séchage en serre à tunnel solaire.....	37
Figure (II- 32) Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage : (&) séchage au soleil ouvert, (-) séchoir solaire à convection naturelle et (&) séchage en serre tunnel solaire.	37
Figure (II- 33) Evolution de la température du produit en fonction du temps de séchage : (&) séchage en serre tunnel solaire, (&) séchage au soleil ouvert et (-) séchoir solaire à convection naturelle.....	37
Figure (II- 34) Evolution de l'humidité relative dans le temps : (RH I) à l'intérieur de la serre et (RH E) à l'extérieur de la serre.....	38
Figure (II- 35) Le rapport volume/teneur en humidité des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.	39
Figure (II- 36) Taux d'humidité en fonction du temps de séchage pour des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.....	39
Figure (II- 37) : Rapport logarithmique d'humidité (ln(MR)) en fonction du temps de séchage pour des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75°.....	39
Figure (II- 38) Relation de type Arrhenius entre la diffusivité efficace de l'humidité pour les figes prétraitées et non prétraitées.	39
Figure (II- 39) Diffusivité effective de l'humidité en fonction de la teneur en humidité pour les figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C	40
Figure (II- 40) Le diamètre géométrique moyen en fonction de la teneur en humidité des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.	40

Chapiter III

Figure (III- 1) Image satellite de la zone d'expérience.....	45
Figure (III- 2) Courbes de température et d'humidité relative de Biskra.	46
Figure (III- 3) Configuration expérimentale (capteur solaire avec chambre de Séchage)	46
Figure (III- 4) Fabrication du capteur solaire avec de chambre de séchage.	46
Figure (III- 5) Configuration expérimentale de la chambre de séchage.	47
Figure (III- 6) Support du produit de séchage.....	47

Figure (III- 7) Une balance électronique numérique.....	48
Figure (III- 8) capteur de température LCD.....	48
Figure (III- 9) Hygromètre (modèle PCE-555)	49
Figure (III- 10) pyranomètre (modèle Amproch SOLAR-100).	49
Figure (III- 11) Un anémomètre numérique (modèle PCE – TA 30).....	50
Figure (III- 12) Voltage régulateur.....	50
Figure (III- 13) Représente de Moteur d'aspiration d'air.....	51
Figure (III- 14) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, naturel	51
Figure (III- 15) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, naturel	52
Figure (III- 16) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, naturel	52
Figure (III- 17) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s.....	52
Figure (III- 18) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s.....	53
Figure (III- 19) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s.....	53
Figure (III- 20) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s.....	53
Figure (III- 21) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s.....	54
Figure (III- 22) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s.....	54
Figure (III- 23) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s.....	54
Figure (III- 24) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s.....	55
Figure (III- 25) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s.....	55

Chapiter IV

Figure (IV- 1) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps en mod naturel	58
---	----

Figure (IV- 2) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps, débit=0.0083kg/s	59
Figure (IV- 3) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps,débit=0.016kg/s	59
Figure (IV- 4) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps, débit=0.023kg/s	60
Figure (IV- 5) L'effet rayonnement solaire sur la température du capteur (sortie) en fonction du temps.....	60
Figure (IV- 6) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 2mm	61
Figure (IV- 7) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 4mm	62
Figure (IV- 8) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 7mm	62
Figure (IV- 9) L'évolution de la teneur en eau à base séché fonction du temps, épaisseur = 2mm ..	63
Figure (IV- 10) Evolution de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps, épaisseur = 4mm	63
Figure (IV- 11) Evolution de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps, épaisseur = 7mm	64
Figure (IV- 13) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 4mm .	65
Figure (IV- 12) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 2mm .	65
Figure (IV- 14) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 7mm .	66
Figure (IV- 15) Durée de séchage en fonction de l'épaisseur.	67
Figure (IV- 16) Durée de séchage en fonction de débit.	67

Sommaire

Remerciements

Dédicace 1

Dédicace 2

Liste des figures

Liste des tableaux Nomenclature

Sommaire

Introduction Générale.....1

Chapitre I : Généralités sur le séchage.....3

1. Introduction.....3

2. Définition de séchage.....3

3. Historique sur le séchage.....3

4. Objectif du séchage.....3

5. Principe de séchage.....4

6. Différents modes séchage.....4

6.1. Séchage par conduction.....4

6.2. Séchage par convection.....4

6.3. Séchage par rayonnement.....4

7. Vitesse de séchage.....5

8. Cinétique de séchage.....5

8.1. Période de mise en température (Phase a).....5

8.2. Période à vitesse constant (Phase b).....6

8.3. Période de ralentissement (Phase c).....6

9. Effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :.....6

Effet de la température de l'air :.....6

Effet de la vitesse de l'air :	6
Effet de l'humidité de l'air :	6
10. Terminologie de séchage	7
10.1. Caractéristiques de l'air de séchage	7
10.2. Caractéristiques des solides humides :	8
11. Méthodes de séchage	9
11.1. Séchage au soleil.	9
11.2. Séchage à l'air chaud.....	10
11.3. Séchage au four.....	11
11.4. La lyophilisation	11
11.5. Déshydratation osmotique.....	12
11.6. Séchage dans un séchoir	13
11.7. Séchage au micro-ondes.....	13
12. Différents Types De Séchoirs Solaires :	14
12.1. Séchoir solaire indirect	14
12.2. Séchoir solaire direct.....	15
12.3. Séchoirs solaires mixtes	16
12.4. Séchoirs hybrides.....	16
13. Domaines d'utilisation du séchage	17
14. Avantage et Inconvénients de séchage :	18
Avantages du processus de séchage:	18
Inconvénients du processus de séchage :	18
15. Conclusions :	18
Références.....	19
Chapitre II : Etude Bibliographies.....	22
1. Introduction	22

2. Sécher certains types de légumes :	22
2.1. Tomates :	22
2.2. Citrouille:	25
2.3. Oignons	26
2.4. Pomme de terre :	27
2.5. Piments rouges	29
3. Sécher certains types de fruits :	31
3.1. Pommes	31
3.2. Bananes	33
3.3. Citrons:	34
3.4. Grappes :	36
3.5. Figs.	38
4. Conclusion	40
Références.....	42

Chapitre III Etude Expérimentale45

1. Introduction:	45
2. Localisation des expériences et climat de zone :	45
2.1 Lieu des expériences :	45
2.2 Climat zone expérimentale :	46
3. Étude expérimentale :	46
3.1 Fabrication de chambre de séchage :	47
3.2 Procédure expérimentale :	48
4. Mode travail.....	55
4.1. Déterminer l'échantillon sur une base humide :	55
4.2. Déterminer l'échantillon sur une base sèche :	56
4.3. Déterminer la perte de masse :	56

Chapitre IV : Résultats Et Discussion	58
1. Introduction:.....	58
2. Influence du rayonnement solaire sur la température du capteur avec la chambre de séchage :.....	58
3. La Variation du teneur en eau base humide.....	61
4. La Variation de la teneur en eau du produit à base sèche.....	63
5. Perte de masse.....	65
6. Effet de l'épaisseur et le débit sur la vitesse de séchage.....	67
7. Conclusion.....	68
Conclusion générale	70

Introduction générale

Introduction Générale

L'Algérie est effectivement considérée comme l'un des pays qui possède de formidables ressources naturelles dans le domaine de l'énergie solaire, du fait qu'elle bénéficie d'un des plus grands rayonnements solaires au monde, grâce à sa situation géographique particulière en Afrique du Nord. Ce rayonnement s'étend sur l'ensemble du pays la plupart des jours de l'année.

L'énergie solaire est l'élément fondamental de la technologie de séchage solaire, exploitant cette énergie naturelle et renouvelable pour sécher les cultures agricoles et les denrées alimentaires de manière efficace et durable.

Le séchage solaire est considéré comme l'une des plus anciennes technologies utilisées dans la conservation des aliments et des matières agricoles, reposant sur l'énergie solaire comme source d'énergie naturelle et renouvelable. Cette méthode a récemment suscité un intérêt croissant en raison des avantages environnementaux et économiques qu'elle offre, notamment dans les zones à fort rayonnement solaire.

L'objectif principal de notre travail est d'étudier le comportement de séchage solaire d'une couche fine de pastèque rouge à l'aide d'un séchoir solaire indirect (convection naturelle et forcée). Les expériences sont menées à l'Université Mohamed Khider de Biskra.

Ce mémoire résume nos travaux de recherche les expériences réalisées ainsi que les résultats obtenus. Il se compose de quatre parties :

Après cette introduction générale, nous allons aborder dans le premier chapitre, le phénomène de séchage en générale et les paramètres influençant sur ce phénomène, des définitions de certains facteurs indispensables seront évoqués ; ainsi qu'un aperçu sur les différents types de séchoirs solaires.

Le deuxième chapitre consistera en une étude bibliographique qui exposera de nombreuses études antérieures réalisées dans la même thématique.

Le troisième chapitre décrira les étapes de l'expérience et montrera le matériel et tous les outils et appareils de mesure utilisés pour assurer le processus de séchage.

Le dernier chapitre exposera les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les interprétations vues nécessaires.

On finira par une conclusion générale qui résumera notre travail.

Chapitre I

Généralités sur le séchage

Chapitre I : Généralités sur le séchage.

1. Introduction :

Le séchage solaire est un processus qui élimine l'eau du produit par évaporation, ce qui réduit sa teneur en eau et le rend adapté au stockage à long terme. Cela se fait en s'exposant au soleil et en utilisant un équipement pour capter le rayonnement solaire afin de faciliter le processus.

Dans ce chapitre, nous présenterons le concept de séchage, discuterons des différents types et méthodes de séchage et comprendrons les mécanismes et principes de son travail.

2. Définition de séchage :

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide. [1]

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes. [2]

3. Historique sur le séchage :

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois ...), ou pour les textiles (lavage, teinture,) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [3]

4. Objectif du séchage :

C'est d'éliminer l'humidité des aliments ou d'autres objets, ce qui contribue à réduire l'activité microbienne et à retarder les processus naturels de décomposition. Grâce à ce procédé, il est possible

d'améliorer la capacité de stockage des matériaux et de prolonger leur durée de conservation, tout en conservant leurs propriétés nutritionnelles et leur qualité.[4]

5. Principe de séchage :

Le processus de séchage implique un transfert d'énergie thermique et un transfert de masse, qui affectent directement la vitesse de séchage.[5]

➤ Transfert d'énergie thermique :

La chaleur est transférée de l'environnement entourant le liquide à sécher au liquide lui-même. Ce liquide a besoin d'énergie thermique pour évaporer l'eau qu'il contient. Lorsque la chaleur nécessaire est fournie, les molécules d'eau sont stimulées pour se séparer et se transformer en vapeur.

➤ Transfert de masse :

Dans ce processus, l'eau est transférée de l'intérieur du matériau à sécher vers sa surface. Cela se fait en s'écoulant de l'intérieur vers l'extérieur, puis en transformant l'eau en état gazeux à la surface. Cela se produit généralement par évaporation ou transfert direct à la vapeur.

6. Différents modes séchage :

6.1.Séchage par conduction :

Le séchage par conduction est un processus où la chaleur est transférée directement d'une surface à une autre, généralement d'un matériau humide à un matériau sec. Cela se produit par contact direct entre les particules du matériau humide et une surface chauffée. Ce type de séchage est souvent utilisé dans diverses industries pour éliminer l'humidité des matériaux de manière efficace.[2]

6.2.Séchage par convection :

Le séchage par convection implique le transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide, généralement de l'air, autour du matériau à sécher. L'air chaud circule et évacue l'humidité du matériau. Ce processus est couramment utilisé dans les séchoirs industriels et domestiques, où l'air chaud est soufflé sur les objets ou les substances à sécher, accélérant ainsi l'élimination de l'humidité.
[2]

6.3.Séchage par rayonnement :

Le séchage par rayonnement est un processus où la chaleur est transférée d'une source chaude à l'objet à sécher sans nécessiter de contact direct. Cela peut se produire à travers le vide spatial ou à travers un milieu transparent à la chaleur, comme l'air. Ce type de séchage est souvent utilisé dans des applications industrielles pour sécher des matériaux sensibles à la chaleur. [2]

7. Vitesse de séchage :

La vitesse de séchage peut être définie comme la quantité d'eau qui s'évapore ou se transfère d'un matériau donné vers l'environnement au cours d'une unité de temps donnée. Cette action est affectée par plusieurs facteurs physiques et chimiques, notamment la température, l'humidité, la pression atmosphérique et les propriétés du matériau lui-même. L'utilisation de techniques mécaniques et de processus améliorés de transfert de chaleur et d'humidité contribuent à accélérer la vitesse de séchage. [6]

8. Cinétique de séchage :

La cinétique de séchage de divers produits a été étudiée à l'aide de courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage avec le temps ($-dx/dt$).

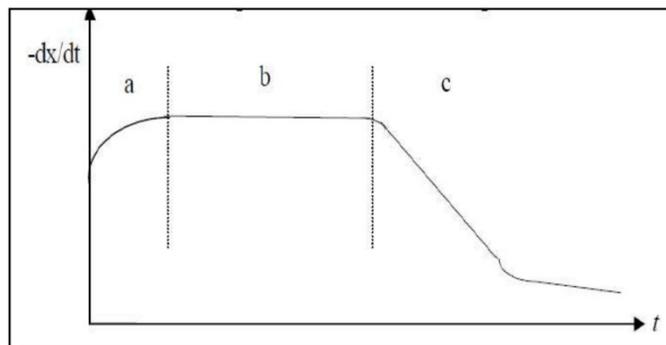


Figure (I-1) Périodes du séchage.[8]

8.1. Période de mise en température (Phase a) :

Dans ce procédé, un produit ayant une température de surface et une pression de vapeur partielle est agité par un flux d'air chaud. L'échange de chaleur et le transfert de matière se produisent entre le produit et l'air sec, car la conversion de l'eau contenue dans le produit en vapeur nécessite des

quantités appropriées d'énergie d'évaporation. La chaleur excessive fournie par l'air chauffe davantage le produit jusqu'à ce qu'il atteigne la température humide de l'environnement de séchage, et ce processus est court par rapport au temps de séchage total.[7]

8.2.Période à vitesse constant (Phase b) :

Durant cette phase, la vitesse de séchage demeure relativement constante pour de nombreux produits. L'humidité se déplace vers la surface sous forme liquide, influencée par les forces capillaires. Un équilibre se forme entre la diffusion dans la couche limite et les mécanismes de transfert d'humidité vers la surface. Cette période prend fin lorsque les forces capillaires ne peuvent plus résister à l'évaporation des eaux en surface.[8]

8.3.Période de ralentissement (Phase c) :

Pendant le processus de séchage, les forces capillaires perdent leur capacité à amener l'eau en surface, entraînant une diminution de la vitesse de séchage. Ce phénomène est complexe, impliquant la migration de l'eau à contre-courant de la température, les variations de pression partielle favorisant la vaporisation, la migration de substances solubles, et la résistance liée à la structure du produit. De plus, la déformation est significative pour les produits biologiques.[8]

9. Effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

➤ Effet de la température de l'air :

La température de l'air de séchage affecte grandement la vitesse de séchage, car la vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de la température de l'air. Cet effet est dû à l'augmentation de l'apport de chaleur au produit, ce qui améliore le processus de séchage. De plus, l'effet de la température du produit est plus important que l'effet de la température élevée de l'air lors du processus de séchage.[9]

➤ Effet de la vitesse de l'air :

L'effet de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage est positif, notamment dans les premières étapes du processus. Cependant, dans les cas où la cinétique de séchage des produits est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'effet de la vitesse de séchage de l'air est fortement réduit. [9]

➤ Effet de l'humidité de l'air :

La teneur en eau de l'air est un facteur important dans le comportement cinétique de séchage de certains produits, et son effet semble être plus important au début du processus de séchage, et son effet diminue à mesure que la température de l'air augmente. [9]

10. Terminologie de séchage :

10.1. Caractéristiques de l'air de séchage :

10.1.1. Humidité :

Ce terme désigne l'humidité qui doit être éliminée des matériaux solides, liquides ou pâteux lors du processus de séchage.[10]

$$Mh = Me + Ms \quad (1)$$

10.1.2. Humidité absolue :

L'humidité absolue ou contenue en humidité est la masse d'humidité mélangée par kilogramme de gaz sec.[10]

$$\frac{Me}{Ms} \cdot [kgv.kgas^{-1}] \quad ; \quad Xr = \frac{(Mh-Ms)}{Ms} \quad (2)$$

X : Humidité absolue d'un solide [kg /kg].

Mh : Masse humide de produit [kg].

Ms : Masse sèche de produit [kg].

10.1.3. Humidité relative :

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur dans l'air et la pression partielle atteinte par la vapeur à saturation maximale à la même température.[11]

$$Xr = \frac{Mh}{Ms} = \frac{Mh-Ms}{Ms} = Hr = \frac{Pv}{Ps(T)} 100 \quad (3)$$

10.1.4. Température sèche :

La température sèche du gaz est la température mesurée sans prendre en compte l'humidité ou la vapeur d'eau présente dans le gaz.[12]

10.1.5. Température humide :

La température humide est la température mesurée par une sonde immergée dans un courant de gaz et constamment mouillée avec de l'eau pure, et représente la température atteinte par un corps solide mouillé pendant la phase à vitesse constante du processus de séchage des drains.[12]

10.2. Caractéristiques des solides humides :

10.2.1. Humidité absolue :

La teneur en eau absolue d'un solide, également appelée teneur en eau sèche ou simplement humidité, est exprimée par la masse du liquide présente dans le produit par rapport à sa masse sèche.[13]

$$Xl = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (4)$$

10.2.2. Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du Produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.[14]

10.2.3. Humidité relative :

L'humidité relative d'un solide, également appelée teneur en eau ou teneur en eau humide, est exprimée par la masse du liquide présent dans le produit par rapport à sa masse humide.[15]

$$Xl = \frac{Mh - Ms}{Mh} \quad (5)$$

10.2.4. Taux d'humidité :

Les taux d'humidité expriment la masse de liquide présente par unité de masse du matériau à sécher. Malgré la référence fréquente aux matériaux humides, il est préférable de représenter le niveau d'humidité par rapport à un matériau anhydre.[16]

10.2.5. Teneur en eau à base humide :

L'humidité relative où titre en eau, ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.[16]

10.2.6. États de siccité :

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.[11]

10.2.7. Corps hygroscopique :

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit. Cet abaissement de pression est dû au fait que l'humidité est soit adsorbée à la surface du solide, soit en solution dans celui-ci. Les isothermes d'adsorption permettent de caractériser le comportement hygroscopique.[17]

11. Méthodes de séchage :

Les méthodes de séchage courantes comprennent :

11.1. Séchage au soleil :

Le séchage au soleil est un processus historique utilisé pour sécher les fruits et légumes dans les zones reculées où les méthodes de séchage modernes ne sont pas disponibles. Cette méthode consiste à exposer les matériaux à la lumière directe du soleil pendant de longues périodes jusqu'à ce qu'ils perdent leur humidité. Bien qu'il s'agisse d'une méthode économique, elle ne préserve pas complètement toutes les propriétés et vitamines, car certains nutriments peuvent être affectés par la chaleur et l'exposition à l'air.

Malgré ses avantages économiques, cette méthode nécessite une grande surface de distribution des matériaux à sécher et de longues périodes de temps, et elle offre également moins de contrôle sur le processus de séchage.[18]



Figure (I-2) tomates séchage au soleil [19]

11.2. Séchage à l'air chaud :

Le séchage à l'air chaud repose sur l'utilisation d'une température spécifique pour éliminer l'humidité d'un matériau solide d'une épaisseur spécifique. Des facteurs tels que la température et la vitesse de l'air jouent un rôle important dans la cinétique de séchage et la qualité des produits séchés, notamment pour les produits sensibles à la température.

Dans ce processus, le matériau humide est placé dans un courant d'air chaud et sec à la température appropriée. Des différences de température et de pression de vapeur d'eau se produisent entre l'air et la surface du matériau, permettant à la chaleur et à l'humidité de se transférer entre eux. Le transfert de chaleur par convection se produit en raison d'un gradient de température, tandis que le

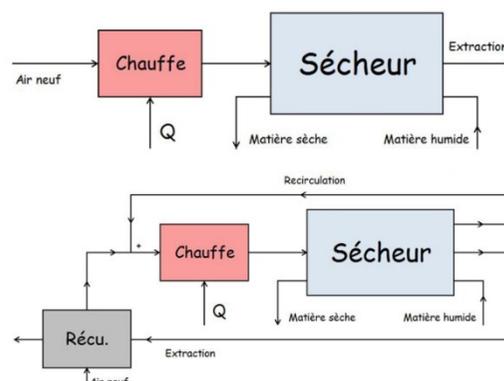


Figure (I-3) Le séchage à l'air chaud.[21]

transfert d'eau se produit en raison d'un gradient de pression de vapeur d'eau entre l'air et la surface du matériau.[20]

11.3. Séchage au four :

Le séchage des aliments au four est un processus dans lequel l'humidité est éliminée des aliments en utilisant une chaleur douce et continue dans un environnement hermétique à l'intérieur d'un four. La température du four est réglée à un niveau très bas, généralement entre 50 et 70 degrés Celsius, et le processus de séchage se poursuit pendant une longue période, allant de plusieurs heures à plusieurs jours, selon le type et la taille des aliments. L'un des inconvénients de ce procédé est la grande consommation d'électricité.[22]



Figure (I-4) Sécheuse électrique

11.4. La lyophilisation :

La lyophilisation est une technique de séchage où le solvant ou le milieu de suspension est gelé à basse température, puis transformé directement de l'état solide en vapeur. L'objectif de ce procédé est de créer une substance stable lors du stockage et qui reste inchangée après sa reconstitution avec de l'eau. Toutefois, le succès de cette méthode dépend également fortement des étapes finales du processus, notamment l'emballage et les conditions de stockage.[23]

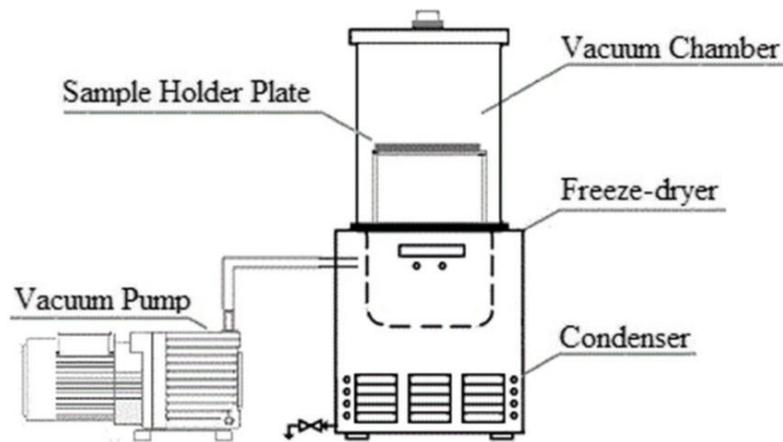


Figure (I-5) Schéma du lyophilisateur.[24]

11.5. Déshydratation osmotique :

La déshydratation osmotique (DO) est une technique d'élimination de l'eau, appliquée aux produits horticoles tels que les fruits et légumes pour réduire la teneur en eau. Le séchage osmotique est une technique utile pour produire des aliments sûrs, stables, nutritifs, savoureux, économiques et concentrés obtenus en plaçant des aliments solides, entiers ou tranchés, dans des solutions aqueuses à haute pression osmotique.[25]

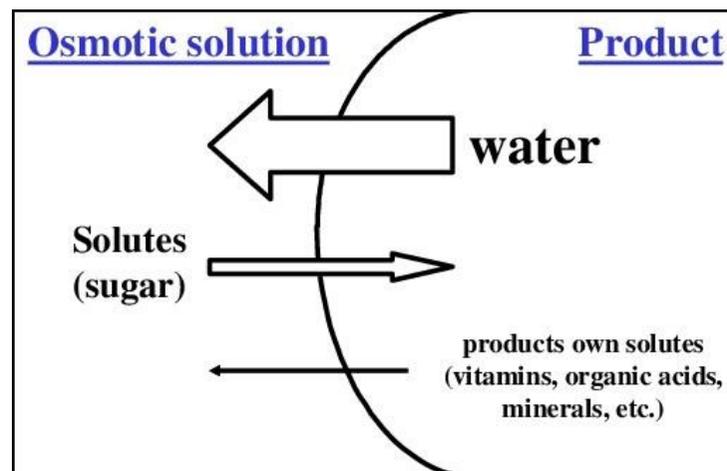


Figure (I-6) Principe de la déshydratation osmotique.[26].

11.6. Séchage dans un séchoir :

Le processus de séchage dans un séchoir dépend de l'application du principe d'échange thermique et de transfert de masse, où l'air chaud est dirigé vers le matériau à sécher à l'intérieur du séchoir. La température du matériau augmente, ce qui augmente l'énergie des molécules d'eau qu'il contient, ce qui facilite le transfert de l'humidité du matériau vers l'air. L'air saturé d'humidité est évacué du sécheur et remplacé par de l'air frais et sec, permettant une déshumidification plus efficace. La température et le temps de séchage sont déterminés en fonction des recommandations de l'industrie et des caractéristiques du matériau à sécher, en tenant compte de facteurs tels que le type de matériau, son épaisseur et sa sensibilité à la chaleur pour maintenir sa qualité.[27]

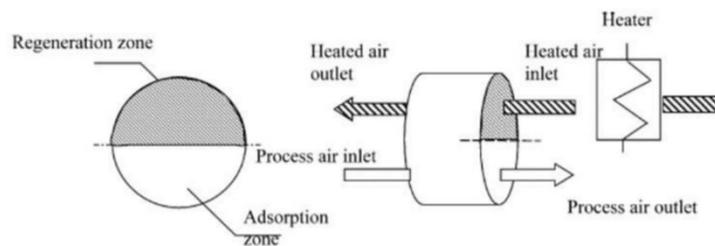


Figure (I-7) Un système de roues déshydratantes pour une application de séchage.[27]

11.7. Séchage au micro-ondes :

Le séchage au micro-ondes implique la pénétration des ondes dans les matériaux, subissant une déshydratation liée à l'énergie pour faciliter le transfert. En utilisant des fours à micro-ondes, il est possible de sécher des épaisseurs plus importantes par rapport à l'utilisation des rayons infrarouges.[28]

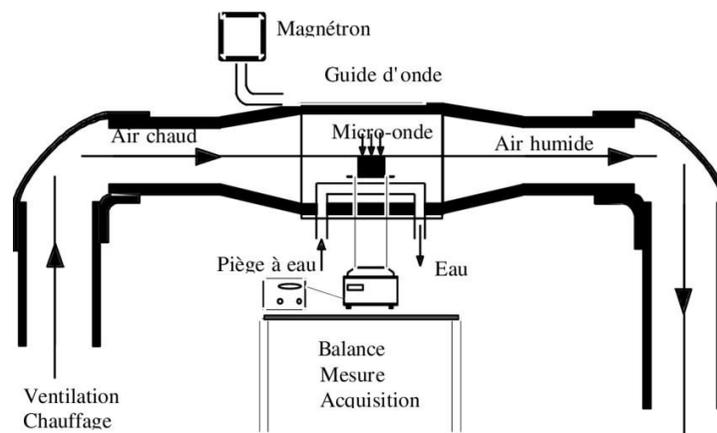


Figure (I-8) Principe du séchage par micro-onde (UHF).[29]

12. Différents Types De Séchoirs Solaires :

12.1. Séchoir solaire indirect :

Dans le séchoir solaire indirect, les produits ne sont pas directement exposés au rayonnement solaire. Une unité distincte appelée aérotherme solaire ou capteur solaire est utilisée pour collecter l'énergie solaire et chauffer l'air entrant dans cette unité. L'aérotherme est relié à une cuve de séchage recouverte d'une feuille opaque sur le dessus (et sur les côtés exposés au soleil) où est conservée la récolte. L'air chauffé peut circuler à travers les produits humides, où la chaleur provenant de l'évaporation de l'humidité est fournie par transfert de chaleur par diffusion entre l'air chauffé et les produits humides.[30]

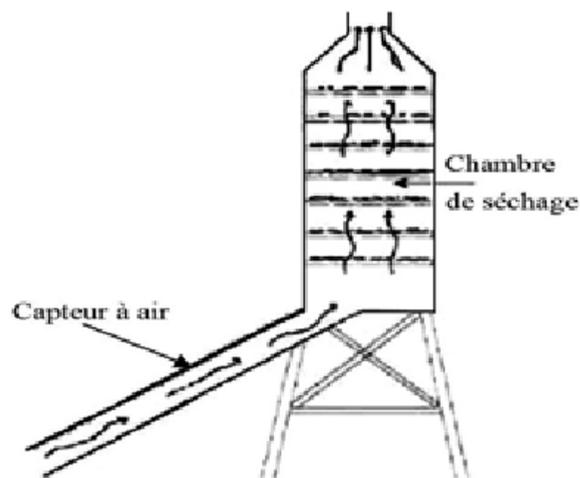


Figure (I-9) Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect. [31]

➤ Avantages du séchoir indirect :

Le séchoir solaire indirect présente les avantages suivants :

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit.
- Son fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.[31]

➤ Inconvénients du séchoir indirect :

Malgré les avantages des séchoirs indirects, ils présentent certains inconvénients, notamment :
[32][33]

- Son coût financier est important par rapport au séchage direct.
- La vitesse de séchage varie considérablement en fonction des conditions météorologiques et de la conception du séchoir.
- La faible résistance de ce type de sèche-linge au verre, qui nécessite de le remplacer périodiquement.

12.2. Séchoir solaire direct :

Dans ce type de séchoirs, les produits sont exposés directement aux rayons du soleil. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce agissant à la fois comme chambre de séchage et collecteur d'énergie solaire. Le bas de la chambre de séchage est généralement revêtu de noir pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur. Un panneau en plastique transparent ou en polyéthylène est souvent utilisé comme toit, mais d'autres matériaux plus coûteux tels que le verre ou le plastique spécialisé (polyéthylène agricole) peuvent également être utilisés. Cependant, la réaction directe

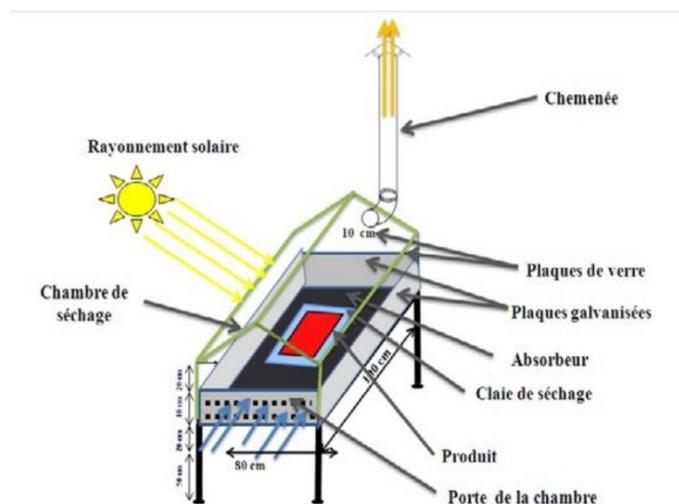


Figure (I-10) Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire direct.[35].[36]

entre le rayonnement solaire et le produit entraîne une détérioration de la qualité du produit et la destruction des éléments nutritifs.[34]

➤ Avantages des séchoirs solaires directs :

- Meilleure protection contre la poussière, les insectes et les bactéries par rapport au séchage naturel.
- Ces séchoirs ne nécessitent pas de main d'œuvre qualifiée.
- Temps de séchage plus court par rapport aux séchoirs naturels.
- Facile à installer et pas très cher.

- Sécheurs industriels inversés à énergie gratuite.
- **Inconvénients des séchoirs solaires directs :** [32][33]
- Températures élevées en fin de séchage.
- Les vitamines A et C sont détruites par les rayons ultraviolets du soleil.
- La couleur des légumes vire au jaune.
- Circulation d'air réduite qui entraîne une vitesse de séchage plus lente.

12.3. Séchoirs solaires mixtes :

Les séchoirs solaires mixtes combinent les principes des séchoirs directs et indirects. Les produits sont soumis à l'action conjointe du rayonnement solaire et de l'air chaud dans un dispositif de capteur placé sous la chambre de séchage.[37]

Les séchoirs solaires à mode mixte et indirect partagent le même design de construction ; la seule différence est le remplacement du couvercle de l'armoire non transparent par un couvercle en verre permettant une exposition directe des produits alimentaires au rayonnement solaire.[38]

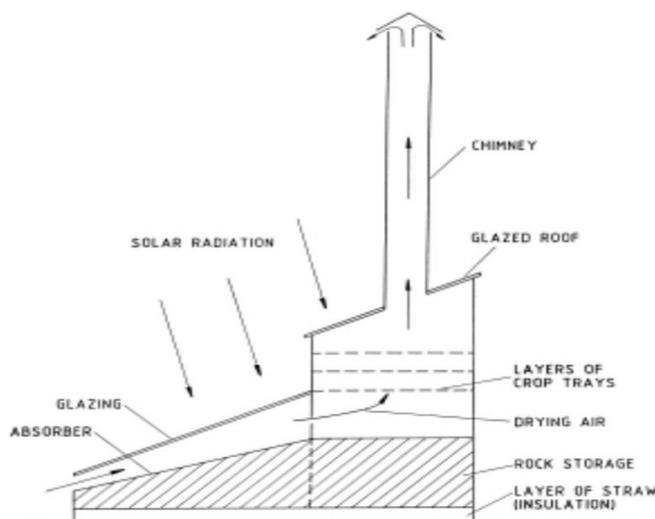


Figure (I-11) les séchoirs solaires mixtes.[40]

12.4. Séchoirs hybrides :

Les recherches se sont concentrées sur les séchoirs hybrides utilisant une énergie supplémentaire (carburant, électricité, bois, gaz, etc.). Les entrées d'énergie supplémentaire peuvent se situer à deux endroits différents pour le séchoir :

- Maintenir une température constante dans le séchoir en utilisant une source de chaleur résistante telle qu'un brûleur à gaz, un feu électrique, et du bois. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire, permettant simplement de chauffer l'air.
- Augmenter la circulation de l'air à l'aide de ventilateurs électriques, où l'énergie solaire reste la source de chaleur, mais le séchoir bénéficie d'une plus grande capacité d'évaporation grâce à une meilleure ventilation.[40]

➤ **Avantages**

- Contrôle amélioré du processus de séchage.
- Augmentation significative de la production par rapport à d'autres types de séchoirs solaires, car l'appareil peut fonctionner la nuit ou pendant la saison des pluies si nécessaire.[41]

➤ **Inconvénient**

- Cout de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance. [42]

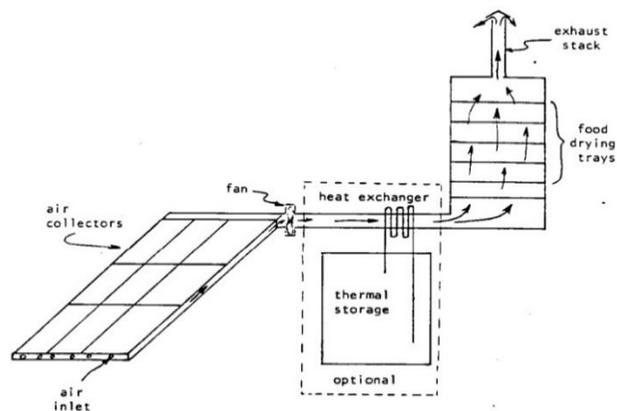


Figure (I-12) les séchoirs solaires hybrides. [41]

13. Domaines d'utilisation du séchage :

Le processus de séchage est essentiel pour améliorer la durée de conservation et la diversification des produits alimentaires, des pâtes et viandes transformées aux fruits et légumes secs et aux biscuits. Le séchage est également utilisé dans des industries telles que celles du sel et des céréales comme le café, le cacao et le riz.

Le séchage est également utilisé dans des industries telles que celles du papier et du bois pour éviter les problèmes de changements dus à l'humidité. Dans d'autres domaines tels que les matériaux de

construction et la céramique, le séchage joue un rôle essentiel dans la mise en forme des matériaux, et dans la biotechnologie et l'industrie pharmaceutique, il est utilisé pour produire des ingrédients séchés et des antibiotiques.[42]

14. **Avantage et Inconvénients de séchage :**

➤ **Avantages du processus de séchage:**

- Cela inclut la simplicité et de bons rendements.
- Les aliments séchés peuvent avoir une durée de conservation de plusieurs mois.
- Inactiver les enzymes et inhiber la croissance des micro-organismes.
- Ils peuvent être utilisés à des fins commerciales pour réduire les pertes de récoltes.
- Réduire les coûts financiers et environnementaux liés au transport de marchandises grâce à la réduction de la masse.[42]

➤ **Inconvénients du processus de séchage :**

- Perte d'arômes, de vitamines et de pigments.
- Des réactions de brunissement et de durcissement de la surface se produisent, entraînant des changements irréversibles de texture, des difficultés de réhumidification
- Son coût élevé, notamment en termes d'énergie. Il est donc utile de comprendre tout ce qui affecte le processus de séchage, y compris la vitesse de séchage, afin de réduire les coûts de ce processus.[42]

15. **Conclusions :**

Le séchage solaire est un processus qui élimine l'eau du produit par évaporation, ce qui réduit sa teneur en eau et le rend adapté au stockage à long terme. Cela se fait en s'exposant au soleil et en utilisant un équipement pour capter le rayonnement solaire afin de faciliter le processus.

Dans ce chapitre, nous présenterons le concept de séchage, discuterons des différents types et méthodes de séchage et comprendrons les mécanismes et principes de son travail.

Références

- [1]. Belaid, Wahiba. "Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire". Mémoire Master, Université de Tlemcen (2014).
- [2]. Bahadj, Ahmed. Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. Diss. 2014.
- [3]. Bouziane, Aicha, and Nacira Fadji. Étude sur la qualité de fenouil poudre obtenu par Séchage solaire. Diss. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [4]. Briki, Alia, Zaouia ZIDANI, and Hamza LAKSACI. Etude De Séchage Et Caractérisation Physicochimique Et Hygiénique D'un Produit Alimentaire Du Site D'Adrar. Diss. Université Ahmed Draia-Adrar, 2021
- [5]. Said, Bachir. Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées. Diss. 2015.
- [6]. Belachi, Warda. Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires. Diss. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009
- [7]. Nadir, Nadia. Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires. Diss. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [8]. Touati, Boumediene. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). Diss. Lyon, INSA, 2008.
- [9]. Bekakra, Yamina, and Dalila Kherfi. Optimisation des paramètres influençant sur le séchage de la pomme de terre par la méthode de plan d'expérience. Diss.
- [10]. Bafrouh, Hesna, Malika Debagh, and Ahmed Mediani. Etude Expérimentale et Modélisation de la Cinétique de Séchage Solaire de la Pomme de Terre. Diss. Université Ahmed Draia-Adrar, 2021.
- [11]. Ghenbazi, A, Hadj Sad, S et Dehda, M. Etude expérimentale des performances thermiques d'un séchoir solaire à capteur plan avec différentes chicanes. Diss. El Oued, Université Echahid Hamma Lakhdar. Faculté des Sciences et Technologie
- [12]. W. Belachi, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah - Ouargla (2009).

- [13]. El-Khawajah, M. F., L. B. Y. Aldabbagh, and F. Egelioglu. "The effect of using transverse fins on a double pass flow solar air heater using wire mesh as an absorber." *Solar energy* 85.7 (2011): 1479-1487.
- [14]. Mennouche, Djamel. Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire. Diss. 2006.
- [15]. Belhamri, A., and Nadia Chalal. "Etude d'un sechoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect." (2008).
- [16]. Jannot, Yves. "Isothermes de sorption : modèles et détermination." Jul-2008 (2003).
- [17]. Adel, Boutalbi. "Etude expérimentale du séchage des petits pois."
- [18]. Messaoudi, Rekia, Hayat Baadi, and Saadedine Manaa. Etude theorique du séchage solaire directe. Diss. Universite Ahmed Draia-Adrar, 2021
- [19]. <https://lecarrefouralgerie.dz/une-premiere-a-chlef-80-tonnes-de-tomates-sechees-exportees-vers-leurope/> [2024/03/01].
- [20]. Ben Abdelkader, Houcine. "Étude de l'impact des méthodes de séchage sur la qualité nutritionnelle et physico-chimique des poudres de fromage gouda." (2011).
- [21]. <https://energie.wallonie.be/fr/l-air-de-sechage.html?IDC=8636&IDD=97672> [2024/03/01].
- [22]. Bahlouli, F., A. Tiaiba, and A. Slamani. "Etude des différentes méthodes de séchage d'abricot, point sur les méthodes de séchage traditionnelles dans la région du Hodna, wilaya de M'Sila." *Rev. Ener. Renouv. SMSTS* 8 (2008): 61-66.
- [23]. Oetjen, Georg-Wilhelm, and Peter Haseley. *Freeze-drying*. John Wiley & Sons, 2004.
- [24]. Taskin, Onur. "Evaluation of freeze drying for whole, half cut and puree black chokeberry (*Aronia melanocarpa* L.)." *Heat and Mass Transfer* 56 (2020): 2503-2513.
- [25]. Chandra, Suresh, and Durvesh Kumari. "Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review." *Critical reviews in food science and nutrition* 55.4 (2015): 552-561.
- [26]. Bekele, Yetenayet, and Hosahalli Ramaswamy. "Going beyond conventional osmotic dehydration for quality advantage and energy savings." *Ethiopian Journal of Applied Science and Technology* 1.1 (2010): 1-15

- [27]. Chua, K. J., and S. K. Chou. "Low-cost drying methods for developing countries." *Trends in Food Science & Technology* 14.12 (2003): 519-528.
- [28]. Khaldi, Souheyla. *Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie*. Diss. Bourgogne Franche-Comté, 2018
- [29]. Mabrouk, S. Ben. *Etude des transferts simultanés de chaleur et de masse dans les milieux poreux : Modélisation des phénomènes de séchage*. Diss. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 240 Pages, 1999
- [30]. Sharma, Atul, C. R. Chen, and Nguyen Vu Lan. "Solar-energy drying systems: A review." *Renewable and sustainable energy reviews* 13.6-7 (2009): 1185-1210.
- [31]. Dadda, B., S. Kherrou, and L. Serir. "Réalisation d'un séchoir solaire indirect." *Revue des énergies renouvelables* 2008 (2008): 127-134.
- [32]. Duzde, Philippe, André Thémelin, and Max Reynes. *Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés*. GRET, 1996.
- [33]. Ekechukwu, O. Va, and Brian Norton. "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology." *Energy conversion and management* 40.6 (1999): 615-655.
- [34]. REDDAM, S., ME KHODIR, and A. SAF. "Technologies de Séchage Etude de Cas: Séchage de Deux Matrices Végétales Par étuve." (2018).
- [35]. MENNOUCHE, D., et al. "ETUDE EXPERIMENTALE DU SECHAGE SOLAIRE DE LA PATE DE TOMATE DANS UN SECHOIR DIRECT."
- [36]. Mennouche, Djamel. *Etude et amélioration de l'efficacité énergétique des séchoirs solaires en application dans les zones arides désertiques*. Diss. Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira.
- [37]. Tom, Ahmat. *Contribution au séchage solaire des produits carnés : Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux*. Diss. Paris, ENSAM, 2015.
- [38]. Mahapatra, Archana, and P. P. Tripathy. "Experimental investigation and numerical modeling of heat transfer during solar drying of carrot slices." *Heat and Mass Transfer* 55 (2019): 1287-1300.
- [39]. Chaudhari, asyish D., and sanjay P. salve. "A review of solar dryer technologies." *International journal of reseach in Advent Technology* 2.2 (2014): 218-232.

[40]. BETTAYBI, Ammar. "Etude expérimentale du séchage des produits agroalimentaires ; comparaison entre deux modes de séchage."

[41]. Pangavhane, D. R., and R. L. Sawhney. "Review of research and development work on solar dryers for grape drying." *Energy conversion and management* 43.1 (2002): 45-61

[42]. BENSEDDIK, ABDELLOUAHAB. "Modélisation et simulation du séchage de la figure par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée." (2011).

Chapitre II
Etude
Bibliographies

Chapitre II : Etude Bibliographies :

1. Introduction :

Le séchage est une pratique traditionnelle pour conserver les aliments et prolonger leur durée de conservation. De grandes quantités d'aliments sont séchées pour prolonger la durée de conservation, réduire les coûts d'emballage, minimiser le poids du transport, améliorer l'apparence, encapsuler la saveur naturelle et préserver la valeur nutritionnelle. Cela réduit également la masse et le volume des produits, ce qui entraîne une diminution des frais d'expédition. Il existe de nombreuses stratégies pour conserver les aliments à long terme. Parmi les procédures de séchage, le séchage à l'air chaud est largement utilisé pour sécher les aliments.[1]

Les légumes et les fruits sont essentiels à une alimentation saine et équilibrée. Les légumes et les fruits contiennent une variété de nutriments importants tels que des fibres, des vitamines et des minéraux. Consommer des quantités adéquates de légumes et de fruits est un élément essentiel de la prévention de nombreuses maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires et certains types de cancer. De plus, les légumes et les fruits peuvent aider à contrôler le poids et favoriser une sensation de satiété, ce qui peut contribuer à la prévention de l'obésité et des maladies associées. Encourager une consommation adéquate de légumes et de fruits est un élément essentiel des politiques de santé publique et des directives alimentaires, [2]. On a donc recours au séchage des légumes et des fruits pour prolonger leur durée de conservation, tout en facilitant le stockage et le transport, en plus de profiter du goût et des valeurs nutritionnelles en dehors de leur saison et sans avoir besoin d'une longue préparation.[3]

2. Sécher certains types de légumes :

2.1. Tomates :

(Kam, Sié, et al. 2017). [4]

➤ Protocole :

Un séchoir à tour solaire (Figure (II-1)) qui est un séchoir indirect

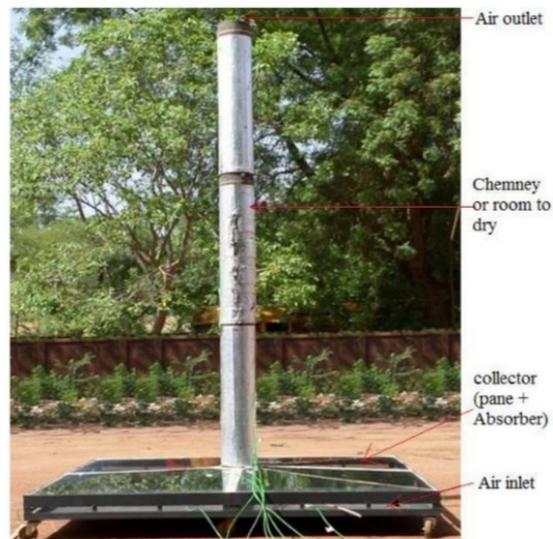


Figure (II- 1) Tour de séchage solaire.

Des tomates cerises rouges fraîches ont été utilisées dans l'expérience, coupées en tranches de 1 cm d'épaisseur. Le processus de séchage a commencé à 9 heures du matin et s'est poursuivi jusqu'à 17 heures. Le poids des tomates est mesuré toutes les heures pendant le processus de séchage.



Figure (II- 2) Aspects de la tomate avant et après séchage

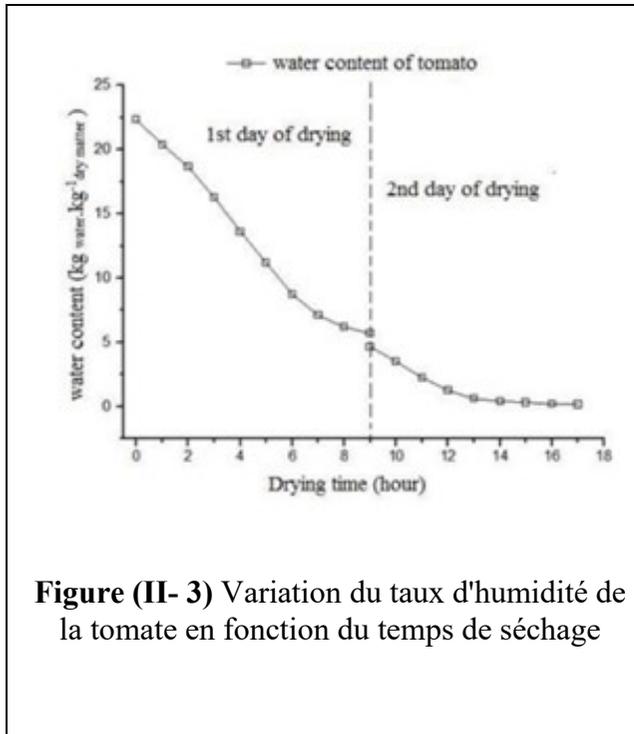


Figure (II- 3) Variation du taux d'humidité de la tomate en fonction du temps de séchage

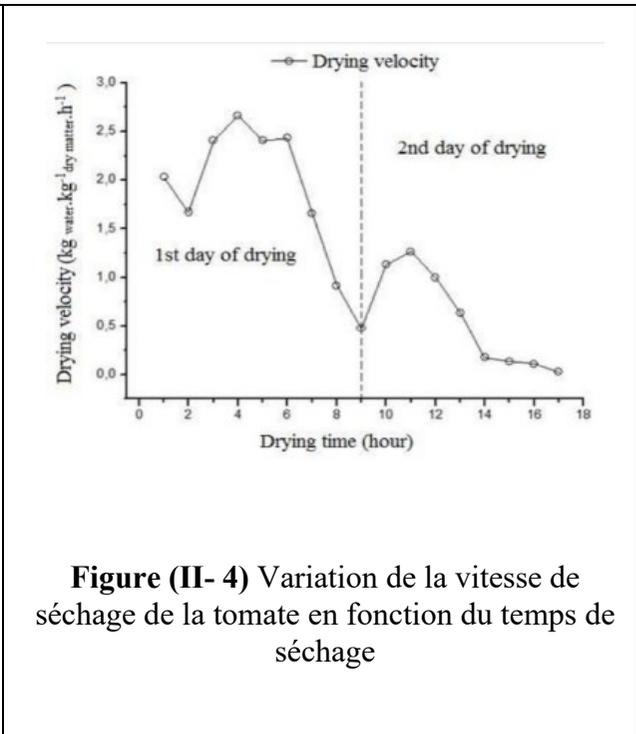


Figure (II- 4) Variation de la vitesse de séchage de la tomate en fonction du temps de séchage

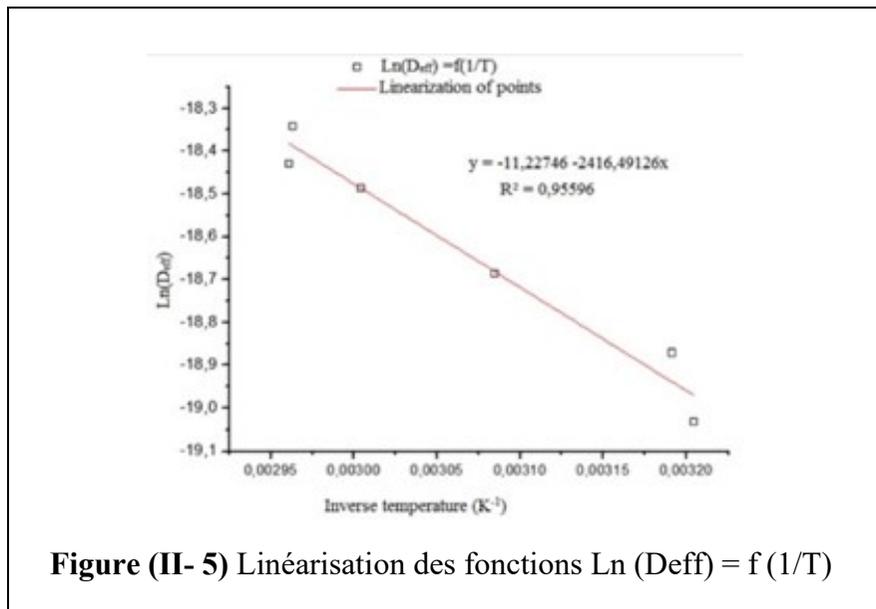


Figure (II- 5) Linéarisation des fonctions $\text{Ln} (D_{\text{eff}}) = f (1/T)$

➤ **Conclusion :**

À partir des résultats obtenus, il a été conclu que le comportement général du produit pendant le processus complet de séchage du produit est fonction du temps écoulé. Il a fallu deux jours pour sécher dans le séchoir à tour solaire, soit environ 17 heures de séchage, avec une vitesse de séchage maximale de 2,66 kg d'eau.kg⁻¹ matière sèche.h⁻¹. Avec une masse initiale de 173,6 g, après séchage on obtient une masse de 8,6 g soit une perte en eau de 165 g. A partir de ses résultats, pu

déterminer le coefficient de diffusion pour les tomates, estimé à $6,2687 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. L'énergie d'activation nécessaire pour déplacer l'eau de l'intérieur du produit vers l'extérieur est de $20,091 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

2.2. Citrouille:

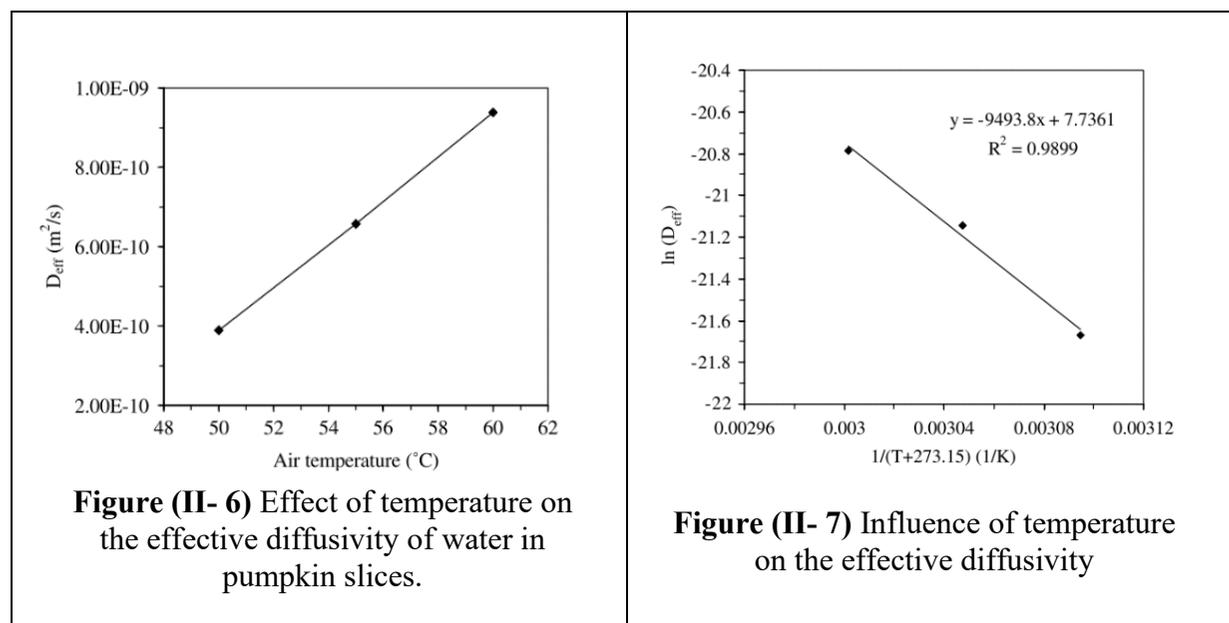
(Doymaz, Ibrahim. (2007).[5])

➤ Protocole :

Dans ce travail, la citrouille a été séchée dans un séchoir de laboratoire installé dans le département de génie chimique de l'université technique de Yildiz, à Istanbul, en Turquie.

Citrouille a été découpé en tranches cylindriques de $0,7 \pm 0,03 \text{ cm}$ à l'aide d'un couteau. Les expériences ont été menées à des températures de 50, 55 et 60 °C et une humidité relative de 25 %, 19 % et 15 %, respectivement. La vitesse de l'air a été maintenue à 1,0 m/s.

➤ Résultats :



➤ Conclusion :

Dans ce travail, une conclusion a été tirée sur la cinétique de séchage des tranches de citrouille étudiée dans un séchoir de type laboratoire, à une vitesse d'air constante de 1,0 m/s et une plage de température de 50 à 60 °C et une plage d'humidité relative de 15 à 25 %. Les citrouilles n'ont pas observé de période de séchage à vitesse constante dans les conditions expérimentales utilisées et ont montré seulement une période de séchage décroissante comme la plupart des produits alimentaires.

La diffusivité effective augmente à mesure que la température augmente. La dépendance à la température des coefficients de diffusivité a été décrite par une relation de type Arrhenius. L'énergie d'activation pour la diffusion de l'humidité s'est avérée être de 78,93 kJ/mol.

2.3. Oignons

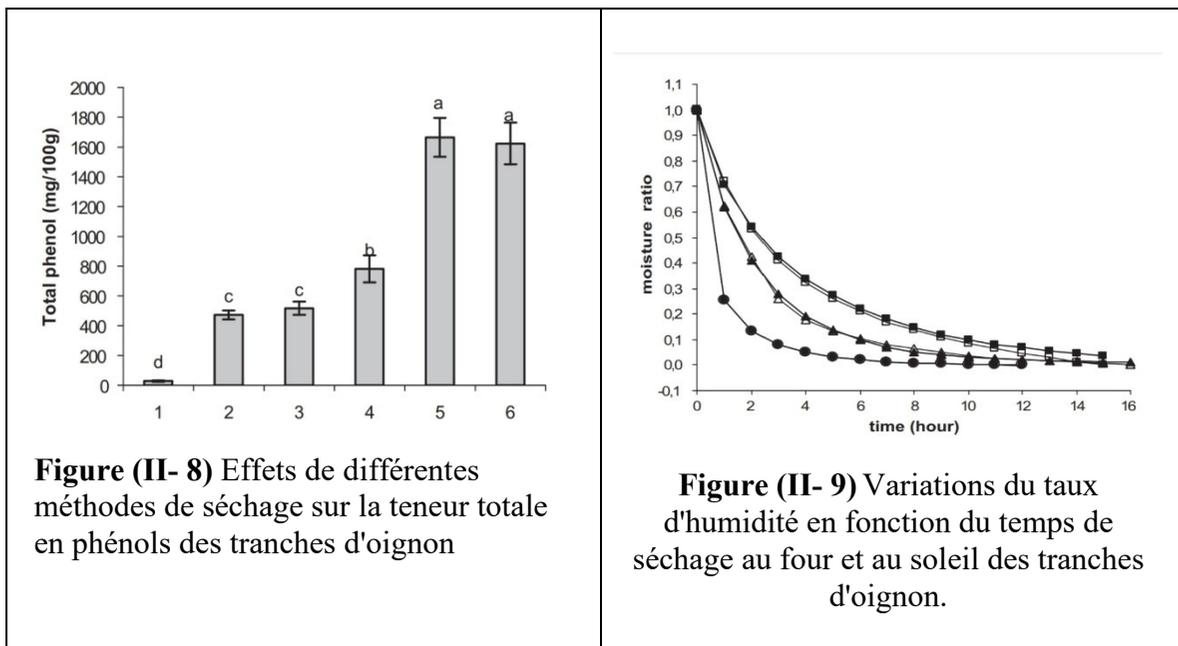
(Arslan, Derya, and Mehmet Musa Özcan. 2010). [6]

➤ Protocole :

Dans ce travail, des oignons séchés ont été utilisés, où ils sont épluchés manuellement et coupés en tranches d'environ 10,0 à 0,1 mm avec un couteau tranchant en acier inoxydable dans la direction perpendiculaire à l'axe vertical.

Dans ce travail, trois méthodes de séchage ont été utilisées : le séchage au four, le séchage solaire et le séchage au four à micro-ondes.

➤ Résultats :



➤ Conclusion :

Il a été atteint dans ce travail que le séchage aux micro-ondes était le plus rapide et donnait les valeurs D_{eff} les plus élevées. Le séchage par micro-ondes à faible puissance a retenu plus de composés phénoliques. Les concentrations minérales variaient selon la méthode et la température. Le séchage au four à 70°C présentait la teneur en minéraux la plus élevée. Des valeurs de couleur

optimales ont été observées avec un séchage au micro-ondes et au soleil à faible puissance. Le séchage au four à micro-ondes et au four à haute puissance à 70 °C présentait des valeurs de couleur moins souhaitables.

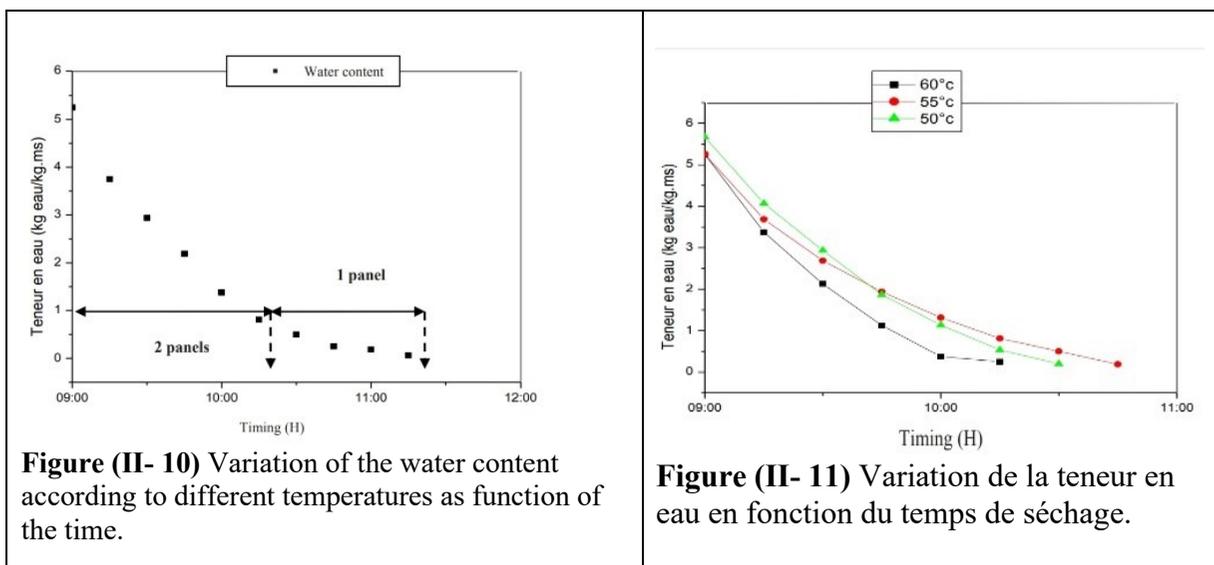
2.4. Pomme de terre :

(Chouicha, Samira, et al. 2013). [7]

➤ Protocole :

Dans ce travail, le séchage solaire hybride de tranches de pomme de terre (coupées en tranches circulaires d'une épaisseur de 2 mm) a été étudié par convection forcée dans un séchoir solaire indirect utilisant de l'énergie supplémentaire grâce à un réchauffeur Joule généré à partir de modules photovoltaïques connectés en parallèle.

➤ Résultats :



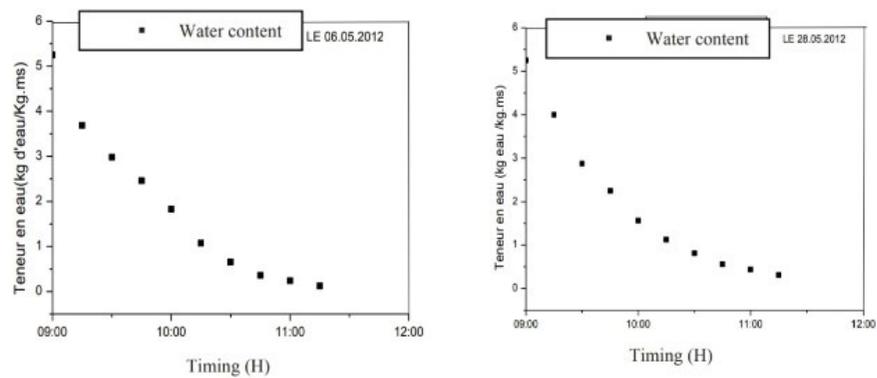


Figure (II- 12) Variation de la teneur en eau en fonction du temps (a) Associé à 1 panneau ; (b) associé à 2 panneaux



Figure (II- 13) Qualité visuelle de l'aspect de la pomme de terre séchée de la variété Désirée

➤ Conclusion :

Dans ce travail, les résultats suivants ont été obtenus : Avec l'utilisation d'un panneau solaire pour atteindre la teneur finale en eau de la pomme de terre ($x_f = 0,13 \text{ kg w / kg d m}$), le temps de séchage obtenu était de 3 heures. En cas de deux panneaux ce temps a été trouvé 2H45mn

La condition opératoire assurant un meilleur résultat a été trouvée comme mentionné ci-dessous : Par hybride (solaire, photovoltaïque) avec une optimisation du nombre de panneaux solaires connectés / durée de séchage / qualité à une vitesse maximale d'air de séchage en circulation de 0,51 m/s 2h45mn

Par séchage hybride (énergie électrique conventionnelle) à vitesse maximale, réalisé à :0,5 m/s pendant une durée de 1 h 15 min.

2.5. Piments rouges

(Nimrotham, Chatchawal, et al. 2017). [8]

➤ Protocole :

Dans ce travail, des piments rouges frais sont séchés. Des piments de taille uniforme ont été sélectionnés pour les expériences. Les valeurs de longueur moyenne des piments rouges étaient d'environ 6 à 8 cm. Dans cette expérience, 3 000 grammes de piment rouge étaient destinés au processus de séchage en serre et au processus de séchage à basse température. Les piments rouges sont séchés pendant la journée dans la salle de séchage avec séchage solaire, comme le montre la figure 3, et la nuit avec un système de séchage du piment à basse température. La superficie du séchoir est de 16 m².

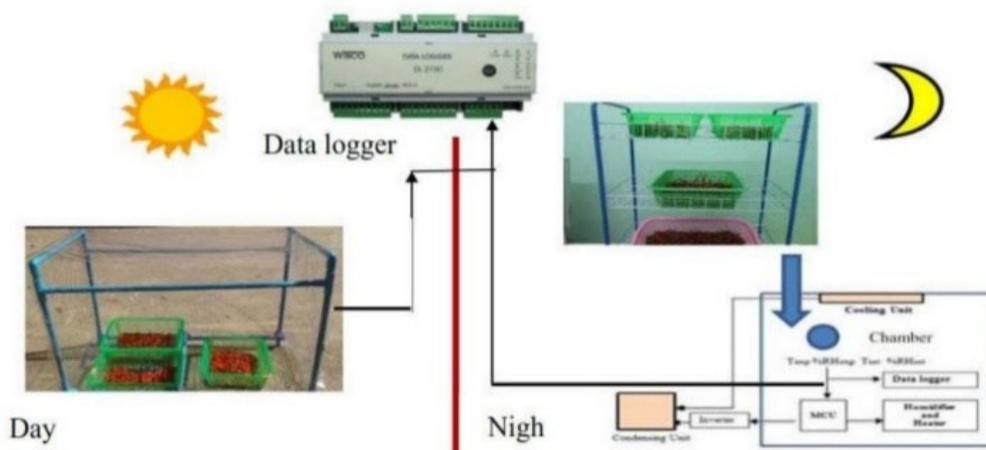


Figure (II- 14) Schéma des systèmes de séchage solaire et de séchage à basse température.

➤ Résultats :

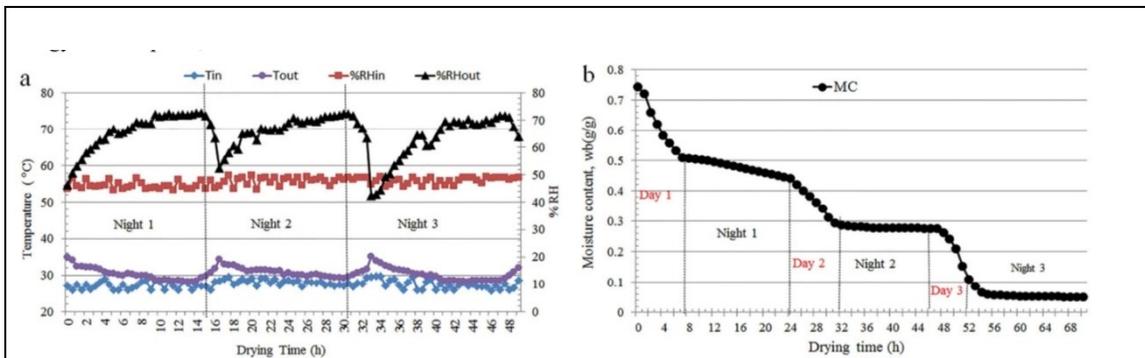


Figure (II- 15) Température de l'air (a) et humidité relative (b) de la chambre du séchoir pendant la journée.

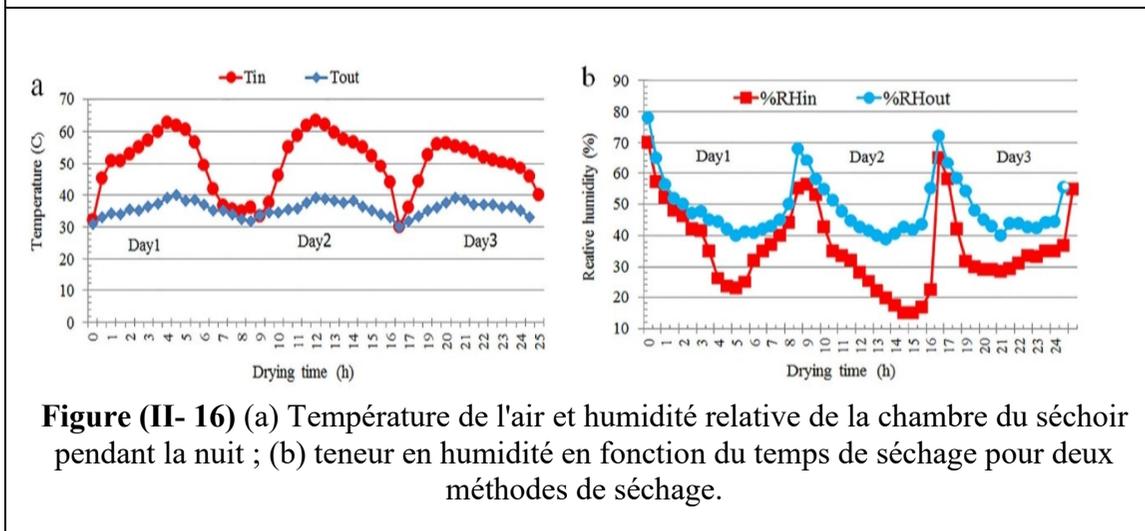


Figure (II- 16) (a) Température de l'air et humidité relative de la chambre du séchoir pendant la nuit ; (b) teneur en humidité en fonction du temps de séchage pour deux méthodes de séchage.

➤ **Conclusion :**

Cette recherche expérimentale sur le séchage du piment rouge montre que la teneur en humidité du piment est obtenue grâce à deux méthodes de séchage, le séchage direct au soleil conventionnel et le système de séchage à basse température. Les processus de séchage devaient passer d'une valeur initiale de 74 % à 13,5 % (wb) en 52 h. La teneur en humidité des processus de séchage est réduite en moyenne de 0,02 g/h (17h-17h) la nuit et le séchage solaire le jour de 0,193 g/h (9h-17h). Il est important de noter que dans ce système de séchage, les piments rouges sont séchés en ne les exposant pas à l'air chaud à haute température (<50°C) pendant une longue période, ce qui leur confère une couleur et un arôme brillants. Le contrôle de l'humidité relative de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage entraîne une réduction de l'activité de l'eau du piment séché, le champignon ne peut pas se développer.[16], ce qui est important pour prévenir l'aflatoxine.

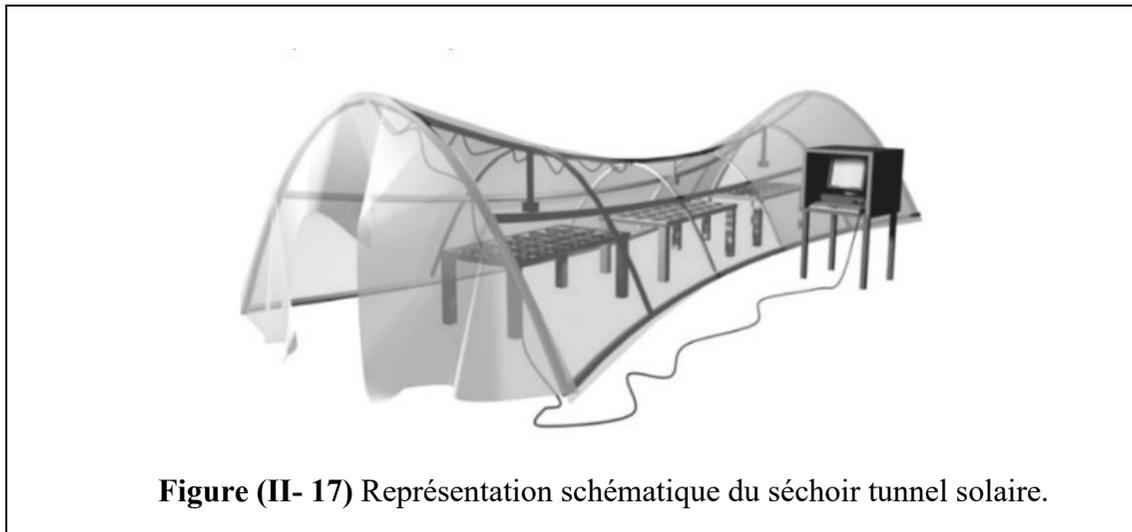
3. Sécher certains types de fruits :

3.1. Pommes

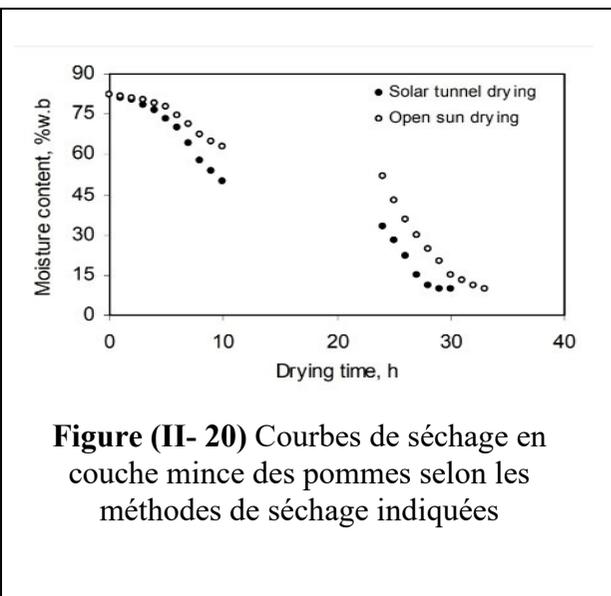
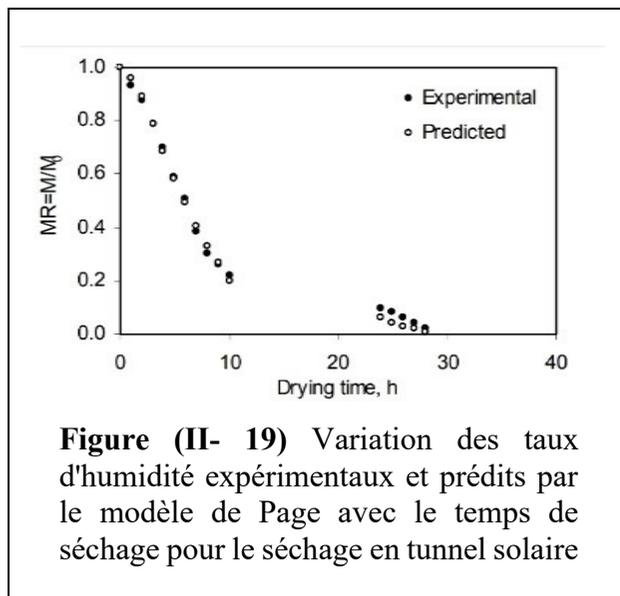
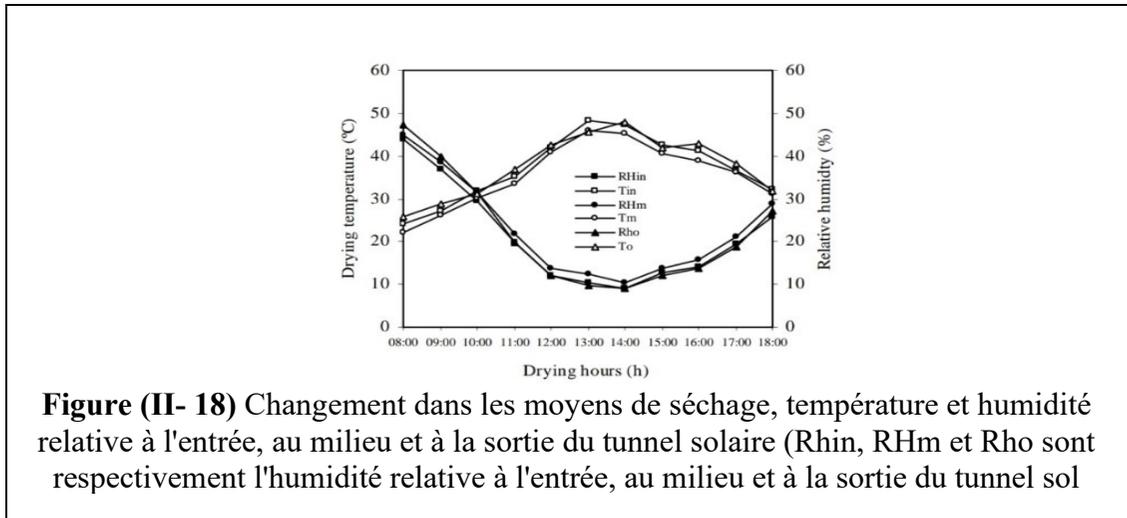
(Elicin, Ahmet Konuralp, and Kâmil Sacilik. 2005). [9]

➤ **Protocole :**

Dans ce travail, les pommes sont séchées dans un tunnel de séchage solaire (Figure (II-17)), des échantillons d'essai pesant 105 à 110 grammes ont été lavés à l'eau du robinet et non pelés, mais le noyau a été extrait à l'aide d'une carotteuse cylindrique d'un diamètre de 10 mm. Ensuite, les pommes sont coupées en tranches de 5 ± 2 mm d'épaisseur à l'aide d'une trancheuse manuelle. Environ 2,5 kg d'échantillons de tranches de pomme ont été utilisés pour mesurer le séchage. De plus, pour comparer les performances du séchoir à tunnel solaire avec celles du séchage au soleil ouvert, des échantillons témoins de pommes ont été placés sur un plateau près du séchoir et séchés simultanément dans les mêmes conditions météorologiques ...



➤ **Résultats :**



➤ **Conclusion :**

Le séchoir tunnel solaire a réduit la teneur en humidité des pommes de 82 % à 11 % en poids en 28 heures, comparé aux 32 heures nécessaires pour le séchage au soleil en plein air. Il a permis une réduction du temps de séchage jusqu'à 14,28 % par rapport au séchage en extérieur, tout en offrant une protection contre les nuisibles et les intempéries. De plus, les pommes séchées dans le séchoir tunnel solaire ont une couleur plus jaune et brillante.

3.2. Bananes

(Pan, Zhongli, et al. 2018). [10]

➤ **Protocole :**

Dans ce travail, les bananes sont séchées et d'abord pelées puis coupées en tranches de 5 mm d'épaisseur. Certains échantillons coupés ont été immergés dans une solution contenant 10 g/L d'acide ascorbique et 10 g/L d'acide citrique pendant 1 min avant tout traitement de séchage. Les tranches de banane ont été séchées à l'aide de diverses méthodes, notamment le rayonnement infrarouge, l'air chaud et la lyophilisation.

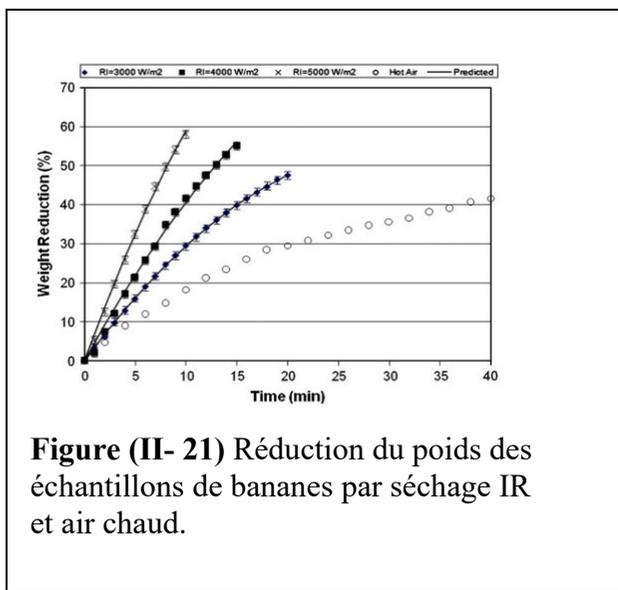


Figure (II- 21) Réduction du poids des échantillons de bananes par séchage IR et air chaud.

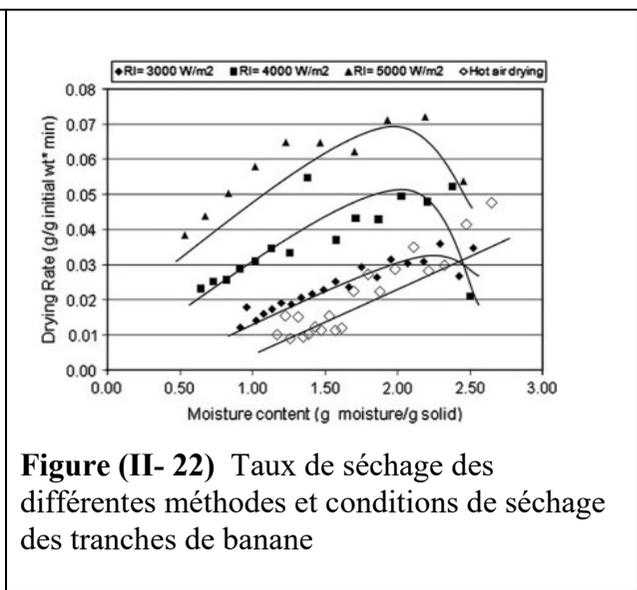


Figure (II- 22) Taux de séchage des différentes méthodes et conditions de séchage des tranches de banane

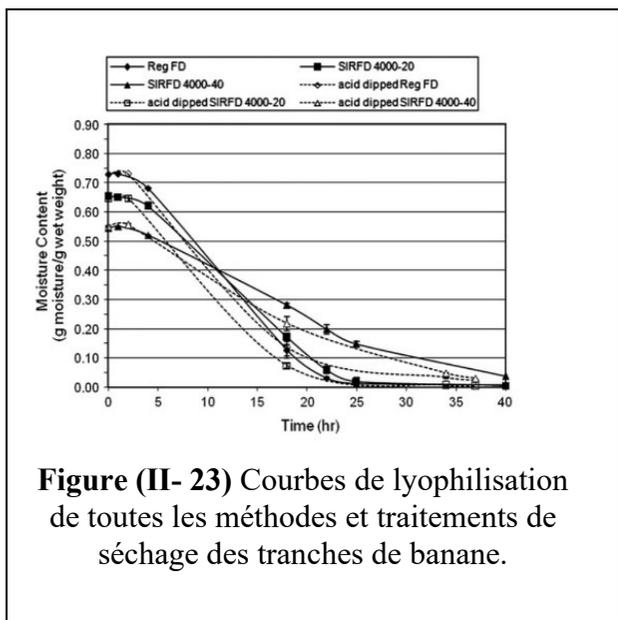


Figure (II- 23) Courbes de lyophilisation de toutes les méthodes et traitements de séchage des tranches de banane.

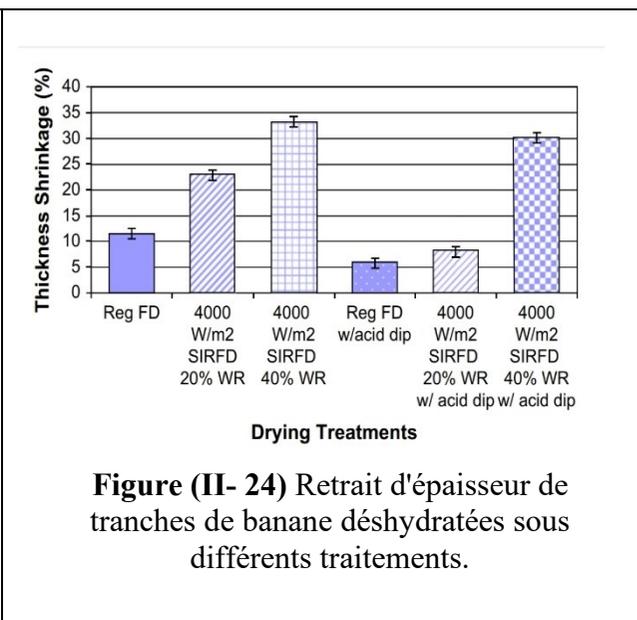


Figure (II- 24) Retrait d'épaisseur de tranches de banane déshydratées sous différents traitements.

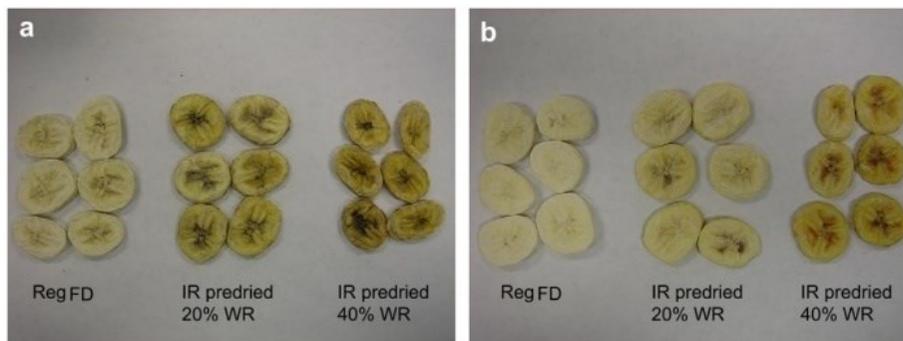


Figure (II- 25) Effet du traitement par trempage acide sur l'apparence des bananes séchées.
 (a) Échantillons de bananes non traitées, (b) Échantillons de bananes traitées à l'acide

➤ **Conclusion :**

Le séchage infrarouge (SIRFD) a montré un taux de séchage plus élevé que le séchage à l'air chaud, avec une augmentation remarquable de la vitesse de séchage avec l'intensité du rayonnement. Les chips de banane séchées avec SIRFD avaient une texture croustillante et une couleur dorée, mais la pré déshydratation IR n'a pas réduit le temps de lyophilisation ultérieure et a entraîné un rétrécissement plus important du produit fini. Le trempage acide a amélioré la couleur, réduit le temps de lyophilisation et le rétrécissement, mais a légèrement réduit le croustillant, bien que les produits traités avec SIRFD et trempage acide aient conservé un croustillant similaire ou supérieur avec une couleur plus blanche que la lyophilisation ordinaire.

SIRFD: Sequential infrared radiation and freeze-drying

3.3. Citrons:

(Chen, Ho-Hsien, Carlos Eduardo Hernandez, and Tzou-Chi Huang. 2005). [11]

➤ **Protocole :**

Des citrons frais ont été utilisés comme échantillons de séchage. Ils ont été coupés en tranches d'environ 4 à 6 mm d'épaisseur ; 650 à 700 g ont été préparés par lot de séchage. Trois méthodes ont été utilisées : le processus de séchage à l'air chaud à température constante à 60 °C, le séchage solaire extérieur et le séchage intérieur avec le séchoir expérimental (Figure (II-26)) avec une température augmentant de 36 à 52 °C à 2 degrés/h.

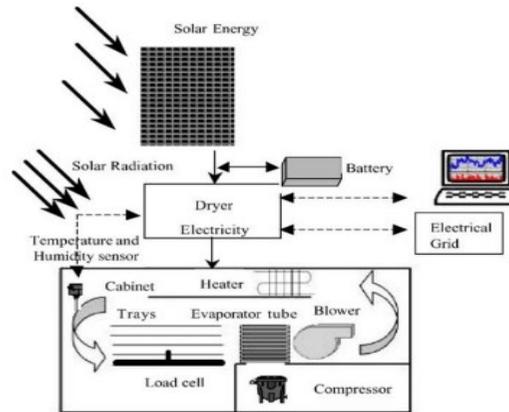


Figure (II- 26) Schéma schématique du séchoir solaire expérimental de type fermé associé au module PV comme source d'énergie électrique complémentaire et à son système de déshumidification.

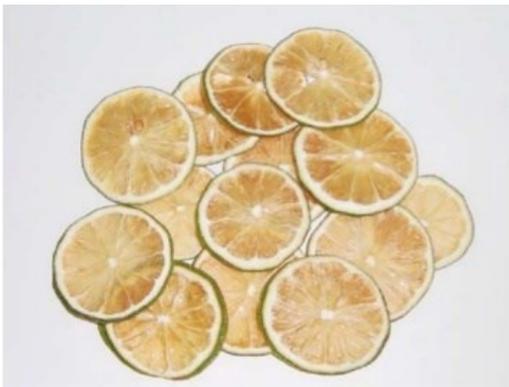


Figure (II- 27) Échantillons de citron séchés de couleur vive sous séchage solaire complémentaire en utilisant la méthode d'augmentation progressive de la température (de 36 à 52 C).



Figure (II- 28) Échantillons de citron séchés de couleur brun foncé utilisant la méthode de séchage à l'air chaud à température constante de 60 C.

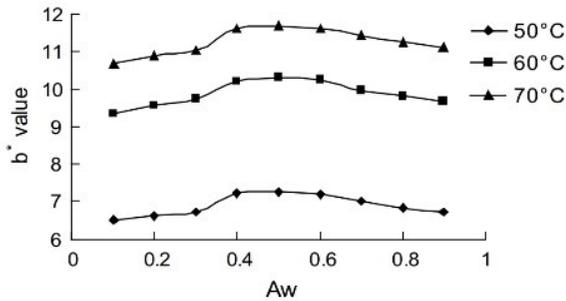


Figure (II- 29) Valeurs b^* en fonction de l'activité de l'eau (A_w) à différentes températures de séchage.

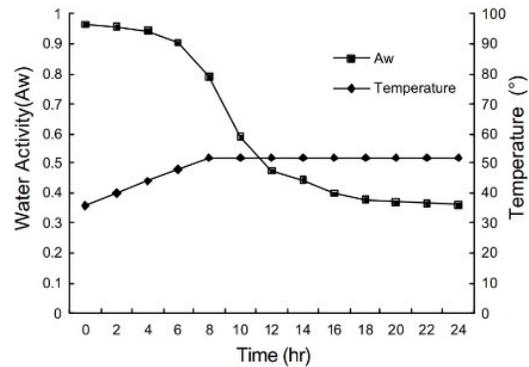


Figure (II- 30) Courbe A_w en fonction du temps obtenue pendant le séchage en utilisant des changements progressifs de température (36–52 C) et une exposition solaire complémentaire.

➤ Conclusion :

Les résultats indiquent que les tranches de citron séchées à l'aide d'un séchoir solaire de type fermé présentent de meilleurs niveaux généraux de qualité en termes de paramètres sensoriels.

3.4. Grappes :

(Fadhel, A., et al. 2005). [12]

➤ Protocole :

Dans cette étude, les raisins Sultanine sans pépins sont séchés. Les grappes de raisin sont trempées dans une solution alcaline (1% de soude) chauffée à 90°C. La période de trempage est d'environ deux à trois secondes ; l'immersion est effectuée deux à trois fois successivement. Des expériences de séchage ont été menées à l'extérieur, sous serre et dans un séchoir solaire à intervalles variables, de fin août à début septembre 2000 et 2001

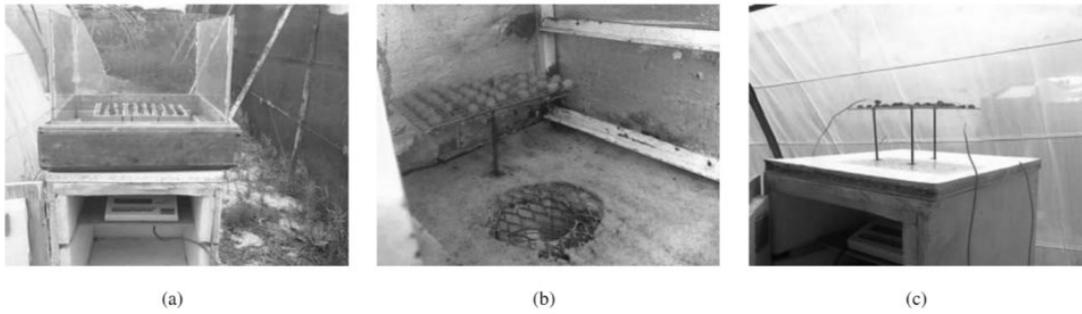


Figure (II- 31) Processus de séchage des raisins : (a) séchage au soleil à ciel ouvert (b) séchoir solaire à convection naturelle et (c) séchage en serre à tunnel solaire.

➤ **Résultats :**

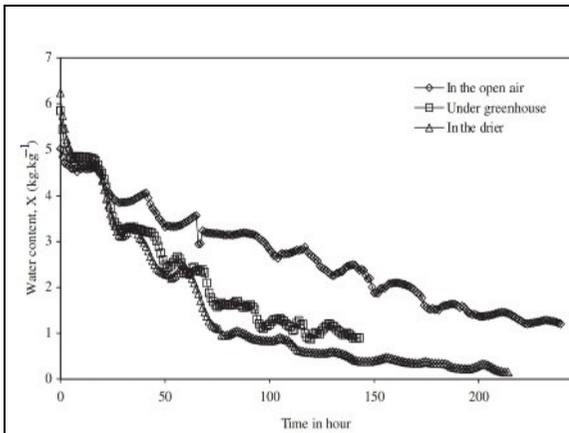


Figure (II- 32) Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage : (&) séchage au soleil ouvert, (-) séchoir solaire à convection naturelle et (&) séchage en serre tunnel solaire.

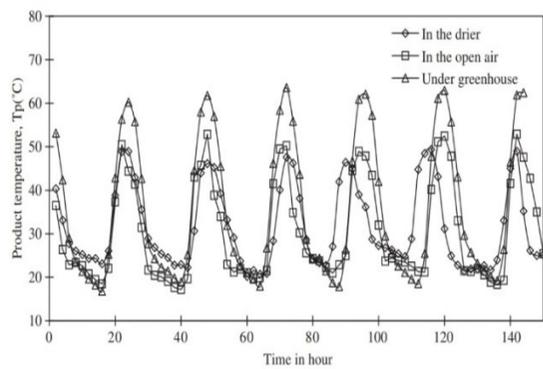


Figure (II- 33) Evolution de la température du produit en fonction du temps de séchage : (&) séchage en serre tunnel solaire, (&) séchage au soleil ouvert et (-) séchoir solaire à convection naturelle.

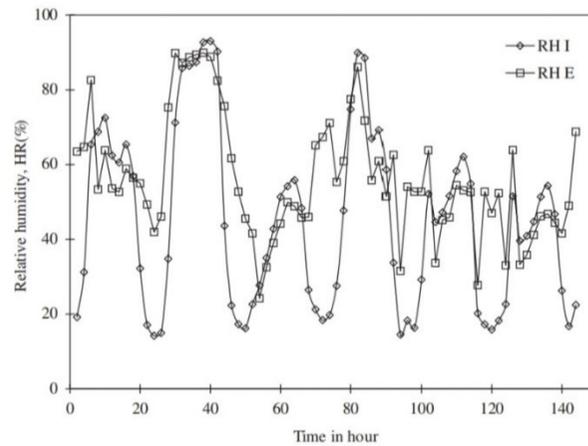


Figure (II- 34) Evolution de l'humidité relative dans le temps : (RH I) à l'intérieur de la serre et (RH E) à l'extérieur de la serre

➤ **Conclusion :**

Un tunnel de séchage dans une serre solaire a été découvert être satisfaisant et compétitif par rapport au processus de séchage solaire par convection naturelle. En effet, les temps de séchage dans la serre paysanne et dans le séchoir solaire à convection naturelle sont proches, respectivement de cinq jours et quatre jours. Le séchage sous serre solaire est avantageux par rapport au séchoir solaire.

3.5. Figues.

(Şahin, Utkucan, and Harun Kemal Öztürk. 2016). [13]

➤ **Protocole :**

Cette étude, la cinétique de séchage des figues de la variété Sarilop non traitées (fraîches) et prétraitées. Les figues ont été laissées entières (non tranchées et non pelées) pendant les expériences. Le prétraitement impliquait une déshydratation osmotique sous vide pulsé (PVOD), où les figues étaient immergées dans une solution de saccharose à 50 °Brix et 50 °C avec un rapport de masse solution/fruit de 4/1. L'imprégnation sous vide a été appliquée à 130 mbar pendant 15 minutes, suivie d'un traitement osmotique à pression atmosphérique pendant 165 minutes, ce qui a abouti à une période totale de prétraitement de 180 minutes. Les figues prétraitées et non traitées ont ensuite été séchées à des températures de 55, 65 et 75 °C dans un four à convection.

➤ **Résultats :**

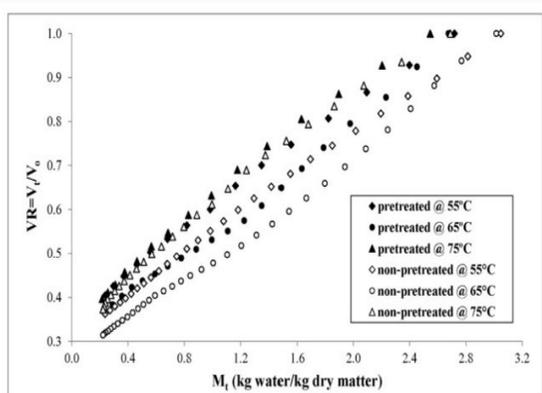


Figure (II- 35) Le rapport volume/teneur en humidité des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.

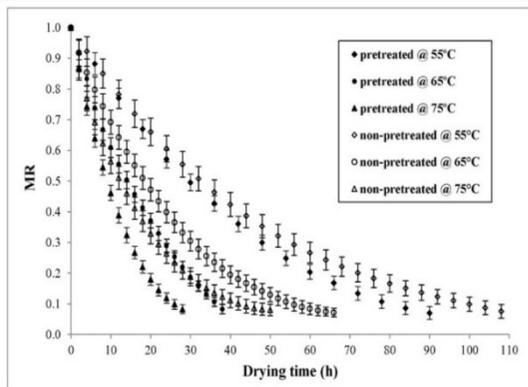


Figure (II- 36) Taux d'humidité en fonction du temps de séchage pour des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.

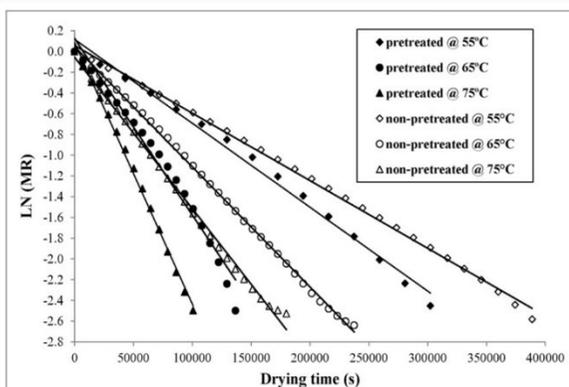


Figure (II- 37) : Rapport logarithmique d'humidité (ln(MR)) en fonction du temps de séchage pour des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75°.

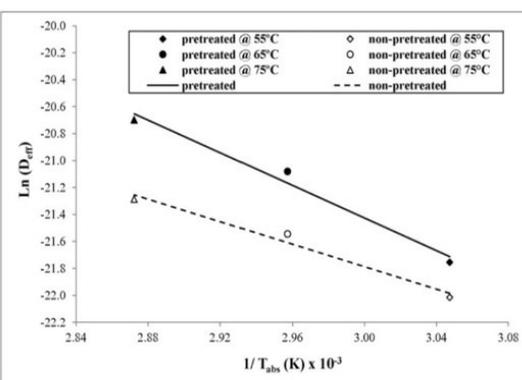


Figure (II- 38) Relation de type Arrhenius entre la diffusivité efficace de l'humidité pour les figes prétraitées et non prétraitées.

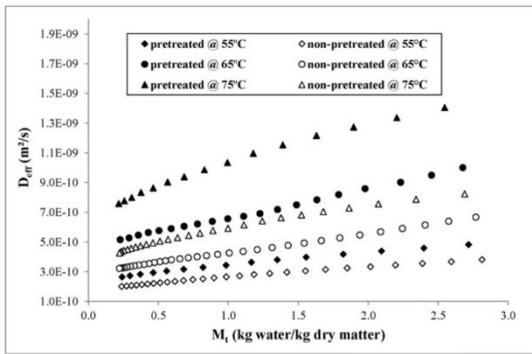


Figure (II- 39) Diffusivité effective de l'humidité en fonction de la teneur en humidité pour les figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C

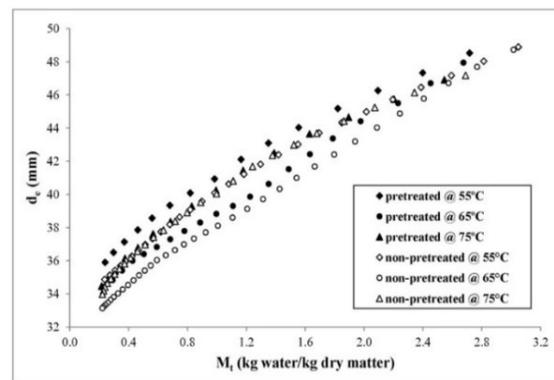


Figure (II- 40) Le diamètre géométrique moyen en fonction de la teneur en humidité des figes prétraitées et non prétraitées séchées à 55, 65 et 75 °C.

➤ **Conclusion :**

L'étude a révélé que l'augmentation de la température de séchage réduisait le temps de séchage des figes non traitées et traitées. Les figes traitées ont séché plus rapidement que celles non traitées, ce qui indique que la PVOD (déshydratation osmotique sous vide) a raccourci la période de séchage. Les figes non traitées ont subi un rétrécissement plus important que les figes traitées. Les valeurs de diffusivité effective de l'humidité (D_{eff}) étaient plus élevées pour les figes traitées à toutes les températures, et D_{eff} augmentait avec la température de séchage pour les figes traitées et non traitées. L'énergie d'activation (E_a) était inférieure pour les figes non traitées (34,68 kJ/mol) par rapport aux figes traitées (50,27 kJ/mol). L'évaluation sensorielle a montré que les figes traitées au PVOD avaient une meilleure couleur, saveur, odeur, texture et une meilleure acceptabilité globale. L'utilisation du PVOD dans l'industrie alimentaire peut entraîner des avantages économiques en réduisant les coûts de séchage.

PVOD: Pulsed vacuum osmotic dehydration

4. Conclusion

De cette étude de référence de quelques travaux sur le séchage des légumes et des fruits dans le domaine du séchage, nous concluons que le séchage solaire est un domaine de recherche très large et approfondi, tant sur le plan expérimental que théorique.

Sur la base des résultats et des observations obtenues après revue à travers une brève étude bibliographique, il a été jugé utile de commencer une étude expérimentale basée sur l'effet de certains facteurs physiques sur la cinétique de séchage (vitesse de séchage), dans le but de déterminer les

courbes caractéristiques de séchage. à partir des résultats expérimentaux obtenus sur le site expérimental près du hall technologique de l'Université Mohamed Khedr à Biskra.

Références

- [1]. Tarik, H. A. D. I. B. I., et al. "Experimental investigation and mathematical modeling of hot air convective drying of tomato paste under near solar drying operating conditions. Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"10.1 (2020).
- [2]. Slavin, Joanne L., and Beate Lloyd. "Health benefits of fruits and vegetables." *Advances in nutrition* 3.4 (2012): 506-516.
- [3]. Hasan, Mahmood Ul, et al. "Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review." *Journal of Food Processing and Preservation* 43.12 (2019): e14280.
- [4]. Kam, Sié, et al. "Analysis of Tomato Drying by Using a Solar Tower Dryer in Natural Convection." *Asian Journal of Physical and Chemical Sciences* 4.2 (2017): 1-8.
- [5]. Doymaz, Ibrahim. "The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices." *Journal of food engineering* 79.1 (2007), 243-248.
- [6]. Arslan, Derya, and Mehmet Musa Özcan. "Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices." *LWT-Food Science and Technology* 43.7 (2010): 1121-1127.
- [7]. Chouicha, Samira, et al. "Solar drying of sliced potatoes. An experimental investigation." *Energy Procedia* 36 (2013): 1276-1285.
- [8]. Nimrotham, Chatchawal, et al. "Experimental research of drying red chili by two methods: solar drying and low-temperature system drying." *Energy Procedia* 138 (2017): 512-517.
- [9]. Elicin, Ahmet Konuralp, and Kâmil Sacilik. "An experimental study for solar tunnel drying of apple." *Tarim Bilimleri Dergisi* 11.2 (2005): 207-211.
- [10]. Pan, Zhongli, et al. "Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying." *LWT-Food Science and Technology* 41.10 (2008): 1944-1951.
- [11]. Chen, Ho-Hsien, Carlos Eduardo Hernandez, and Tzou-Chi Huang. "A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer." *Solar Energy* 78.1 (2005): 97-103.
- [12]. Fadhel, A., et al. "Study of the solar drying of grapes by three different processes." *Desalination* 185.1-3 (2005): 535-541.

[13]. Şahin, Utkucan, and Harun Kemal Öztürk. "Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L)." *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 36 (2016): 104-111.

Chapitre III
Étude
expérimentale

Chapitre III Etude Expérimentale.

1. Introduction :

Le séchage solaire est utilisé en Algérie en raison de l'abondance de rayonnement solaire, et son but est de conserver les produits agricoles pour une utilisation ultérieure.

Ce chapitre vise à décrire le comportement de séchage solaire d'un produit agricole (pastèque) à l'aide d'un séchoir solaire indirect établi et d'une chambre de séchage à convection naturelle et forcée. Par ailleurs, les expérimentations ont été menées à l'Université de Biskra et mises en œuvre au cours de la période mai 2024.

2. Localisation des expériences et climat de zone :

2.1 Lieu des expériences :

Les expériences ont été réalisées près du hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra, qui est situé à $34^{\circ} 48'$ de latitude et $5^{\circ} 44'$ de longitude, dans le sud-est de l'Algérie avec 120 m d'altitude par rapport au niveau de la mer, la ville se situe à environ 400 km d'Alger.

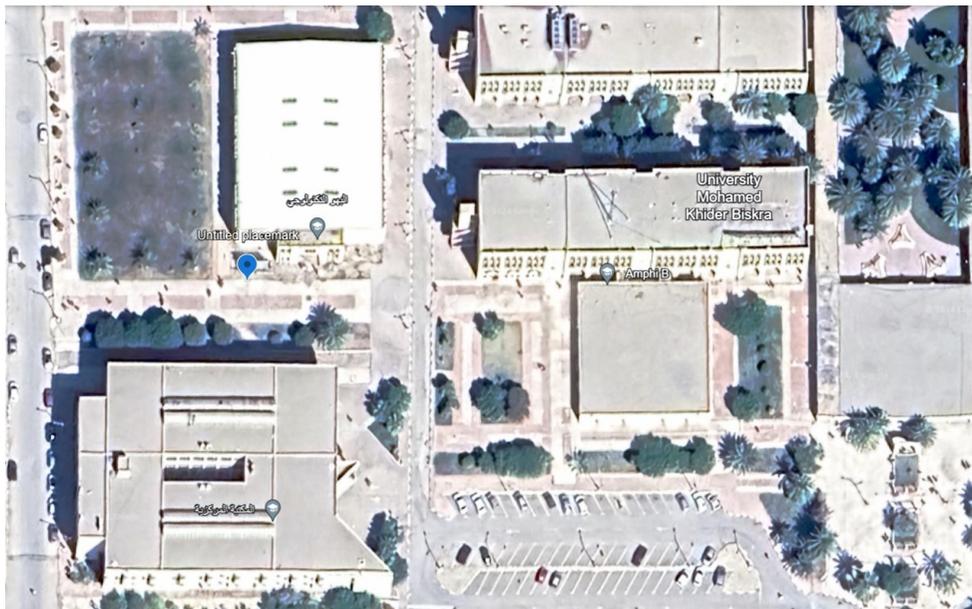


Figure (III- 1) Image satellite de la zone d'expérience.

2.2 Climat zone expérimentale :

Biskra a lieu dans la région aride, elle se caractérise par un été très chaud et sec ; la température moyenne est de 43,5 ° C avec 12% d'humidité relative en moyenne, et un hiver très froid ; température minimale moyenne de 4 ° C avec une humidité relative maximale moyenne de 89%.

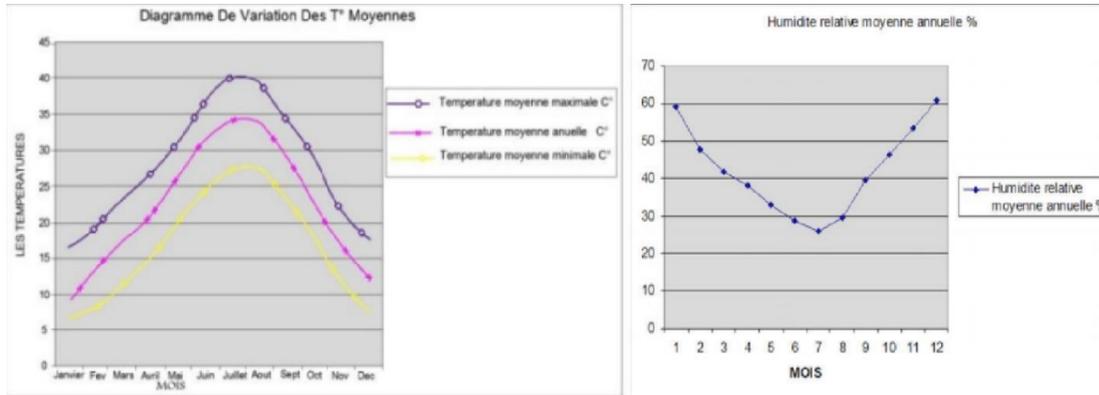


Figure (III- 2) Courbes de température et d'humidité relative de Biskra.

3. Étude expérimentale :

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le séchage d'un produit agricole (pastèque) à l'aide d'un capteur solaire et d'une salle de séchage nouvellement conçue et construite dans le hall du hall technologique de l'Université Mohamed Khider de Biskra.



Figure (III- 3) Configuration expérimentale (capteur solaire avec chambre de Séchage)

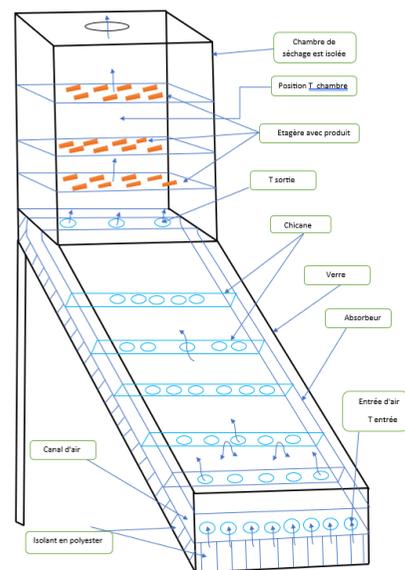


Figure (III- 4) Fabrication du capteur solaire avec de chambre de séchage.

3.1 Fabrication de chambre de séchage :

La pièce est constituée de bois de plusieurs essences et est protégée de tous côtés par une isolation de bonne qualité. Ils sont connectés au panneau solaire directement à travers les bouches d'aération pour répartir cet air sur le produit séché ; Ses dimensions sont de 50 cm x 30 cm x 30 cm.



Figure (III- 5) Configuration expérimentale de la chambre de séchage.

La grille : est un support sur lequel le produit est placé et qui comporte des ouvertures pour permettre à l'eau de s'écouler, fixé parallèlement dans la chambre, voir la figure (III-6).



Figure (III- 6) Support du produit de séchage.

3.2 Procédure expérimentale :

Les observations expérimentales ont été enregistrées entre 9h00 et 16h00 en mai 2024. Des tranches de pastèque rouge à faible épaisseur, de 2, 4 et 7 mm, ont été placées sur des plaques rectangulaires en treillis, utilisées pour accueillir différentes quantités de nos échantillons. Ces plaques ont été placées sur une balance électronique pour déterminer la perte d'humidité chaque heure, voir la figure (III-7).



Figure (III- 7) Une balance électronique numérique.

La température a été mesurée à l'aide du capteur de température LCD comme indiqué sur la figure (III-8), à différents endroits, à savoir la température d'entrée du séchoir, la température de surface du produit, l'entrée et la sortie de la chambre de séchage et l'entrée du capteur solaire. Comme le montre le schéma.



Figure (III- 8) capteur de température LCD

Un hygromètre (modèle PCE-555) utilisé pour mesurer l'humidité relative de l'extérieur.



Figure (III- 9) Hygromètre (modèle PCE-555)

Un pyranomètre (modèle Amproch SOLAR-100) appareil robuste et facile à utiliser pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire par unité de W / m^2 comme le montre la figure (III-10).



Figure (III- 10) pyranomètre (modèle Amproch SOLAR-100).

Un anémomètre numérique (modèle PCE – TA 30) voir figure (III-11), ayant une lisibilité de 0,01 m / s, a été utilisé pour mesurer la vitesse du vent.



Figure (III- 11) Un anémomètre numérique (modèle PCE – TA 30)

Le régulateur de tension voire la figure (III-12) a été utilisé pour régler la tension du moteur électrique régulateur de tension.



Figure (III- 12) Voltage régulateur

Le Moteur d'aspiration d'air qui permet au flux forcé de convertir la température chaude dans la chambre de séchage vers l'extérieur.



Figure (III- 13) Représente de Moteur d'aspiration d'air.

Les observations expérimentales ont été enregistrées toutes les 30 minutes. La mesure s'est arrêtée lorsque la masse constante d'échantillons a été complétée. La différence de masse donnait directement la quantité d'eau évaporée pendant une période de temps donnée. Epaisseur 2, 4 et 7 mm. Les produits humides et secs sont proposés sur la base d'un débit naturel et d'un débit d'air 0.0083, 0.016 et 0.023 kg/s

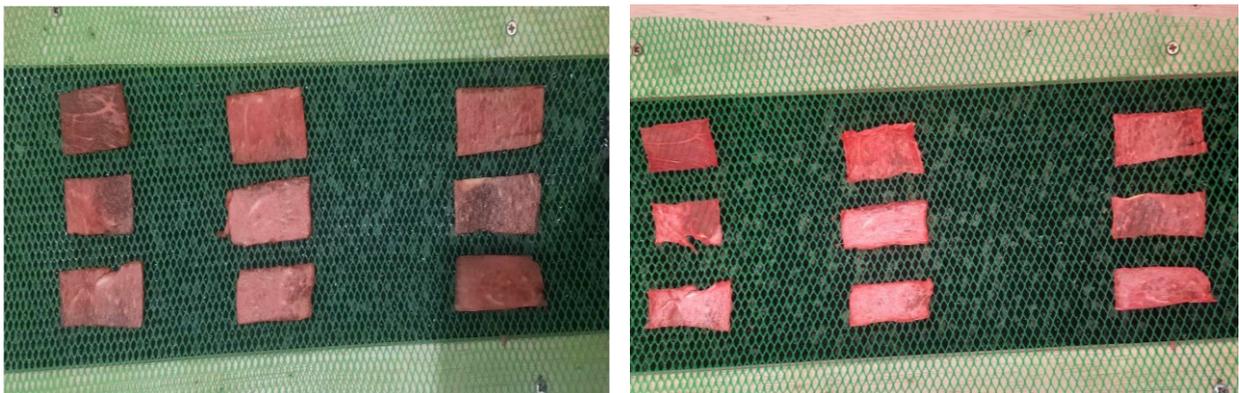


Figure (III- 14) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, naturel

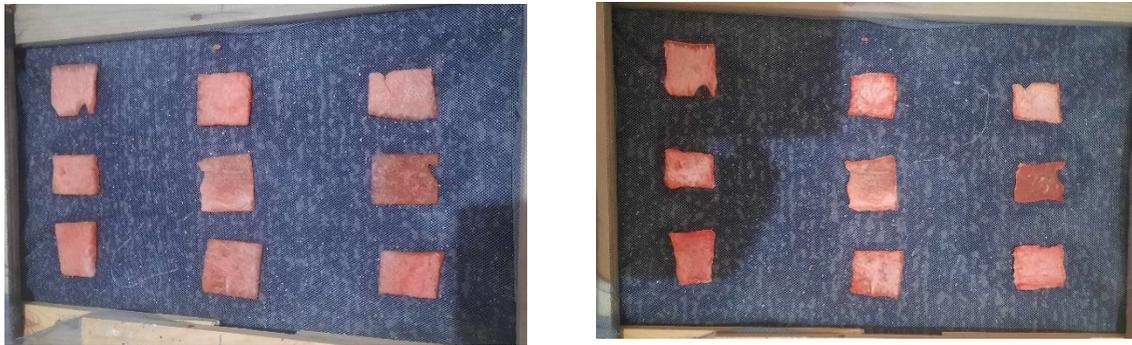


Figure (III- 15) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, naturel



Figure (III- 16) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, naturel

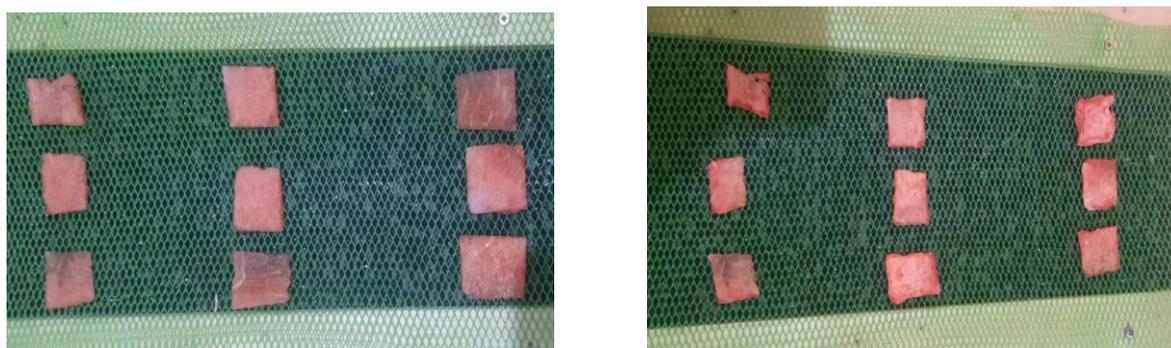


Figure (III- 17) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s

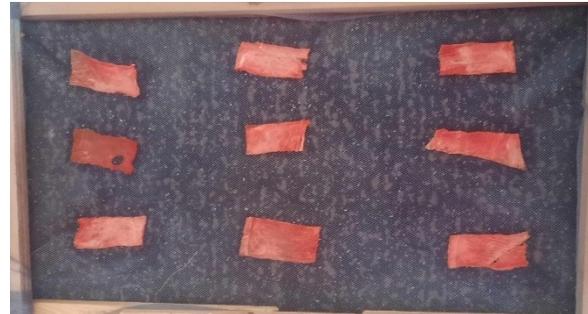
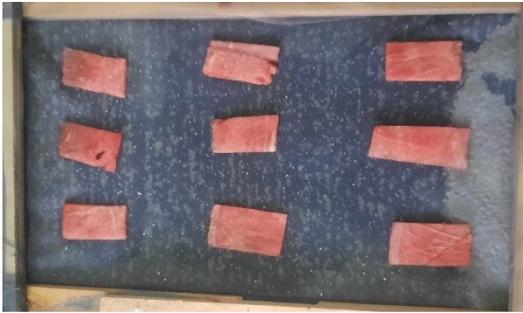


Figure (III- 18) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s

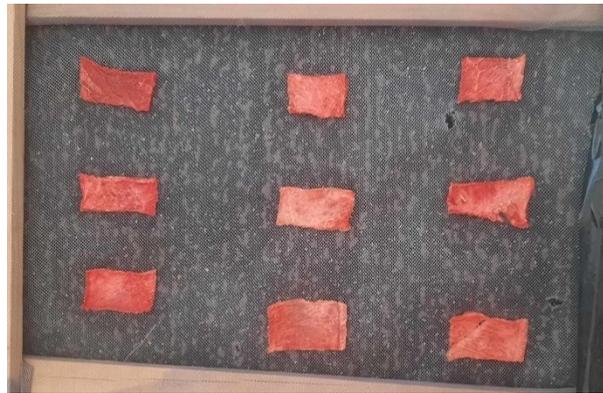


Figure (III- 19) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,0083 Kg /s

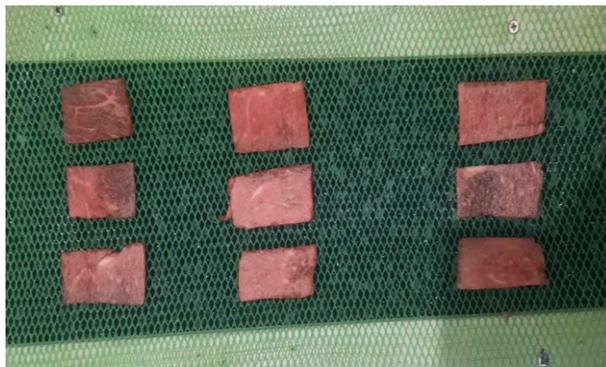


Figure (III- 20) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s



Figure (III- 21) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s

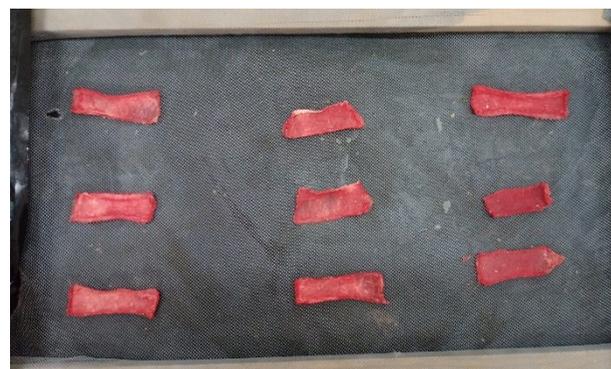


Figure (III- 22) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,016 Kg /s.

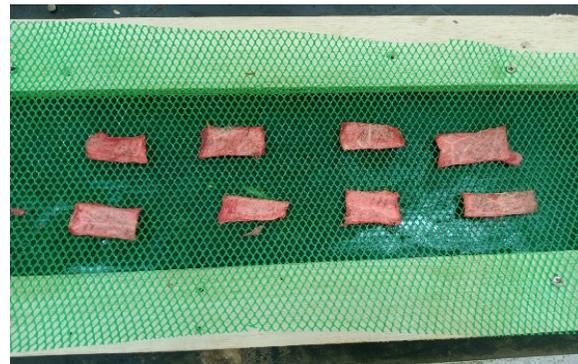
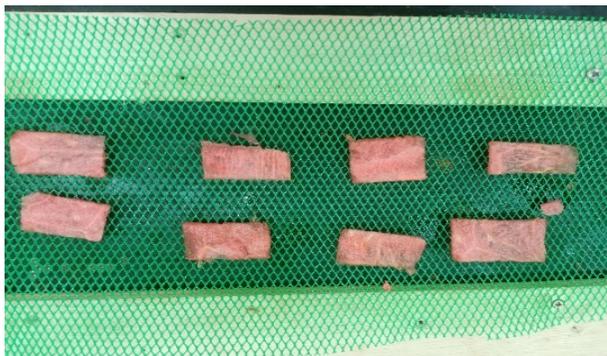


Figure (III- 23) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 2 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s.



Figure (III- 24) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 4 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s.

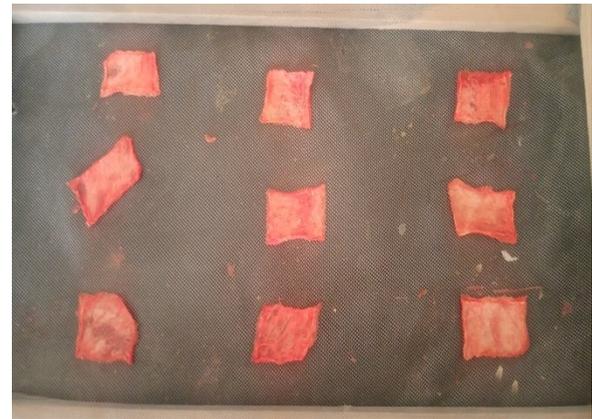
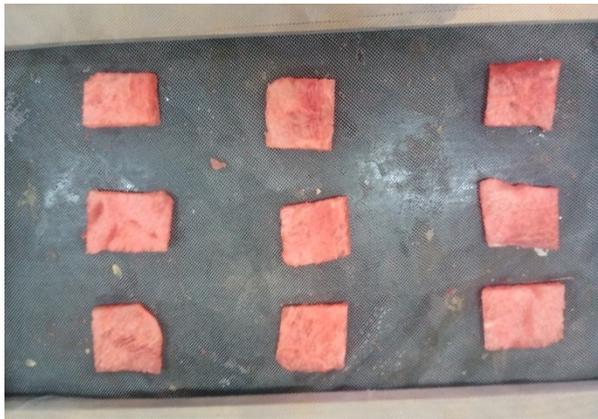


Figure (III- 25) Tranches de pastèque rouge humides et séchées de 7 mm d'épaisseur, le débit 0,023 Kg /s

4. Mode travail :

4.1. Déterminer l'échantillon sur une base humide :

Il est donné par la relation mathématique suivante :

$$Xh = \frac{Mh - Ms}{Mh} \quad (III- 1)$$

- X : teneur en eau à base humide (Kg eau/kg h)
- Mh : masse humide de produit (g)
- Ms : masse sèche de produit (g)

4.2. Déterminer l'échantillon sur une base sèche :

Il est donné par la relation mathématique suivante :

$$X_S = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (III- 2)$$

- X : teneur en eau à base sèche (Kg eau/kg h)

4.3. Déterminer la perte de masse :

Il est donné par la relation mathématique suivante :

$$P = \frac{Mi - Mt}{Mi} \quad (III- 3)$$

- P : perte de masse du produit (Kg eau/kg)
- Mi : masse initiale de produit (kg)
- Mt : masse du produit variant dans le temps (kg)

Chapitre IV

résultats et

discussion

Chapitre IV : Résultats Et Discussion

1. Introduction:

Les résultats obtenus durant cette étude sont présentés puis commentés à travers ce chapitre. Pour cela, on présentera au début l'évolution de la température à l'entrée, à la sortie et à l'intérieur de la chambre de séchage ainsi que l'évolution du rayonnement solaire pendant la durée l'expérience. Le plus important de cette étude c'est bien la variation de la teneur en eau du produit à base humide et à base sèche seront présentés ensuite pour différents débits d'air et pour différentes épaisseurs du produit à sécher. D'autres résultats seront exposés par la suite ce qui permettra de construire une bonne idée sur notre étude.

2. Influence du rayonnement solaire sur la température du capteur avec la chambre de séchage :

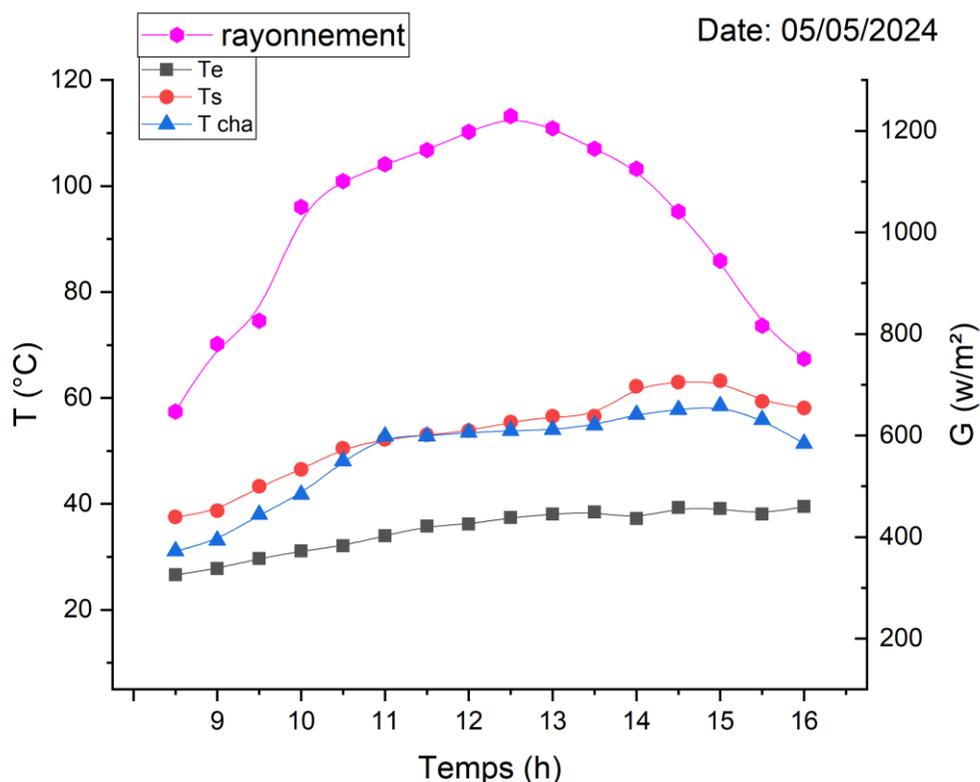


Figure (IV- 1) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps en mod naturel

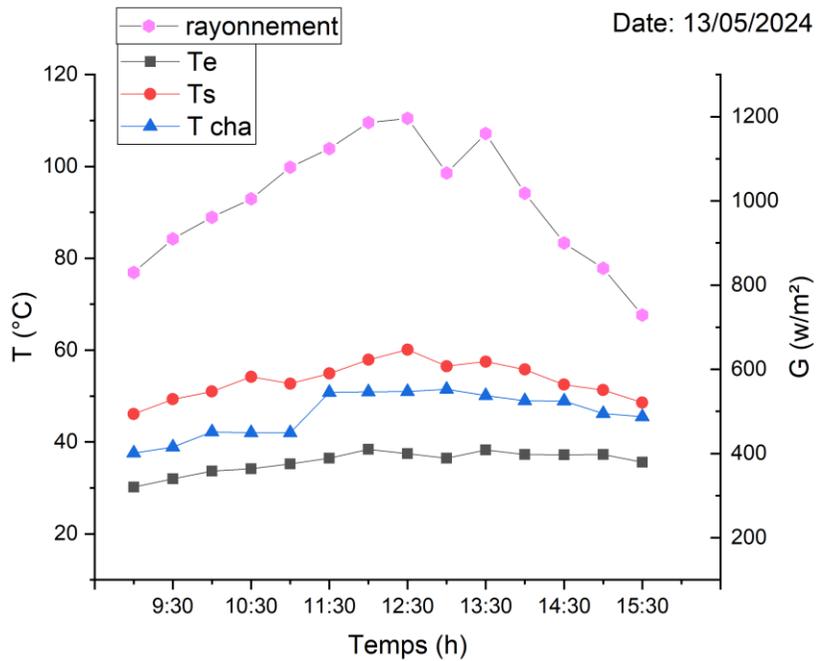


Figure (IV- 2) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps, débit=0.0083kg/s

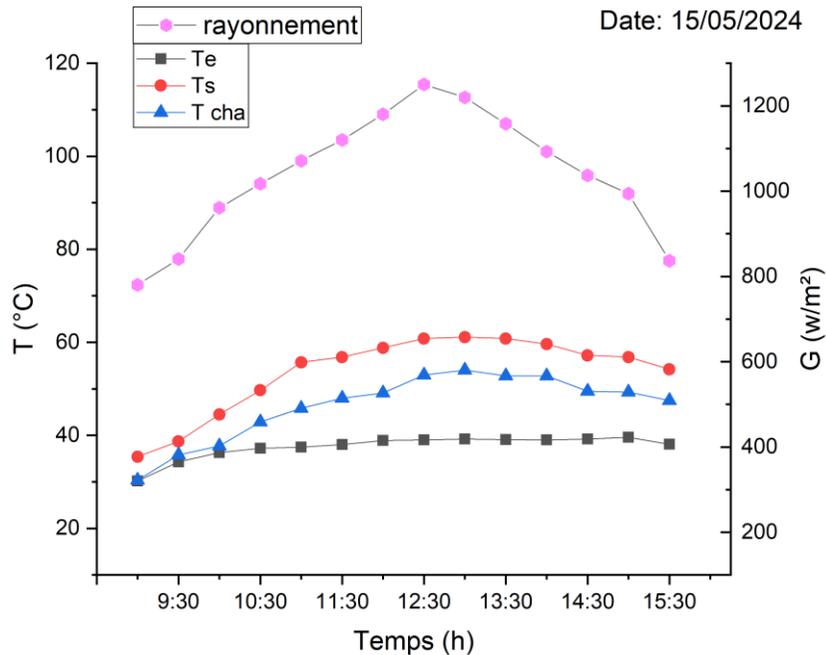


Figure (IV- 3) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps, débit=0.016kg/s

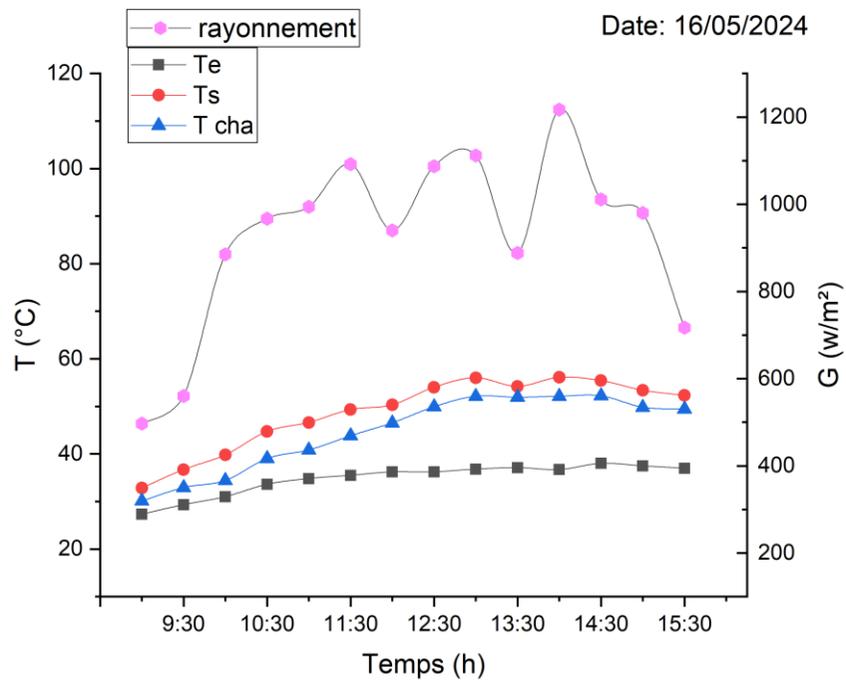


Figure (IV- 4) Variation de température (entrée-sortie) du capteur avec la chambre de séchage et rayonnement solaire en fonction du temps, débit=0.023kg/s

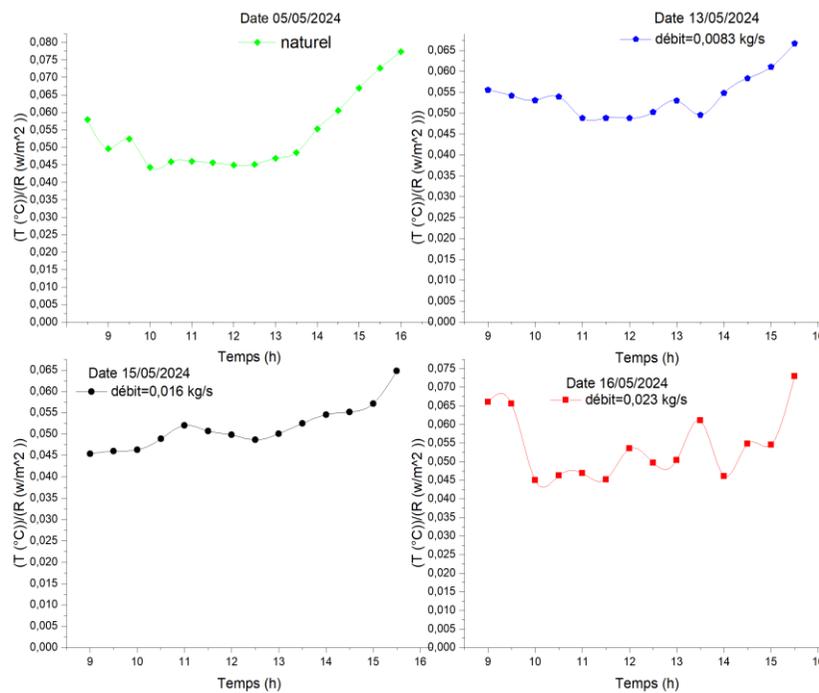


Figure (IV- 5) L'effet rayonnement solaire sur la température du capteur (sortie) en fonction du temps.

Les figures (IV-1), (IV-2), (IV-3), (IV-4) et (IV-5), présentent les courbes de l'effet de l'intensité du rayonnement solaire sur les températures. Du capteur (entrée et sortie) Et à l'intérieur de chambre de séchage en fonction du temps dans la journée avec la différence de débit d'air (naturel, force) et. Le produit a été séché pendant 4 jours distincts à l'aide d'un capteur solaire. Les figures montrent que la température à l'intérieur du panneau solaire est basse le matin et commence à augmenter considérablement lorsque le rayonnement solaire atteint son maximum vers midi et commence à diminuer le soir, ce qui montre l'effet du rayonnement sur les températures et par conséquent sur tout le phénomène du séchage.

3. La Variation du teneur en eau base humide :

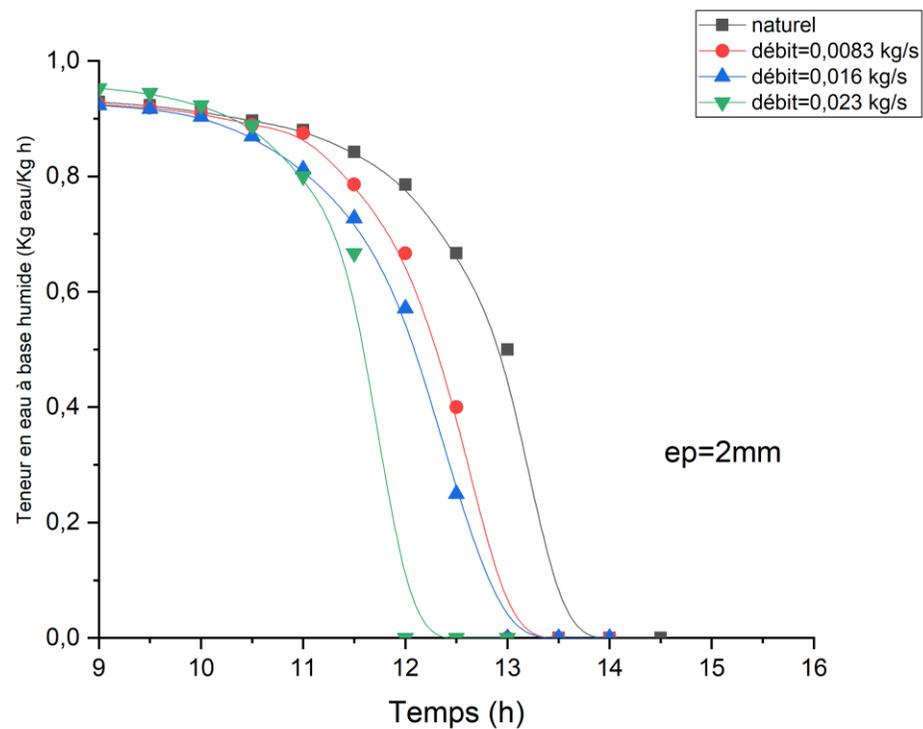


Figure (IV- 6) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 2mm

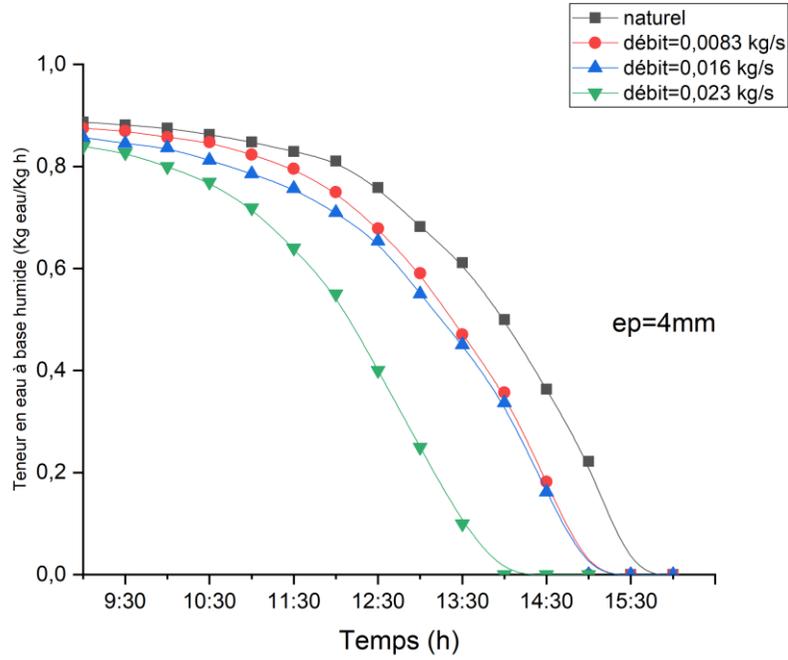


Figure (IV- 7) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 4mm

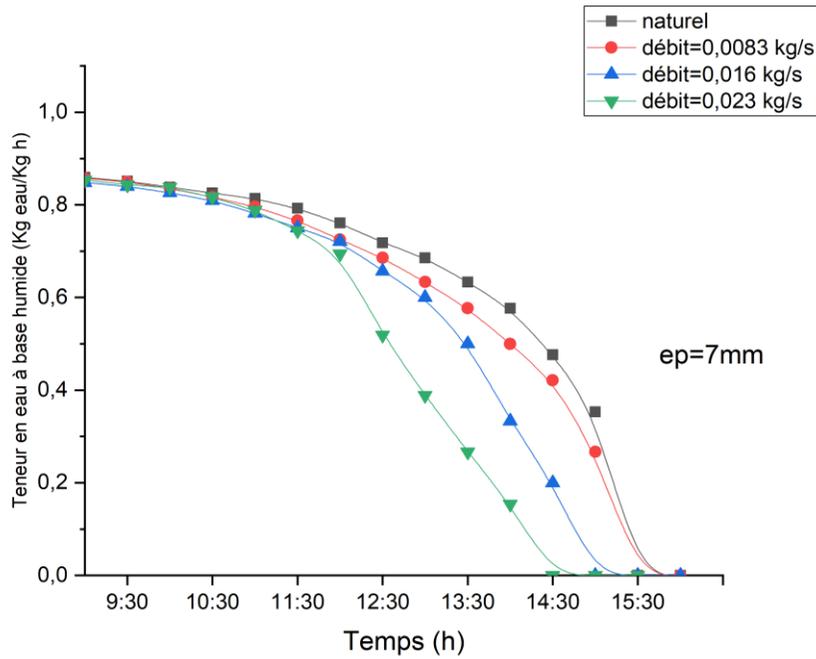


Figure (IV- 8) Le changement teneur en eau à base humide en fonction du temps, épaisseur = 7mm

Les figures (IV-6), (IV-7) et (IV-8) ; montrent l'évolution de la teneur en eau basée sur l'humidité en fonction du temps de séchage. Nous voyons que le processus de séchage commence à la teneur en eau initiale d'environ 1 kg d'eau/kg et poursuit à diminuer jusqu'à ce que la teneur en eau finale 0 kg d'eau/kg soit atteinte, où la teneur en eau diminue continuellement avec le temps de séchage. Le temps nécessaire pour atteindre une teneur en eau spécifique inférieure à la teneur en eau initiale diminue à mesure que le débit d'air de séchage augmente ; Plus le débit d'air est élevé, plus le séchage est rapide. Par exemple, le séchage d'une épaisseur de 2 mm prend normalement le plus de temps, environ 5 heures, alors qu'il prend moins de temps avec un débit d'air de 0,0083 kg/s et est le plus rapide avec un débit d'air de 0,023 kg/s. Il est également démontré qu'augmenter l'épaisseur du produit réduit le temps de séchage.

4. La Variation de la teneur en eau du produit à base sèche :

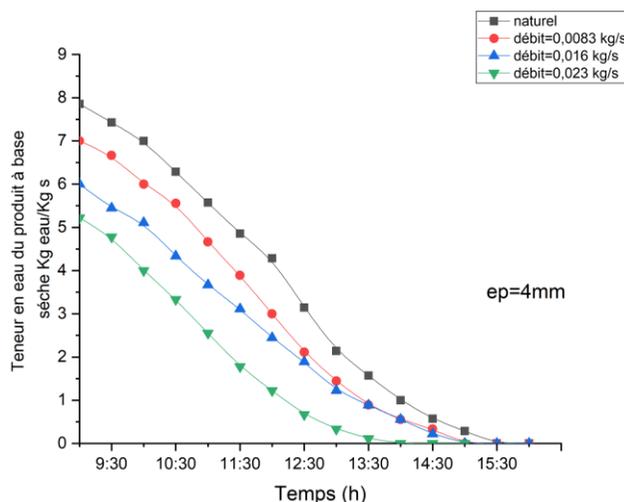


Figure (IV- 9) L'évolution de la teneur en eau à base séché fonction du temps, épaisseur = 2mm

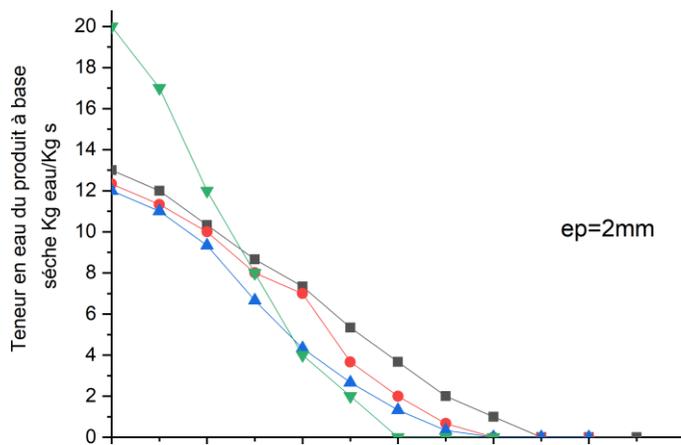


Figure (IV- 10) Evolution de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps, épaisseur = 4mm

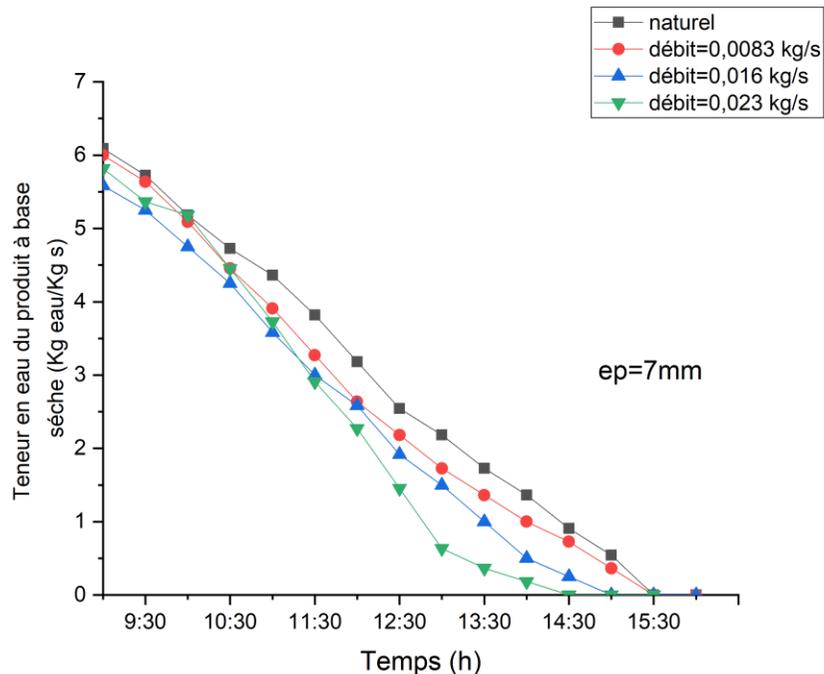


Figure (IV- 11) Evolution de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps, épaisseur = 7mm

Les figures (IV-9) (IV-11) (IV-11) montrent l'évolution de la teneur en eau (base sèche) en fonction du temps de séchage, où l'on remarque que le séchage a débuté avec une valeur de la teneur en eau initiale élevée. Et continue jusqu'à ce que la teneur finale en eau des échantillons soit nulle. La teneur en eau diminue continuellement avec le temps de séchage.

Le temps nécessaire pour atteindre une teneur en eau finale par rapport à la teneur en eau initiale diminue à mesure que le débit d'air de séchage augmente, par exemple à débit normal avec une épaisseur de 7 mm, il faut un temps de séchage le plus long (6 heures 30 minutes) avec le temps de séchage atteint. (5 heures 30 minutes) avec un débit d'air (0,023 kg/s). Le temps de séchage diminue au fur et à mesure que l'épaisseur est plus petite et que le débit d'air est plus grand. A 4 mm, normalement, le temps de séchage est d'environ (6. Heures et 30 minutes). Le temps de séchage diminue en augmentant le débit de 0,0083 puis 0,016 kg/s jusqu'à atteindre un débit de 0,023 kg/s où le séchage durera (5 heures et 30 minutes).

À une épaisseur de 2 mm, le temps de séchage le plus rapide est d'au moins 3 heures à un débit de 0,023 kg/s, et il commence à diminuer avec la décroissance du débit d'air jusqu'au cas de la convection naturelle où il atteint (4 heures et 00 minutes).

5. Perte de masse :

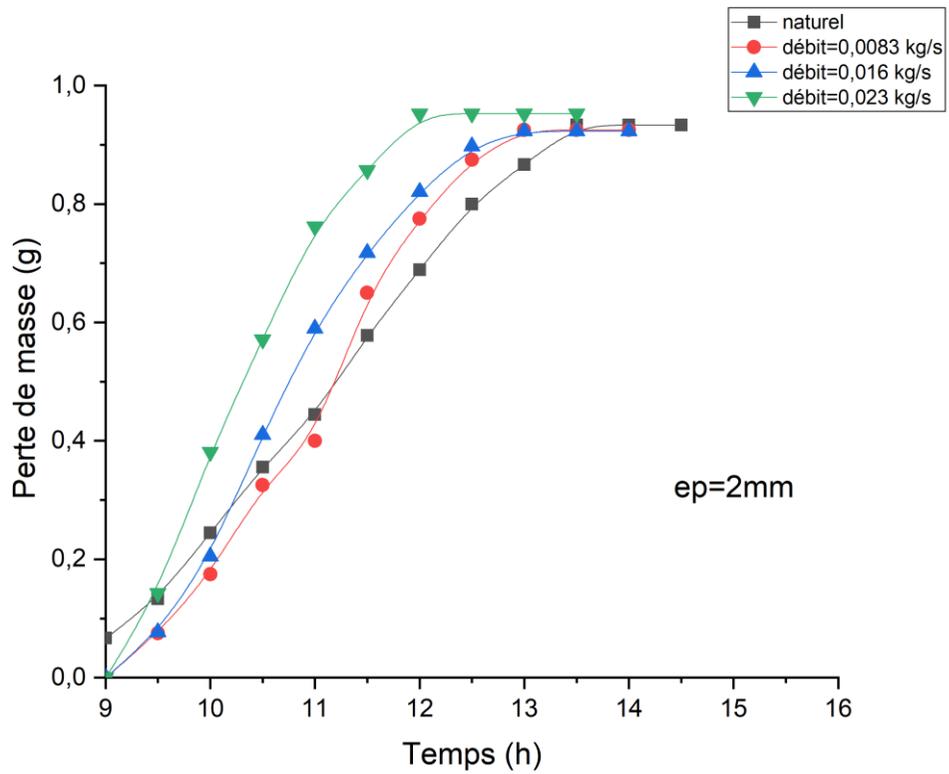


Figure (IV- 12) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 2mm

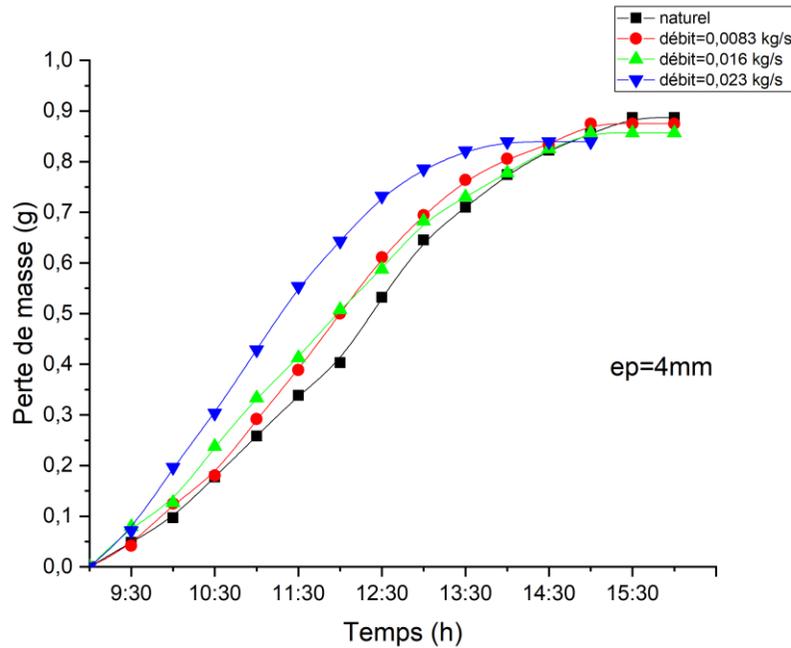


Figure (IV- 13) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 4mm

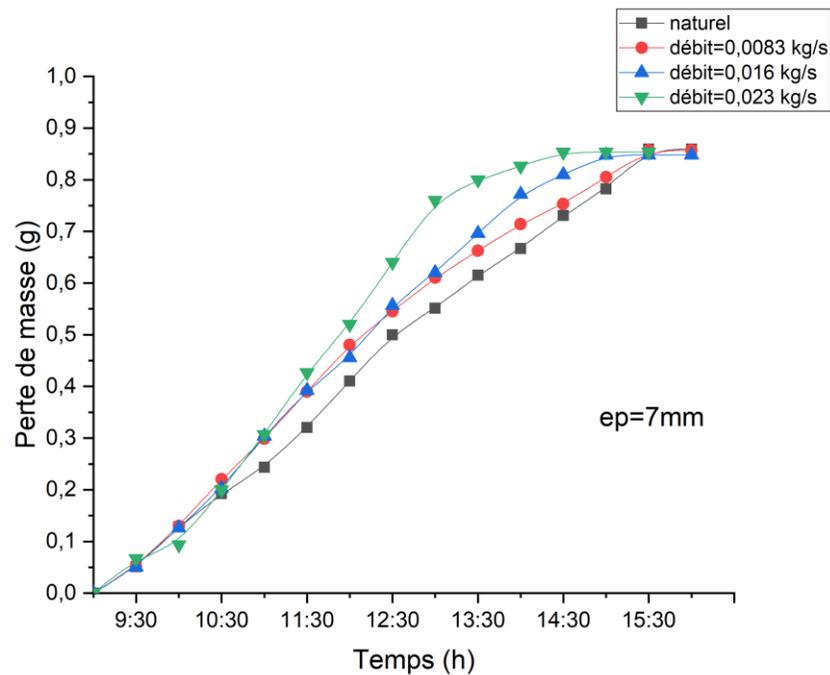


Figure (IV- 14) Effet du débit d'air sur la perte de masse en fonction du temps, épaisseur = 7mm

Dans les figures (IV-12), (IV-13) et (IV-14), il est clair que le taux de perte de masse augmente à mesure que le débit d'air augmente, car la perte de masse est plus rapide lorsque le débit d'air est de 0,023 kg/s, où la période de séchage atteint trois heures presque la moitié pour l'épaisseur de 2 mm qui est environ 5 heures et demie, et plus lente à des débits d'air inférieurs tels que 0,016 et 0,0083 kg/s. On note également que la perte est moindre dans le cas sans soufflement d'air (convection naturelle) et que le temps de séchage le plus long peut aller jusqu'à 6 heures et demie pour une épaisseur de 7 mm et 5 heures et demie pour une épaisseur de 2 mm. Ceci suggère que l'épaisseur et l'écoulement ont un effet considérable sur la perte de masse.

6. Effet de l'épaisseur et le débit sur la vitesse de séchage :

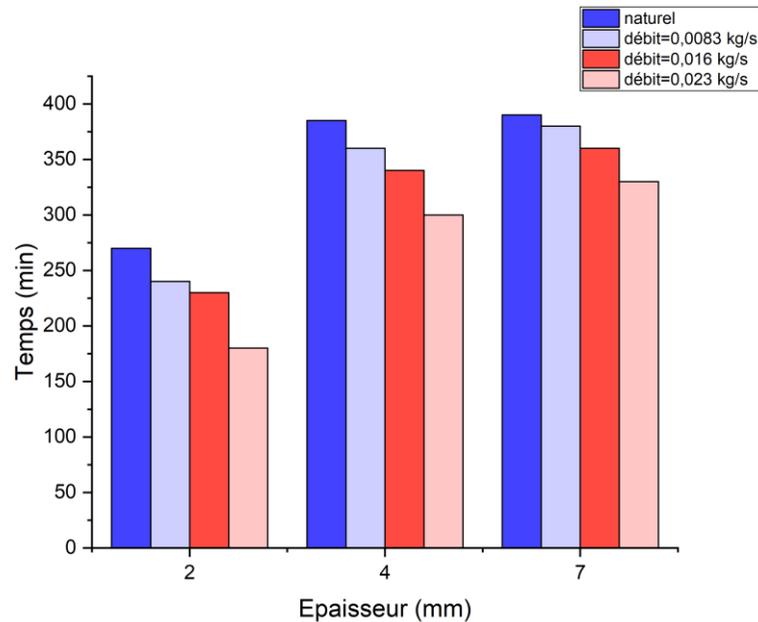


Figure (IV- 15) Durée de séchage en fonction de l'épaisseur.

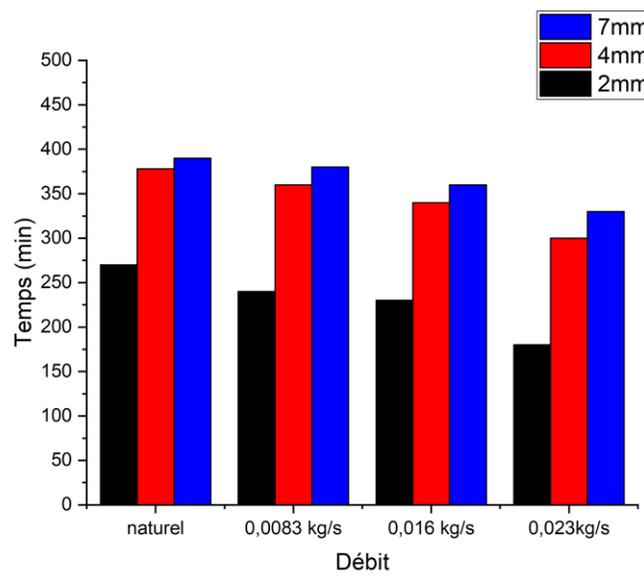


Figure (IV- 16) Durée de séchage en fonction de débit.

Les figures (IV-15) et (IV-16) montrent l'effet du débit d'air et de l'épaisseur sur la vitesse de séchage. Plus l'épaisseur du produit est faible et plus le débit d'air est important, plus la durée du processus de séchage est courte, tandis que la durée du processus de séchage augmente avec l'épaisseur du matériau et la diminution du débit d'air.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de plusieurs courbes et de barres qui représentent les principaux facteurs qui affectent le processus de séchage et leur évolution au fil du temps. L'objectif principal était d'analyser l'évolution de ces facteurs du début à la fin du processus de séchage, en fournissant des explications appropriées.

Nous avons remarqué que ces facteurs interagissent de manière simultanée, comme la température, le débit d'air chaud dans la chambre de séchage et l'épaisseur du produit. De plus, nous avons constaté que la teneur en eau extraite est étroitement liée à ces facteurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le séchage est l'un des processus de base qui augmentent efficacement la durée de conservation des produits dans l'industrie alimentaire, cependant il est un processus énergivore. L'utilisation de séchoirs solaires est une alternative qui a connu un développement remarquable ces dernières années.

Nous avons conçu un séchoir solaire indirect (naturelle et forcée), nouvellement conçu et construit avec des matériaux locaux. Notre étude a porté sur le séchage de la couche fine de pastèque rouge dans différentes conditions : (différentes épaisseurs et différents débits d'air). L'objectif principal de notre étude expérimentale est d'étudier la cinétique de séchage de ce produit.

Cette expérience est basée sur le séchage à l'énergie solaire thermique indirecte d'un produit agricole (pastèque rouge). Ce processus est suivi pendant la journée, ce qui a permis de tracer des courbes d'évolution de la température, de l'intensité du rayonnement solaire, d'évolution de la teneur en eau, et l'effet de l'épaisseur et du débit d'air sur la vitesse de séchage de ce produit.

Des tests répétés ont montré que la vitesse de séchage est fortement affectée par l'épaisseur de l'échantillon et le débit d'air. Les échantillons de pastèque d'une épaisseur de 2 mm et d'un débit de 0,023 kg/s ont séché plus rapidement.

La faible épaisseur facilite la transmission de l'air chaud à travers les échantillons, donnant au produit la capacité d'absorber rapidement une grande quantité de chaleur, ce qui provoque une élévation de sa température et améliore ainsi l'évaporation de l'eau présente dans la matière. Le phénomène de diffusion limitée de l'eau due au transfert de chaleur et de masse, qui se manifeste par sa vitesse de séchage rapide, obtenant ainsi une faible teneur en humidité de l'eau en très peu de temps. En revanche, dans les rubans plus épais (7 mm), l'air chaud traverse difficilement les échantillons et réduit le gradient d'humidité et la diffusion de l'humidité.

Il existe une différence de vitesse de séchage entre l'utilisation de l'air naturel (convection naturelle) et celle de la convection forcée. Avec la convection forcée, l'air peut être soufflé avec force et de manière ordonnée, ce qui augmente la vitesse d'échange thermique et accélère ainsi le processus de séchage, contrairement au séchage à l'air naturel, ce qui signifie que la vitesse de séchage est plus lente.

De plus, l'effet de l'intensité du rayonnement solaire est le principal facteur pour accomplir le processus de séchage afin de chauffer la plaque d'absorption ; Les expériences ont donné de bons

Conclusion générale

résultats pour le rayonnement solaire et la température moyenne à la sortie du capteur avec des valeurs maximales de 1250 W/m² et 52°C, respectivement.

De plus, l'humidité relative du produit à sécher est élevée au début des expériences. Pui elle diminue progressivement avec le temps jusqu'à la fin de l'essai.

Nos résultants sont expérimentaux et de valeur, ils peuvent servir de références pour d'autres étudiants dans le futur. Notre étude pourra être amélioré en réalisant plus d'expériences pour pouvoir aboutir à un modèle mathématique ou une formulation empirique qui gouvernera le phénomène dans des conditions pareils

ملخص

هدفت دراستنا التجريبية إلى دراسة سلوك التجفيف لمنتج زراعي في الحمل (الطبيعي والقسري)، باستخدام مجفف شمسي غير مباشر الذي تم إنشاؤه حديثاً ب مواد محلية الصنع وتم إجراء التجارب بالقرب من البهو التكنولوجي لجامعة بسكرة. تتعلق هذه الدراسة بتجفيف كمية معينة من البطيخ الاحمر، ونحن مهتمون بتأثير العوامل (تغير تدفق الهواء وسمك المنتج) على معدل التجفيف. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة سلوك التجفيف من خلال تأثير بعض العوامل المذكورة سابقاً. تم اختيار الظروف النهائية لمعدل التجفيف ودرجة وسمك 2 ملم وتدفق الهواء 0.023 كجم/ثانية. أظهرت النتائج أن حركيات التجفيف تعتمد على سمك المنتج وتطور تدفق الهواء

كلمات مفتاحية: التجفيف الشمسي غير مباشر، حركية التجفيف، البطيخ، الحمل القسري.

Résumé : Notre étude expérimentale visait à étudier le comportement au séchage d'un produit agricole en convection (naturelle et forcée), en utilisant un séchoir solaire indirect nouvellement créé avec des matériaux locaux. Les expériences ont été réalisées à proximité de du Halle Technologique de l'Université de Biskra. Cette étude porte sur le séchage d'une certaine quantité de pastèque rouge, et nous nous intéressé à l'effet des facteurs (débit d'air et épaisseur du produit) sur la vitesse de séchage. L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement du séchage à travers l'effet de certains facteurs mentionnés précédemment. Les conditions finales ont été choisies pour la vitesse de séchage, un degré et une épaisseur de 2 mm et un débit d'air de 0,023 kg/s. Les résultats ont montré que la cinétique de séchage dépend de l'épaisseur du produit et de l'évolution du débit d'air.

Mots clés : Séchage solaire indirect, cinétique de séchage, pastèque, convection forcée.

Abstract: Our experimental study aimed to investigate the drying behavior of an agricultural product in convection (natural and forced), using a newly created indirect solar dryer with local materials. The experiments were carried out near the Technological Hall of the University of Biskra. This study focuses the drying of a certain quantity of red watermelon, and we are interested in the effect of the factors (air flow and thickness of the product) on the drying rate. The main objective of this work is to study the drying behavior through the effect of some previously mentioned factors. Final conditions were chosen for drying rate, a degree and thickness of 2 mm and an air flow rate of 0.023 kg/s. The results showed that the drying kinetics depend on the thickness of the product and the evolution of the air flow.

Key words: Indirect solar drying, drying kinetics, watermelon, convection forced.