

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des sciences et technologie  
Département : Génie mécanique  
Réf :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الميكانيكية  
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
**Doctorat en sciences en Génie Mécanique**  
**Spécialité: Génie Mécanique**

---

**Conception et évaluation des performances d'un séchoir  
solaire et prédiction des caractéristiques de séchage de  
quelques produits agro-alimentaire dans les régions  
semi-arides**

---

Présentée par :

**TEGUIA MOHAMED SALAH**

Soutenue publiquement le:.....

**Devant le jury composé de :**

Noureddine MOUMMI	Professeur	Président	Université de Biskra
Foued CHABANE	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Nourredine BELGHAR	Professeur	Examineur	Université de Khenchla
Djamel BENSALAH	MCA	Examineur	Université de Laghouat
Ali ARIF	Professeur	Invité	Université de Biskra

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فَدَلَّ عَلٰى مَا فِيْكُمْ مِنَ الْعَدْوٰى جَاءَ  
بَيْنَ يَدَيْكُمْ لَمَّا مَرَرْتُمْ بِالْعُرْدِ حَرَا

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

## REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie "Allah" le tout puissant, le Miséricordieux, qui m'adonné le courage, la volonté, la force, la santé et la persistance pour accomplir ce modeste travail. Merci de m'avoir éclairé le chemin de la réussite et m'avoir aidé à surmonter toutes les difficultés lors de mes études.

J'adresse mes chaleureux remerciements à mes encadreurs, **Pr. CHABANE FOUED**, et **Pr. ARIF ALI**, pour ses encadrements, ses encouragements, ses orientations, pour ses aides, ses patiences, ses conseils scientifiques judicieux, sa compétence et sa gentillesse qui m'ont permis de bien mener ce modeste travail et pour avoir participé activement à la correction de ce manuscrit. Je tiens également à remercier les enseignants, **Pr. MOUMMI NOUREDDINE**, **Pr. BELGHAR NOUREDINE**, et **Dr. BENSAHAL DJAMAL** d'être membres du jury pour avoir accepté l'évaluation de mon travail.

Je remercie mon camarade **Dr. AOUISSI ZOUHIR** qui m'aide moi pour réalise ce modeste travail Je remercie aussi tous les étudiant de doctorat et de master qui consacrent ses efforts et aident moi pour réalise ce modeste travail. Je remercie aussi tous les enseignants et les enseignantes qui m'ont formé durant toutes les années de mes études. Merci pour vos encouragements et votre gentillesse. Enfin, Je remercie tous ce qui a participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

## DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils; assistance et soutien moral, A mes chère parent, qui m'a toujours soutenu et m'encouragé, et qu'a été toujours présent pour moi. Je demande à mon Dieu les protéger et leur réserver une longue vie.

A la plus chère femme au monde et la fleur de ma vie ma chère femme, et mes chères enfants « **AISSA, RODYNA, et AMIR** », Je souhaite le Dieu que les protègeant.

A ma chère sœur et mes chers frères et ses enfants, A mes oncles et tantes paternels et maternels et ses enfants. A tout la famille « **TEGUIA** » et à toute personne qui me connaît de près ou de loin.

Je dédie ce modeste travail à mes beaux-amis « **BOUALEM, DJAMEL, DJOUAD, WALID,...etc.** » et tous les amis qui me connaissent de près ou de loin.

## RÉSUMÉ

Le séchage solaire est un processus écologique de conservation, prolonge la durée de vie des produits agroalimentaires et améliore leur stockage et conditionnement. Cette étude examine la cinétique de séchage des tranches d'orange et de pommes de terre en utilisant un séchoir solaire à convection forcée, modifié pour en augmenter l'efficacité.

Les principaux résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur des tranches prolonge le temps de séchage, tandis qu'un débit d'air élevé accélère l'évacuation de l'air humide, réduisant ainsi le temps de séchage. Le choix de jours de tests avec des conditions naturelles favorables (ciel clair, vents modérés, forte intensité solaire) est crucial pour un séchage efficace.

Des modifications structurelles, telles que l'ajout de chicanes et d'une deuxième plaque absorbante, ont amélioré la performance du séchoir. L'étude révèle que la vitesse de séchage des tranches de pommes de terre est influencée par l'épaisseur des échantillons, le débit d'air et la position des produits dans la chambre de séchage. Les échantillons plus fins sèchent plus rapidement, et leur positionnement optimal par rapport à la source de chaleur est essentiel. Ces modifications permettent au fluide caloporteur de circuler entre les deux plaques (inférieure et supérieure), suivies par une autre étude sur le séchage solaire des tranches de pommes de terre. Cette partie de l'étude a analysé l'influence de ces modifications en tenant compte de plusieurs paramètres expérimentaux tels que l'épaisseur des tranches, le prétraitement avec différents teneurs en sel et le débit d'air sur la vitesse de séchage des tranches de pommes de terre.

Un modèle mathématique validé par des données expérimentales a été utilisé pour analyser la teneur en eau des produits, démontrant ainsi son utilité pour l'industrie alimentaire afin de préserver la qualité des produits séchés.

## ABSTRACT

Solar drying is an environmentally friendly preservation process, extends the shelf life of agro food products while improving their storage and packaging. This study delves into the drying kinetics of orange slices and potatoes utilizing a modified forced convection solar dryer to enhance its efficiency.

Key findings reveal that increased slice thickness prolongs drying time, while a higher airflow rate expedites the removal of moist air, thereby reducing drying duration. The selection of test days with optimal natural conditions (clear sky, moderate winds, and high solar intensity) proves pivotal for efficient drying.

Structural enhancements, such as the incorporation of baffles and an additional absorbing plate, significantly enhance dryer performance. Moreover, the study underscores that the drying rate of potato slices is contingent upon sample thickness, air flow rate, and product placement within the drying chamber. Thinner samples exhibit faster drying rates, necessitating optimal positioning relative to the heat source.

These modifications facilitate fluid circulation between the lower and upper plates, paving the way for subsequent research on solar drying of potato slices. This segment of the study scrutinized the impact of these modifications while considering various experimental parameters, including slice thickness, pre-treatment with varying salt contents, and air flow rate, on the drying rate of potato slices.

Furthermore, a mathematical model, validated by empirical data, was employed to analyze the reduced moisture content of the products, showcasing its applicability in the food industry for preserving the quality of dried products.

## تمهيد

التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية هو عملية فعالة و صديقة للبيئة تستعمل في تحسين ظروف تعبئة و تخزين فائض إنتاج المنتجات الزراعية الغذائية، تعمل هذه العملية على استعمال الطاقة الشمسية في خفض مستوى نسبة الرطوبة في المنتجات المراد حفظها و إطالة فترة صلاحيتها و تخزينه لاستعمالها مستقبلا عند الضرورة. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل ديناميكية تجفيف شرائح البرتقال والبطاطا باستخدام مجفف شمسي مُعدل يعمل بالحمل القسري، بهدف تحسين كفاءته . أظهرت النتائج أن زيادة سُمك الشرائح تؤدي إلى إطالة مدة التجفيف، بينما يساهم ارتفاع معدل تدفق الهواء في تسريع إزالة الرطوبة، مما يقلل من زمن التجفيف. كما تبين أن اختيار أيام ذات ظروف مناخية ملائمة، مثل السماء الصافية، والرياح المعتدلة، وشدة الإشعاع الشمسي العالية، يعد عاملاً حاسماً لتحقيق تجفيف فعال .

وقد ساهمت التعديلات الهيكلية، مثل إضافة حواجز داخلية ولوح امتصاص ثانٍ، في تحسين أداء المجفف. كما أظهرت الدراسة أن سرعة تجفيف شرائح البطاطا تتأثر بعدة عوامل، من بينها سُمك العينات، معدل تدفق الهواء، وموقع المنتجات داخل حجرة التجفيف. إذ تجف العينات الرقيقة بشكل أسرع، كما أن وضعها الأمثل بالقرب من مصدر الحرارة يلعب دوراً رئيسياً في كفاءة التجفيف .

ساعدت هذه التعديلات في تحسين تدفق السائل الناقل للحرارة بين اللوحين (السفلي والعلوي)، مما مهد الطريق لدراسة إضافية حول تجفيف شرائح البطاطا بالطاقة الشمسية. تناولت هذه المرحلة تحليل تأثير التعديلات الجديدة، مع الأخذ بعين الاعتبار عدة عوامل تجريبية، مثل سُمك الشرائح، المعالجة المسبقة بمحتويات مختلفة من الملح، وتدفق الهواء، وذلك لتحديد مدى تأثيرها على سرعة التجفيف .

وأخيراً، تم اعتماد نموذج رياضي تم التحقق من صحته بواسطة البيانات التجريبية لتحليل محتوى الرطوبة في المنتجات، مما يؤكد أهميته في الصناعات الغذائية للحفاظ على جودة المنتجات المجففة وتحسين كفاءتها التخزينية.

## NOMENCLATURE

<b><math>A_n</math></b> : Zone d'ouverture de l'absorbeur	( $m^2$ )
<b>d</b> : diamètre du produit	(mm)
<b>ep</b> : épaisseur du produit	(mm, m)
<b>G</b> : intensité du rayonnement solaire	( $W/m^2$ )
<b>h</b> : coefficient de transfert de chaleur	( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
<b>L</b> : longitude du lieu	( $^\circ$ )
<b><math>\varphi</math></b> : Latitude du lieu	( $^\circ$ )
<b><math>M_p</math></b> : masse de produit	(g) ou (kg)
<b><math>M_{sech}</math></b> : Masse sèche de produit	(g) ou (kg)
<b><math>M_{out}</math></b> : perte de masse liquide	(g)
<b>m</b> : débit massique d'air	(Kg/s)
<b>H</b> : hauteur de la grille de l'entrée à la salle de séchage	(cm)
<b><math>M_0</math></b> : teneur en humidité initiale	(% , base humide)
<b><math>M_{eq}</math></b> : teneur en humidité d'équilibre	(% , base humide)
<b>MR</b> : taux d'humidité	(% )
<b><math>M_t</math></b> : teneur en humidité à tout moment de séchage	(% , base humide)
<b>Q</b> : Énergie utile réelle collectée	(W)
<b>RH</b> : humidité relative	(% )
<b><math>t_s</math></b> : temps de séchage	(s, min, h)
<b><math>T_{am}</math></b> : température ambiante	( $^\circ C$ )
<b><math>T_{ab}</math></b> : température moyenne de la plaque absorbante	( $^\circ C$ )
<b><math>T_{ch}</math></b> : température de la chambre de séchage	( $^\circ C$ )
<b><math>T_{en}</math></b> : température d'entrée de la salle de séchage	( $^\circ C$ )
<b><math>T_{pro}</math></b> : température du produit	( $^\circ C$ )
<b><math>V_{air}</math></b> : Vitesse de l'air	(m/s)
<b><math>\chi</math></b> : Humidité absolue d'un solide	(kg/kg)
<b><math>\chi_r</math></b> : teneur en humidité sur une base humide	(kg/kg (Mh))
<b><math>\eta</math></b> : efficacité du capteur solaire	(% )
<b><math>\tau</math></b> : poids de sel ajouté	(Kg, g)
<b>A</b> : constant	-
<b>B</b> : constant	1/m
<b>C</b> : constant	m/kg
<b><math>\chi^2</math></b> : erreur chi carré	
<b><math>D_{eff}</math></b> : diffusivités efficaces	
<b>R</b> : Coefficient de corrélation	
<b><math>R^2</math></b> : facteur de détermination	
<b>RMSE</b> : erreur quadratique moyenne	
<b>N</b> : le nombre d'observations	
<b>CS</b> : collecteur solaire simple	
<b>CM</b> : collecteur solaire modifié	

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	A
Dédicace.....	B
Resumer.....	C
Abstract.....	D
تمهيد.....	E
Nomenclature.....	F
Table des matiere.....	G
Liste des figures.....	N
Liste des tableaux.....	R
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I: GENERALITE SUR LE SECHAGE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES</b>	
I.1. Introduction.....	8
I.2. Position et avantages énergétiques solaire de l'Algérie.....	9
I.3. Alors c'est quoi le séchage solaire des aliments?.....	10
I.4. Histoire du séchage solaire des produits agricoles.....	10
I.5. Processus de séchage solaire des produits agro-alimentaire.....	12
I.6. Objectif et principe du fonctionnement d'un séchoir solaire.....	13
I.7. Types du séchage des produits agroalimentaires.....	14
I.7.1. Selon l'épaisseur de l'échantillon.....	14
I.7.1.1. Séchage en couche mince.....	14
I.7.1.2. Séchage en couche épaisse.....	14
I.7.2. Selon le mode de séchage.....	14
I.7.2.1. Le séchage par conduction.....	15
I.7.2.2. Le séchage par convection.....	15
I.7.2.3. Le séchage par rayonnement.....	15
I.7.2.3.1. Le séchage infrarouge.....	15
I.7.2.3.2. Le séchage par micro-ondes.....	15
I.7.2.3.3. Séchage par lyophilisation.....	16
I.7.2.3.4. Le séchage solaire.....	17
I.8. Type des séchoirs solaires.....	17
I.8.1 Selon le mode d'alimentation par l'air chaude.....	17
I.8.1.1 Séchoirs solaires à convection naturelle (séchoirs passifs).....	17
I.8.1.2 Séchoirs solaires à convection forcée (séchoirs actifs).....	18
I.8.2 Selon la méthode d'alimentation par l'air chaud.....	18
I.8.2.1 Séchage au soleil ouvert (à l'air libre).....	18
I.8.2.2. Séchage utilisant des séchoirs solaires.....	19
I.8.3. Types de Séchage utilisant des séchoirs solaires.....	20
I.8.3.1. Séchoir solaire direct.....	20
I.8.3.2. Séchoir solaire indirect.....	20
I.8.3.3. Les séchoirs solaires mixtes.....	21
I.8.3.4. Autres types des séchoirs solaires.....	23
I.8.3.4.1. Les séchoirs solaires tunnels.....	23
I.8.3.4.2. Les séchoirs solaires hybrides.....	24

I.8.3.4.3. Séchoir solaire à rainures en V et équipé à un système de stockage thermique à PCM (Phase Change Material).....	24
I.8.3.4.4. Séchoir solaire avec stockage thermique à lit de galets .....	25
I.8.3.4.5. Le séchage basé sur le chauffage géothermique .....	26
I.8.3.4.7. Séchage hybride basé sur les pompes à chaleur:.....	27
I.8.3.4.8. Séchoirs à pompe à chaleur intégrant des PCM assistés par énergie solaire .....	27
I.9. Composantes d'un séchoir solaire .....	28
I.9.1. Capteur solaire thermique .....	28
I.9.1.1. Rôle et fonctionnement .....	29
I.9.1.1.1. Absorption du rayonnement solaire .....	29
I.9.1.1.2. Transfert d'énergie thermique .....	29
I.9.1.1.3. Récupération de chaleur .....	29
I.9.1.2. Types de capteurs solaires.....	29
I.9.1.2.1. Capteurs plans à liquide sans vitrage .....	29
I.9.1.2.2. Capteurs plans à liquide avec vitrage.....	30
I.9.1.2.3. Capteurs solaires à tubes sous vide .....	30
I.9.1.2.4. Capteur solaires à concentration .....	31
I.9.1.3. Composantes d'un Capteur solaire plan.....	32
I.9.1.3.1. La plaque de verre.....	32
I.9.1.3.2. Le fluide caloporteur .....	32
I.9.1.3.3. L'absorbeur.....	32
I.9.1.3.4. Le capteur solaire .....	32
I.9.2. Chambre de séchage.....	33
I.9.3. Ventilateur ou système de circulation d'air .....	33
I.9.4. Évent de ventilation (cheminée) .....	33
I.9.5. Grille de séchage.....	34
I.10. Paramètres influençant le temps de séchage solaire des produits agricoles.....	34
I.10.1. Caractéristiques de l'air de séchage.....	34
I.10.1.1. L'humidité absolue (X).....	34
I.10.1.2. L'humidité relative( $\phi$ ) .....	34
I.10.1.3. La température sèche T et la température humide $T_H$ de l'air.....	35
I.10.1.4. Enthalpie de l'air humide.....	35
I.10.2. Caractéristiques des solides humides .....	35
I.10.2.1. Humidité absolue .....	35
I.10.2.2. Humidité relative.....	35
I.11. Les produits agricoles comme des milieux poreux.....	36
I.11.1. Grandeurs caractéristiques des milieux poreux.....	36
I.11.1.1. Perméabilité .....	36
I.11.1.2. Porosité .....	37
I.11.1.3. Capacité d'absorption .....	38
I.11.1.4. Capacité de rétention d'eau .....	38
I.11.1.5. Saturation .....	38
I.11.1.6. Conductivité hydraulique.....	38
I.11.1.7. Conductivité thermique .....	38
I.12. L'eau dans les produits agricoles.....	38
I.12.1. Courbe de sorption-désorption du matériau poreux.....	39

I.12.1.1. Zone hygroscopique.....	39
I.12.1.2. Zone super-hygroscopique.....	40
I.12.1.3. Zone saturée.....	40
I.12.2. Périodes des courbes de la cinétique de séchage.....	40
I.12.2.1. Phase de taux de séchage constant (phase 0).....	41
I.12.2.2. Phase de taux de séchage décroissant (phase 1).....	41
I.12.2.3. Phase d'équilibre d'humidité (phase 2).....	41
I.13. Les avantages et inconvénients du séchage solaire des produits agro-alimentaire.....	41
I.13.1. Avantages et Inconvénients du séchage solaire.....	42
I.13.2. Inconvénients du séchage solaire.....	42

## **CHAPITRE II: ETATS DE L'ART**

II.1.Introduction.....	45
II.2. Domaines d'application des recherches scientifiques sur le séchage solaire.....	45
II.3. Quelques travaux sur le séchage solaire.....	45
II.3.1. Etudes sur l'amélioration des conceptions et optimisation des systèmes et des nouvelles technologies dans le séchage solaire.....	46
II.3.2. Étude sur l'amélioration de cinétiques de séchage solaire et évaluation de la qualité des produits.....	52
II.4.Conclusion.....	65

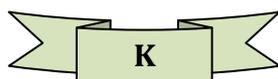
## **CHAPITRE III: ETUDES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES**

III.1.Introduction.....	67
III.2.Localisation des expériences et climat de zone.....	67
III.2.1. Lieu des expériences.....	67
III.2.2. Données Climatiques de la zone d'expérience.....	67
III.2.3. Données physiques.....	68
III.2.4. Insolation.....	69
III.2.5. Rayonnement solaire.....	69
III.3.Parties expérimentales.....	69
III.3.1. Description de séchoir solaire indirect forcé préconçus désigné pour le séchage des produits agroalimentaires.....	69
Capteur solaire.....	70
Chambre de séchage.....	70
III.3.1.1. Chambre de séchage.....	71
A. Système de pesée.....	71
III.3.1.2. Collecteur solaire.....	72
III.3.2. Amélioration de séchoir solaire.....	72
III.3.2.1. Amélioration par adjonctions des chicanes dans le capteur solaire.....	72
III.3.2.2. Amélioration du collecteur solaire par l'adjonction d'une plaque absorbante supérieure.....	74
III.4. Procédures et étapes expérimentaux.....	76
III.4.1. Cas N°1: Séchage solaire des tranches d'orange.....	76
III.4.1.1. Séchoir solaire à capteur simple (sans chicanes).....	78
III.4.1.2. Séchage solaire à capteur amélioré avec des chicanes.....	79
III.4.2. Cas N°2 : Séchage solaire des tranches de pommes de terre.....	80
III.5. Appareils et instruments de mesure expérimentale.....	82
III.5.1. Les appareils utilisés dans séchage des tranches d'orange (cas N°1).....	82
III.5.2. Les appareils utilisés dans séchage des tranches de pomme de terre (cas N°2).....	85

III.6. Analyse énergétique de séchoir solaire.....	87
III.6.1. Puissance de système de séchage.....	87
III.6.2. Puissance perdus de système.....	88
III.6.3. Efficacité du system de séchage solaire.....	88
III.6.3.1. Efficacité d'un collecteur solaire.....	88
III.6.3.2. Efficacité de la chambre de séchage.....	88
III.7. Modélisation mathématique du phénomène du séchage solaire.....	89
III.7.1. Modèles utilisés.....	89
a. Modèles purement empiriques.....	89
b. Modèles théoriques.....	89
c. Modèles semi-théoriques.....	90
III.8. Conclusion.....	93

### **CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1. Introduction.....	95
IV.2. Séchage solaire des fruits (cas tranches d'oranges).....	95
IV.2.1 Intensité des rayonnements solaires on fonction de l'épaisseur des tranches et les débits de l'air.....	95
IV.2.1.1 Cas d'un séchoir solaire à capteur simple (sans chicanes).....	95
IV.2.2 Température de l'air à la sortie du capteur solaire.....	98
IV.2.2.1 Cas d'un capteur simple CS (sans chicanes).....	99
IV.2.2.2 Séchage dans un capteur modifie avec chicanes.....	100
IV.2.3 Température d'entrée de la chambre de séchage.....	101
IV.2.3.1 Température d'entré de la chambre de séchage : cas CS (sans chicanes).....	101
IV.1.1.1 Température d'entré de la chambre de séchage : cas CS (avec chicanes).....	103
IV.2.3.2 Température de chambre de séchage : cas CS (sans chicanes).....	104
IV.2.3.3 Température de chambre de séchage : cas CS (avec chicanes).....	105
IV.2.4 Température de produit à séché.....	107
IV.2.4.1 Température de produit dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes).....	107
IV.2.4.2 Température de produit dans le cas d'un capteur (avec chicanes).....	108
IV.2.5 Teneur en eau (MR).....	110
IV.2.5.1 Teneur en eau dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes).....	110
IV.2.5.2 Teneur en eau dans le cas d'un capteur solaire (avec chicanes).....	111
IV.3. Séchage solaire des légumes (cas tranches de pommes de terre).....	112
IV.3.1 Séchoir solaire à capteur solaire amélioré (l'adjonction des chicanes sous l'absorbeur).....	112
IV.3.1.1 Cas des tranches non prétraités par NaCl.....	112
IV.3.1.1.1 Intensité du rayonnement solaire globale.....	112
IV.3.1.1.2 Température de sortie (capture solaire).....	113
IV.3.1.1.3 Températures de la chambre de séchage.....	113
IV.3.1.1.4 Teneur en eau (MR).....	115
IV.3.2 Cas de prétraitement avec ajout de poudre de sel (NaCl).....	116
IV.3.2.1 Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 2 mm.....	116
IV.3.2.1.1 Intensité du rayonnement solaire.....	116
IV.3.2.1.2 Températures de sortie de collecteur solaire.....	117
IV.3.2.1.3 Teneur en eau (MR).....	118
IV.3.2.2 Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 3mm.....	120
IV.3.2.2.1 Intensité du rayonnement solaire.....	120



IV.3.2.2.2	Température de sortie de collecteur solaire.....	121
IV.3.2.2.3	Teneur en eau (MR) .....	122
IV.3.2.3	Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 5mm.....	123
IV.3.2.3.1	Intensité du rayonnement solaire.....	123
IV.3.2.3.2	Température de sortie de collecteur solaire.....	125
IV.4.	Analyse énergétique de la chambre de séchage alimentée par un collecteur solaire avant et après la modification.....	129
IV.4.1	Collecteur solaire simple (sans chicanes).....	129
IV.4.1.1	Analyse énergétique de système de séchage .....	129
IV.4.1.2	Energie thermique dans la chambre de séchage.....	131
IV.4.2	Collecteur solaire dans son état final (après ajout des chicanes transversales et de la deuxième plaque absorbante).....	132
IV.4.2.1	Analyse énergétique de système de séchage .....	132
IV.4.2.2	Températures de la chambre de séchage .....	133
IV.4.2.3	Performance du collecteur solaire et de la chambre de séchage .....	134
IV.5.	Modélisation mathématique de teneur en eau (MR) A l'aide les modèles semi empirique.....	136
V.	Conclusion générale .....	138
VI.	Références.....	141



# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I. 1: carte mondiale des radiations solaire en plan direct normal.....	8
Figure I. 2: Carte des irradiances solaires globales en Algérie.....	9
Figure I. 3: Quelques produits agroalimentaires séchant .....	11
Figure I. 4: Séchage à l'air libre par l'exposition direct face aux rayons solaires (séchage au soleil)..	12
Figure I. 5: Principe du fonctionnement du séchoir solaire indirect. ....	14
Figure I. 6: Différents modes de séchage .....	15
Figure I. 7: Equipements utilisées dans le séchage par micro-onde.....	16
Figure I. 8: Séchoir solaire à convection naturelle; A : direct, et B : indirect .....	17
Figure I. 9: Séchoir solaire à convection forcé; (a): direct, (b): indirect .....	18
Figure I. 10: schéma d'un séchage au soleil ouvert (à l'air libre) .....	18
Figure I. 11: Types des séchoirs solaires en fonction les modes d'utilisation d'énergie solaire .....	19
Figure I. 12: Schéma d'un séchoir solaire direct .....	20
Figure I. 13: Schéma d'un séchoir solaire indirect.....	20
Figure I. 14: Séchoir solaire mixte passif.....	21
Figure I. 15: Différent types des séchoirs solaires .....	23
Figure I. 16: séchoirs solaires tunnels. ....	23
Figure I. 17: Les séchoirs solaires hybrides .....	24
Figure I. 18: Séchoir solaire à rainures en V et équipé à un système de stockage thermique à PCM (Matériau a Change de Phase).....	25
Figure I. 19: Solar dryer with rock bed storage.....	25
Figure I. 20: Schéma du séchoir géothermique à plusieurs plateaux empilés.....	26
Figure I. 21: Séchoir à lit fluidisé utilisant la biomasse comme source d'énergie.....	27
Figure I. 22: Séchoirs à pompe à chaleur intégrant des PCM assistés par énergie solaire.....	28
Figure I. 23: Schéma de divers systèmes technologies utilisées dans les capteurs solaires. ....	28
Figure I. 24: Schéma des composantes d'un capteur solaire plan.....	29
Figure I. 25: Capteurs plans sans vitrage.....	30
Figure I. 26: Capteur plan vitré .....	30
Figure I. 27: Capteur à tube sous vide.....	31
Figure I. 28: Capteurs solaires à concentration .....	31
Figure I. 29: Schéma de différents prototypes d'un capteur solaire plan .....	33
Figure I. 30: Matrice d'un produit poreux ; (a): photos d'un microscopique d'un produit végétale, et (b): composants d'un produit poraux .....	36
Figure I. 31: Formes de l'eau dans un espace poreux.....	38
Figure I. 32: Courbe caractéristique de sorption-désorption d'un produit alimentaire .....	39
Figure I. 33: Courbes de cinétique de séchage présentant les 3 phases de séchage. ....	40

## Chapitre II

Figure II. 1: Positionnement expérimental des appareils .....	48
Figure II. 2: Position des chicane dans le Channel .....	48
Figure II. 3: La forme rectangulaire des chicane .....	49
Figure II. 4: Dimensions à l'intérieur du capteur solaire et les chicane .....	49
Figure II. 5: Champ de variation du contour de la vitesse à travers les déflecteurs à l'intérieur du canal .....	49
Figure II. 6: Photo expérimental d'un séchoir solaire indirect.....	49

Figure II. 7: Tranches de pommes de terre sécher; (A): dans l'air libre, et (B): dans le séchoir proposée .....	50
Figure II. 8: Photos des tranches de pommes de terre séchées (A): à l'air libre, et (B): dans le séchoir proposé .....	50
Figure II. 9: Poids des échantillons sécher dans l'expérience .....	51
Figure II. 10: Photos expérimentales d'un séchoir solaire; (a) montage Complete et (b) intérieure de la chambre de séchage.....	51
Figure II. 11: (A) Radiation solaire durant la période de séchage, et (B): taux d'humidité des tranches de patata durant la période de séchage. ....	52
Figure II. 12: Tranches d'orange douce séchées par osmo-convexion en utilisant différents agents osmotiques.....	54
Figure II. 13: Vue schématique de l'installation expérimentale de séchage micro-convectif par micro-ondes.....	55
Figure II. 14: Valeurs expérimentaux et prédites du taux d'humidité moyen pour les tranches de citron déshydratées sous la méthode convective et la méthode combinée micro-convective à 2,04 W g <sup>-1</sup> et 50 °C.....	55
Figure II. 15: Présentation schématique de la structure expérimentale du traitement avec trois facteurs (A : épaisseur, B : prétraitement au séchage, et C : méthode de séchage) .....	56
Figure II. 16: Rapport d'humidité des tranches de patate douce de (a) 3 mm, (b) 5 mm et (c) 7 mm d'épaisseur séchées dans un séchoir solaire-venturi à ventilation naturelle. ....	57
Figure II. 17: Naturally-ventilated solar dried SPS (A1: Control, A2: Salting, A3: Blanching, A4: Lemon juice). ....	57
Figure II. 18: Hot-air oven dried SPS (B1: Control, B2: Salting, B3: Blanching, B4: Lemon juice). ..	58
Figure II. 19: Les étapes expérimentales de séchage .....	59
Figure II. 20: Résultats de validation des modèles pour le taux d'humidité du Taikor. ....	59
Figure II. 21: Brunissement des pommes de terre fraîchement coupées préalablement traitées et testées. ....	60
Figure II. 22: résultats obtenus dans le déshydratation post-immersion des tranches de pomme de terre .....	61
Figure II. 23: Présentation d'un modèle GRNN .....	64

### Chapitre III

Figure III.1: Image représente la localisation des expériences.....	68
Figure III.2: Evolution des températures de l'air chaud durant la période 1980-2024 de la ville de Biskra .....	68
Figure III.3: Mécanisme échauffement de l'air et de séchage des produits dans un séchoir solaire indirect.....	69
Figure III.4: Photo expérimental de séchoir solaire indirect forcé préconçus.....	70
Figure III.5: photo expérimental de l'extérieure et a l'intérieure (les orifices) de la chambre de séchage .....	71
Figure III.6: Schéma photo de système de pesée proposé.....	72
Figure III.7: Configurations initial d'un séchoir solaire indirect (capteur solaire).....	73
Figure III.8: La géométrie et dimension des chicanes.....	73
Figure III.9: Disposition des chicanes dans le capteur solaire .....	74
Figure III.10: Composantes d'un capteur solaire avant et après la deuxième modification.....	75
Figure III.11: Séchoir solaire après l'intégration de toutes les modifications proposées.....	76
Figure III.12: Les tranches d'orange avant et après le séchage.....	79

Figure III.13: Tranches circulaires avec un diamètre de 5 cm et des épaisseurs de 2 mm avant le séchage dans les différents débits massiques de l'air sortant. ....	82
Figure III.14: Une balance électronique numérique.....	82
Figure III.15: Un thermomètre-contrôle (modèle TPM-10).....	83
Figure III.16: Thermocouples de type k.....	83
Figure III.17: Hygromètre (modèle PCE-555).....	84
Figure III.18: Pyranomètre (Modèle Voltcraft 4890.20).....	84
Figure III.19: Anémomètre numérique (Model PCE-TA30).....	84
Figure III.20: Voltage régulateur (AC 220V 4000W).....	85
Figure III.21: Aspirateur de l'air utilisé dans la partie expérimentale .....	85
Figure III.22: Balance électronique numérique de laboratoire de puissance de $10^{-3}$ g.....	86

#### Chapitre IV

Figure IV.1: Intensité des rayonnements solaires en cours des journées de séchage solaire des tranches d'orange.....	96
Figure IV.2: Rayonnement solaire dans le cas d'un séchoir solaire à capteur modifié avec des chicane.....	97
Figure IV.3: température de sortie de capteur dans le cas d'un capteur simple (sans chicane).....	99
Figure IV.4: température de sortie de capteur dans le cas d'un capteur solaire avec chicane.....	100
Figure IV.5: Température d'entrée de la chambre de séchage dans le cas d'un capteur solaire simple (sans chicane) .....	102
Figure IV.6: Température d'entrée de la chambre de séchage dans le cas d'un capteur solaire simple (avec chicane).....	103
Figure IV.7: Température de la chambre de séchage : cas CS (sans chicane).....	105
Figure IV.8: Température de la chambre de séchage : cas CS (avec chicane).....	106
Figure IV.9: Température de produit dans le cas d'un capteur simple (sans chicane).....	107
Figure IV.10: Température de produit dans le cas d'un capteur solaire (avec chicane).....	109
Figure IV.11: Teneur en eau dans le cas d'un capteur simple (sans chicane).....	110
Figure IV.12: Teneur en eau dans le cas d'un capteur solaire (avec chicane).....	111
Figure IV.13: Intensité du rayonnement solaire globale (Cas non prétraités).....	112
Figure IV.14: Températures de sortie du capteur solaire selon les différents débits massique sans ajout de sel.....	113
Figure IV.15: Température d'entrée, de sortie et d'intérieur de la chambre de séchage sans ajout de sel.....	114
Figure IV.16: Variation du taux de teneur en eau (MR) en fonction du temps de séchage pour des tranches de pommes de terre d'épaisseur de 2, 3 et 5 mm, à trois débits massiques d'air différents (0,01884, 0,024 et 0,032 kg/s).....	115
Figure IV.17: Rayonnement solaire mesuré pendant les trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur.....	117
Figure IV.18: Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la quantité de NaCl.....	117
Figure IV.19: Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre d'une épaisseur de 2 mm en fonction des différents débits massiques d'air.....	119
Figure IV.20: Intensité du rayonnement solaire au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur.....	120
Figure IV.21: Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la teneur en NaCl.....	121

Figure IV.22: Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et des différents débits massiques d'air.....	122
Figure IV.23: Intensité du rayonnement solaire au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur.....	123
Figure IV.24: Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la teneur en NaCl.....	125
Figure IV.25: Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur et des différents débits massiques d'air.....	126
Figure IV.26: Comparaison de la teneur en humidité réduite en fonction du temps de séchage pour les différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, avec trois débits d'air différents et des quantités de sel variables.....	128
Figure IV.27: L'analyse énergétique des différentes composantes est réalisée en fonction des débits massiques dans le cas d'un collecteur solaire simple (sans chicanes).....	129
Figure IV.28: Énergie fournie par les différentes composantes du système en fonction des débits massiques (0,019, 0,024, et 0,033 kg/s) pour un collecteur solaire simple (sans chicanes).....	131
Figure IV.29: Analyse énergétique des composantes d'un séchoir solaire amélioré en fonction des débits massiques et des modifications structurelles.....	132
Figure IV.30: Impact des débits massiques et des améliorations structurelles sur les températures de la chambre de séchage dans un séchoir solaire amélioré.....	134
Figure IV.31: Analyse de la performance du collecteur solaire et de la chambre de séchage en fonction des débits massiques et des améliorations structurelles.....	135
Figure IV. 32: Analyse des courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 2 mm: Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique.....	136
Figure IV.33: Analyse des courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 3 mm: Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique.....	137
Figure IV.34: Analyse des Courbes de Teneur en Eau Relative (MR) pour les Tranches de 5 mm : Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique.....	138

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

Tableau I. 1: Potentiel solaire en Algérie ..... 10

## Chapitre III

Tableau III. 1: Durée moyenne d'insolation quotidienne (heures) de la ville de Biskra ..... 69

Tableau III. 2: Durée moyenne d'insolation mensuelle de la ville de Biskra..... 69

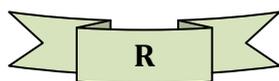
Tableau III. 3: Données techniques du séchoir solaire conçu ..... 70

Tableau III. 4: Résumé des études expérimentales, incluant les quantités de sel (NaCl) ..... 85

Tableau III. 5: Matériaux et outils de mesure utilisés dans l'expérience..... 86

Tableau III. 6: Modèles mathématiques de séchage des produits agroalimentaires ..... 90

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

La sécurité alimentaire en Algérie, et particulièrement comme le reste du monde, constitue un enjeu majeur. Pour y répondre, les gouvernements déploient divers programmes et politiques visant à garantir un accès stable et durable aux ressources alimentaires. Ces mesures s'attachent à renforcer la productivité agricole, à optimiser la transformation des aliments et à accroître la résilience des cultures face aux défis environnementaux.

La recherche scientifique joue un rôle très important en analysant les besoins nutritionnels et en concevant des solutions innovantes pour lutter contre la malnutrition. Elle favorise également les avancées dans la conservation des aliments, la gestion durable des ressources naturelles et l'amélioration des variétés agroalimentaires, contribuant ainsi à la création d'un système alimentaire plus efficace, résilient et durable.

Séchage des produits agricoles reflète l'ingéniosité humaine face à la nécessité de préserver les récoltes et de garantir une alimentation stable au fil des saisons et hors de ses saisons de récoltes.

Alors, il est connu que le séchage des aliments permet les premières méthodes utilisées pour conserver les aliments impliquaient souvent l'exposition directe au soleil et à l'air. Les communautés anciennes étalaient les récoltes sur des surfaces planes, pour les exposer au soleil. Cette méthode traditionnelle est la plus utilisée pour sécher des récoltes agricoles, en particulier dans les pays en développement. Cette méthode consiste à exposer les aliments directement au soleil sur une surface plane, et à les laisser sécher pendant plusieurs jours jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs. Le séchage au soleil en extérieur est considéré comme la technique la plus rentable, car il ne nécessite aucun équipement supplémentaire ni aucune source d'énergie autre que le soleil. Néanmoins, cette méthode présente plusieurs inconvénients, notamment le fait qu'elle repose entièrement sur la présence de la lumière solaire et l'impossibilité de prédire la qualité du produit final séché, qui peut être soumis à divers facteurs externes, tels que la poussière, la pollution de l'air, les insectes et les rongeurs. Dans certaines régions, les communautés ont exploité la chaleur du feu pour sécher les aliments et parfois utilisé la combinaison du soleil et du vent pour accélérer le processus de séchage. Des structures en plein air, parfois surélevées pour favoriser la circulation de l'air, ont été conçues pour sécher les aliments plus rapidement. Au fil du temps, les techniques de

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

séchage ont évolué en fonction des avancées technologiques et des besoins spécifiques des communautés. L'introduction de structures plus sophistiquées, telles que des séchoirs solaires rudimentaires, a amélioré l'efficacité du processus tout en réduisant la dépendance à l'égard des conditions météorologiques. Et avec l'industrialisation, des méthodes plus avancées ont été développées, y compris le séchage industriel à grande échelle. Les procédés tels que la lyophilisation et le séchage par pulvérisation ont été mis en œuvre pour répondre aux besoins de la production alimentaire à grande échelle tout en préservant la qualité nutritionnelle des produits. Aujourd'hui, les avancées technologiques continuent de redéfinir les méthodes de séchage des aliments. Les séchoirs solaires, les déshydrateurs électriques et d'autres dispositifs spécialisés offrent des moyennes efficaces et contrôlés pour sécher variétés d'aliments, des fruits et légumes aux viandes et aux herbes. Pour protéger l'environnement contre les changements climatiques mondiaux et soutenir l'utilisation des énergies renouvelables ainsi que les solutions adaptées au climat local, les séchoirs solaires constituent une alternative viable au séchage en plein air, contribuant ainsi à atténuer les défis susmentionnés.

L'Algérie est connue pour être le premier pays à importer de produits alimentaires. Malgré l'assortiment de produits alimentaires fabriqués localement, le pays importe des quantités importantes de céréales, de viande, de produits laitiers et d'autres produits comestibles pour combler les écarts de production nationale. À la lumière de cela, le gouvernement algérien a mis en place de nombreuses initiatives dans le but de renforcer la sécurité alimentaire. Ces initiatives comprennent l'octroi de subventions alimentaires, des programmes conçus pour soutenir l'agriculture nationale et la mise en œuvre de politiques relatives au stockage des produits alimentaires afin de faire face aux fluctuations des prix sur les marchés internationaux. En outre, afin de réduire la dépendance à l'égard des importations, le gouvernement met actuellement en œuvre des programmes visant à développer un secteur agricole capable de produire un large éventail de produits alimentaires, notamment des céréales, des fruits, des légumes, des olives et de la viande, tout en s'efforçant d'augmenter la production alimentaire nationale. La sensibilisation à la réduction du gaspillage alimentaire devient de plus en plus impérieuse en Algérie, car elle contribue à optimiser l'utilisation des ressources alimentaires disponibles, à diversifier la production agricole, à améliorer les pratiques agricoles, à investir dans les infrastructures agricoles et à favoriser la durabilité

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

environnementale. Ces mesures sont indispensables pour consolider la sécurité alimentaire en Algérie.

Les dépenses associées à la conservation des aliments dépendent d'une multitude de facteurs, notamment des méthodes particulières utilisées pour la conservation, de la durée de conservation souhaitée, des coûts liés à l'énergie et à l'emballage, ainsi que de toute avancée technologique. Afin d'évaluer avec précision la rentabilité de différentes techniques de conservation des aliments, il est essentiel de prendre en compte tous ces différents éléments.

Il est important de noter que les dépenses énergétiques fluctuent également en fonction de la source d'énergie utilisée (électricité, gaz, etc.) et des tarifs locaux. Dans de nombreuses régions, les efforts visant à améliorer l'efficacité énergétique des appareils et l'utilisation de sources d'énergie durables contribuent à atténuer l'empreinte énergétique liée à la conservation des aliments.

Pour réduire ses coûts de conservation des aliments, et tant que l'Algérie située dans une région caractérisée par un ensoleillement abondant et des ressources naturelles considérables, s'est tournée vers l'utilisation des énergies renouvelables tel que l'énergie solaire pour répondre à ses besoins énergétiques, tout en contribuant à atténuer les effets du changement climatique. L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie est devenue un objectif prioritaire, visant à diversifier son mix énergétique, à réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et à favoriser le développement durable.

Les énergies renouvelables en Algérie sont le résultat d'une combinaison de facteurs, notamment un potentiel solaire exceptionnel, d'importantes ressources éoliennes et un intérêt croissant pour l'énergie durable. Le gouvernement algérien a mis en œuvre une variété de politiques, de stratégies et d'initiatives visant à favoriser l'avancement des énergies renouvelables. Des mesures telles que le programme national pour le développement des énergies nouvelles et renouvelables (PNAC), le plan solaire intégré (PSI) et le Plan national de gestion de l'énergie (PNME) ont été mises en place pour faciliter l'utilisation des énergies renouvelables dans le pays, notamment l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique et la biomasse.

L'utilisation de techniques de conservation des aliments, telles que le séchage, permet d'éliminer l'humidité des aliments. Le séchage, méthode de conservation, vise à éliminer la teneur en eau des aliments, limitant ainsi de manière significative la prolifération des microorganismes responsables du processus de décomposition. Par la suite, l'extraction de

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

l'eau par séchage empêche également la croissance des bactéries, des levures et des moisissures, augmentant ainsi la durée de vie des produits alimentaires. De plus, ce processus contribue à diminuer le poids et le volume des aliments tout en conservant avec succès la majorité de leurs nutriments essentiels.

Le coût représente un aspect crucial dans les méthodes de conservation par séchage des aliments. C'est ce qui incite les chercheurs à élaborer des techniques de préservation plus économiques. Ces recherches visent à réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles, offrant ainsi la possibilité d'une diminution significative des coûts énergétiques pour les entreprises agroalimentaires.

Il convient de noter qu'il y a multiples techniques de séchage ont été identifiées, dont certaines font appel à l'énergie solaire. Le processus de séchage solaire exploite la chaleur solaire pour extraire efficacement l'humidité des produits alimentaires, constituant ainsi un moyen viable de les conserver. Il existe deux catégories distinctes de séchage solaire des aliments, à savoir le séchage direct et indirect. Par conséquent, il est crucial de mettre en œuvre le séchage solaire des aliments afin de faire progresser les pratiques agricoles durables, d'améliorer la sécurité alimentaire et d'atténuer les conséquences environnementales associées à des méthodes de conservation à plus forte intensité énergétique.

Alors on peut résumer les principales paramètres qui encourager les gouvernements Algériens orientent ses importances vers l'utilisation de l'énergie solaire dans le séchage des produits agro-alimentaires comme les fruits et les légumes. Voici quelques contextes pertinents pour cette étude :

❖ Climat et ensoleillement : en raison du climat principalement aride à semi-aride de l'Algérie et de son ensoleillement abondant, l'étude peut se concentrer sur l'évaluation de la faisabilité et de l'efficacité du séchage solaire dans ces conditions climatiques particulières.

❖ Diversité agricole : l'Algérie présente une diversité agricole significative. L'étude peut se pencher sur la manière dont le séchage solaire peut être adapté à différentes cultures et produits agricoles, notamment les fruits, les légumes, les céréales et les herbes spécifiques à la région.

❖ Réduction des pertes alimentaires: l'Algérie, tout comme de nombreux autres pays, fait face à des défis liés aux pertes post-récolte. L'étude peut explorer comment le séchage solaire peut contribuer à la réduction de ces pertes, assurant une meilleure sécurité alimentaire.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

❖ Économie agricole et développement rural: l'impact économique du séchage solaire peut être évalué, en mettant l'accent sur la création de nouvelles opportunités économiques pour les agriculteurs, la diversification des revenus et le renforcement du développement rural.

❖ Durabilité environnementale: l'utilisation de ce type des énergies peuvent également se concentrer sur les aspects environnementaux, évaluant comment le séchage solaire peut contribuer à des pratiques agricoles durables en réduisant la dépendance aux énergies non renouvelables et en minimisant l'empreinte carbone.

A cause de ces contextes, notre étude explore la faisabilité de l'utilisation de l'énergie solaire pour générer de la chaleur, qui peut ensuite être utilisée dans le processus de séchage de divers produits agricoles, y compris les fruits et légumes. L'objectif principal est de prolonger la durée de conservation de ces produits et de les exploiter au moment optimal, en particulier pendant les périodes de disponibilité limitée sur le marché. Compte tenu du marché florissant des produits agricoles séchés et de la demande croissante pour ces produits, il convient de noter que la région de Biskra est une zone semi-aride caractérisée par un climat sec et ensoleillé constant tout au long de l'année. Les objectifs spécifiques de cette étude sont donc les suivants:

❖ Utiliser l'énergie solaire comme principale source d'énergie durable en exploitant le rayonnement solaire pour générer l'énergie thermique utilisée dans le processus de séchage.

❖ Préserver la valeur nutritionnelle des produits séchés en évitant l'exposition directe au soleil, susceptible de modifier la couleur et certains constituants nutritionnels bénéfiques pour le corps humain.

❖ Minimiser la durée du processus de séchage, car le séchage à la lumière directe du soleil prolonge le temps nécessaire pour obtenir un produit complètement sec.

❖ Réduire les dépenses liées à l'utilisation intensive de combustibles fossiles coûteux ou de sources d'énergie électrique.

Dans la première phase de cette étude, on vise à développer un séchoir solaire indirect conçu et fabriqué dans les ateliers de département de génie mécanique de l'université Mohamed Khider à Biskra. Par la suite, l'efficacité de cette amélioration a été examinée dans le cadre d'une expérience menée sur des échantillons des fruits et légumes, évaluant l'influence de facteurs spécifiques tels que le débit massique de l'air, l'épaisseur des tranches d'échantillons et la distance par rapport aux orifices d'entrer de la chaleur de la chambre de

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

séchage sur le taux de perte d'humidité des tranches. Les résultats étaient très encourageants. Par la suite, deuxième amélioration étant menée sur le collecteur solaire par l'adjonction de deuxième plaque absorbante, cette amélioration suivie par des essais expérimentaux, ces essais s'est étendue aux stratégies visant à accélérer le processus de séchage des produits agricoles, tels que les pommes de terre, en stimulant le produit pour accélérer la migration interne de l'eau vers la surface, facilitant ainsi son évaporation dans l'air avant son retrait de la chambre de séchage par ventilation et dispositif d'aspiration d'air.

En fin, un modèle mathématique semi empirique élaborant et utilisant dans le processus de séchage solaire, cette technique est utilisée pour modéliser les courbes de humidité perdue et le teneur en eau dans les fruits et les légumes, dans cette partie, on utilise les résultats expérimentaux basés sur les conditions climatiques telles que la température, la vitesse du vent, l'intensité du rayonnement solaire et des conditions spécifiques telles que les additifs chimiques et l'épaisseur des échantillons. Les résultats de cette étude seront comparés à ceux obtenus par des moyens expérimentaux et donnent des meilleures cohérences.

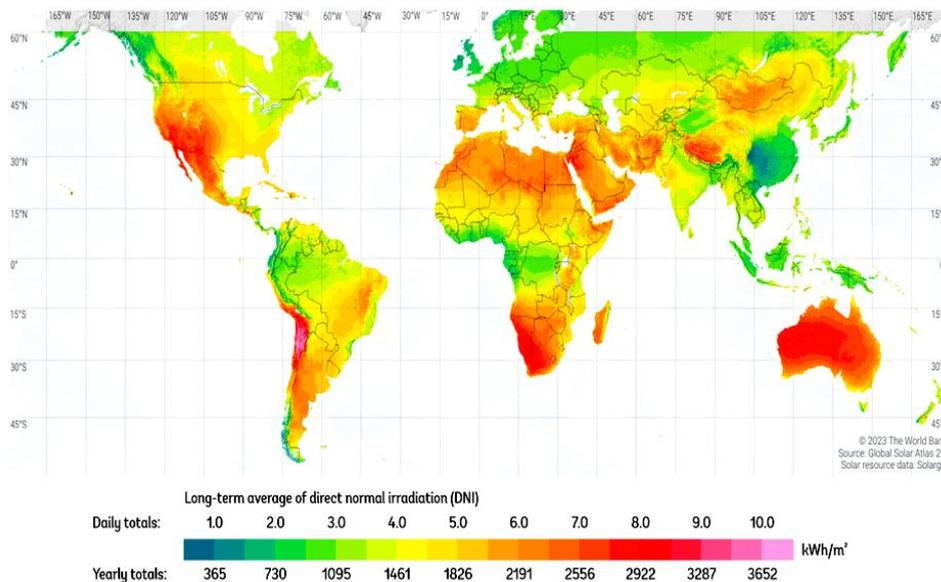
# **CHAPITRE I**

## **GÉNÉRALITÉ SUR LE SÉCHAGE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES**

## **I.1.Introduction**

Depuis l'antiquité, la totalité des besoins énergétiques de la planète provient de l'énergie solaire. Le soleil est la principale source d'énergie de notre système solaire en raison du processus continu de fusion nucléaire qui se produit dans son noyau. À la suite de ce phénomène, une quantité énorme d'énergie est générée. Une fraction partie de cette énergie atteint à la Terre et contribue au maintenir la vie sur notre planète. La présence du rayonnement solaire est responsable de divers cycles et processus naturels tels que les précipitations, le vent, les courants océaniques, la photosynthèse et d'autres phénomènes cruciaux.

La température à la surface du soleil atteint 6 000 °C, ce qui correspond à une intensité de rayonnement comprise entre 70 000 et 80 000 kW/m<sup>2</sup>. Cependant, seule une infime partie de cette énergie atteint réellement la Terre. Néanmoins, la quantité d'énergie solaire reçue chaque année est estimée à environ 2 1017 kWh, soit plus de 10 000 fois la demande énergétique mondiale. L'intensité du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère terrestre est d'environ 1360 W/m<sup>2</sup>, ce que l'on appelle communément la constante solaire. Lorsque ce rayonnement pénètre dans l'atmosphère, une partie est perdue, ce qui se traduit par une plage de 800 à 1000 W/m<sup>2</sup> de rayonnement global par une journée d'été claire et ensoleillée [1].

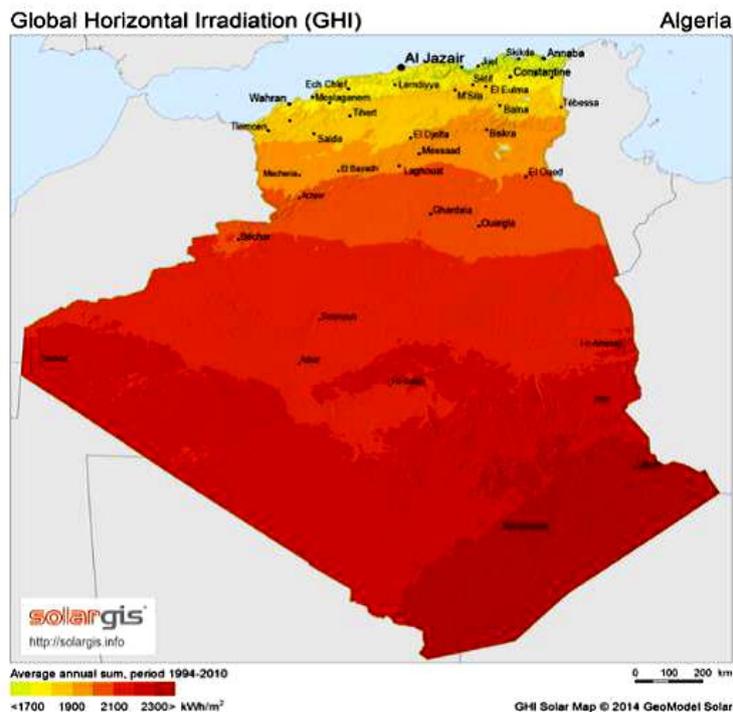


**Figure I. 1:** Carte mondiale des radiations solaire en plan direct normal [2]

## I.2. Position et avantages énergétiques solaire de l'Algérie

Il est connu que l'Algérie est très riche par les énergies combustibles fossiles, tel que le pétrole et le gaz. Aussi, car ses conditions climatiques principalement arides à semi-arides caractérisées par une période d'ensoleillement remarquable, l'Algérie présente une opportunité intéressante de l'utilisation de l'énergie solaire dans déférente domaines de l'industrie moderne. Tel que le domaine de séchage des produits agricoles.

Par conséquent, la mise en œuvre du séchage solaire des produits agricoles et alimentaires en Algérie pourrait s'avérer une méthode efficace pour augmenter la richesse agricole du pays, réduire le gaspillage alimentaire et faciliter le développement durable grâce à l'exploitation d'une ressource énergétique abondante et renouvelable, à savoir le rayonnement solaire.



**Figure I. 2:** Carte des irradiations solaires globales en Algérie [3].

L'Algérie se trouve dans une ceinture solaire, aux côtés de régions telles que l'Afrique du Nord, le sud-ouest des États-Unis d'Amérique et l'Australie. Ces régions possèdent les dépôts solaires les plus élevés au monde. Dans le cas de l'Algérie, la durée d'ensoleillement dépasse les 2 000 heures par an sur la quasi-totalité de son territoire national, certaines zones, comme les hauts plateaux et le Sahara, pouvant atteindre 3900 heures. La quantité d'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est d'environ 5 kWh sur la

majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2 263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud. Le principal défi consiste à exploiter cette énergie solaire directe au lieu de la laisser se dissiper à l'air libre [4]. Il est utilisé dans la production de chaleur et de l'énergie thermique. Cette dernière est la plus utilisée dans les domaines de séchage solaire.

**Tableau I. 1: Potentiel solaire en Algérie [5].**

Zones	Zone côtière	Hauts plateaux	Sahara	Total
Surface (%)	4	10	86	100
Superficie (km <sup>2</sup> )	95270	238174	2048297	2,381,741
Durée moyenne d'ensoleillement quotidien (h),	7,26	8.22	9,59	
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500	
Énergie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650	
Densité quotidienne d'énergie solaire (kWh/m <sup>2</sup> )	4.66	5.21	7.26	
Énergie potentielle quotidienne (T.W.h)	443.96	1240.89	14,870.63	16,555.48

Le séchage solaire est un domaine très vaste d'appliquée l'énergie géothermique et solaire. Il peut utilisée dans le séchage des matériaux de construction, séchage des textures, le séchage des aliments et d'autre plusieurs domaines. Dans notre étude nous avons intéressé par l'application de séchage solaire dans le domaine d'agriculture et plus précis dans le séchage produits agricoles.

### **I.3.Alors c'est quoi le séchage solaire des aliments?**

Le séchage solaire est une technique qui exploite l'énergie solaire, cette technique est utilisée pour diminuer la teneur en eau des produits végétales, et empêchant la dégradation causée par une humidité excessive. A cause d'augmentant sa durée de conservation des produits alimentaires comme les fruits, les légumes..., etc [6]. Elle est fréquemment utilisée dans les régions caractérisées par un ensoleillement abondant et des températures élevées.

### **I.4.Histoire du séchage solaire des produits agricoles**

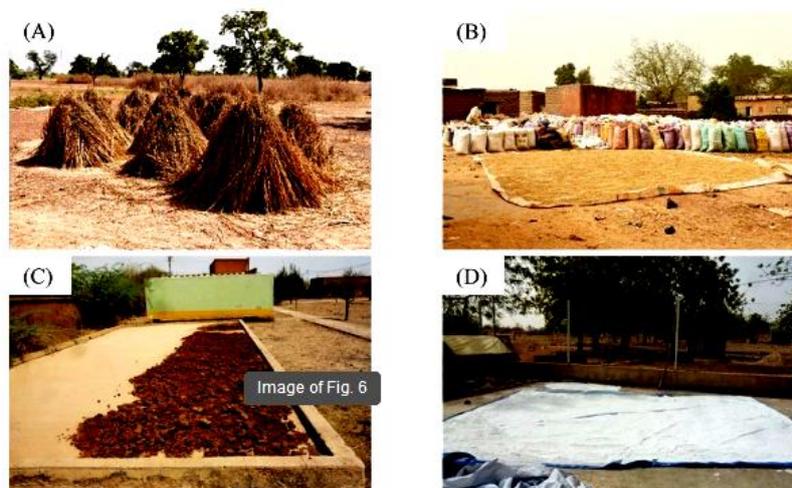
Historiquement, les techniques traditionnelles de séchage ont utilisé les produits non agricoles, puis, a été modifiée et étendue pour utilisée dans le séchage des produits agricoles [1]. Le séchage des produits agricoles (la figure I.3) est reflète l'ingéniosité humaine face à la nécessité de préserver les récoltes et de garantir une alimentation stable au fil des saisons et hors de ses saisons de récoltes.



**Figure I. 3:** Quelques produits agroalimentaires séchant

Initialement, il est connu que le séchage par l'exposition direct face aux rayons solaires permet les premières méthodes utilisées pour conserver les aliments. Les communautés anciennes étalaient les récoltes agricoles et implique l'exposition des produits à l'air libre directe au soleil sur des surfaces planes telles que les rochers, des nattes, ou du béton (voire la figure I.4). En particulier dans les pays en développement, Cette méthode est encore utilisable jusqu' au maintenant pour sécher des récoltes agricoles. Cette méthode consiste à exposer les aliments directement au soleil sur une surface plane, et à les laisser sécher pendant plusieurs jours jusqu'à ce qu'ils soient complètement secs. Le séchage au soleil en extérieur est considéré comme la technique la plus rentable, car il ne nécessite aucun équipement supplémentaire ni aucune source d'énergie autre que le soleil. Néanmoins, cette méthode présente plusieurs inconvénients, notamment le fait qu'elle repose entièrement sur la présence de la lumière solaire et l'impossibilité de prédire la qualité du produit final séché, qui peut être soumis à divers facteurs externes, tels que la poussière, la pollution de l'air, les insectes et les rongeurs. Autre utilisent les conditions avantageux de ses climats environnemental, et augmenter le rendement par l'exploitation de la chaleur des feux, et utilisent la combinaison du la chaleur du soleil et du vent [6,7]. Et parfois surélevées les surfaces de pose des produits en plein air a cause de facilité la circulation de l'air, qui ont été conçues pour sécher les aliments plus rapidement [8]. Au fil du temps, les techniques de séchage ont évolué en fonction des avancées technologiques et des besoins spécifiques des communautés populaires. Les structures plus sophistiquées telles que des séchoirs solaires

rudimentaires ont amélioré l'efficacité du processus tout en réduisant la dépendance à l'égard des conditions météorologiques [9].



**Figure I. 4:** Séchage à l'air libre par l'exposition direct face aux rayons solaires (séchage au soleil) [7].

Pour répondre aux besoins et la production énorme des produits alimentaire, Plusieurs procédés ont développées et ont été en mis en œuvre, tout en préservant la qualité nutritionnelle des produits. Au cours de cette modernisation des procédés, des nouveaux méthodes des séchages ont criées, développées et utilisées par l'industrialisation moderne, qu'elles comprises le séchage des aliments de petite et grande échelle comme la lyophilisation et le séchage par pulvérisation [10].

Aujourd'hui, les avances technologiques redéfinissent des méthodes de séchage des aliments comme les séchoirs électriques et d'autres dispositifs spécialisés, qui elles offrent des moyennes efficaces et contrôlés pour sécher des déférentes variétés des 'aliments tel que des fruits et légumes aux viandes et aux herbes [11]. Mais elles peuvent influencées négativement sur l'environnement, à cet effet et pour protéger notre planète contre les changements climatiques mondiaux et avantager l'utilisation des énergies renouvelables ainsi que les solutions adaptées au climat local, les séchoirs solaires constituent une alternative viable au séchage en plein air, contribuant ainsi à atténuer les défis susmentionnés.

### **I.5.Processus de séchage solaire des produits agro-alimentaire**

Le séchage des aliments est un procédé de préservation des produits alimentaires visant à éliminer l'humidité présentée à l'intérieure des produits alimentaires à l'aide de l'énergie thermique, Cette phénomène est fondé sur les principes du transfert de chaleur et de

masse, ce processus utilise généralement l'application de chaleur pour accélérer l'évaporation de l'eau des aliments. Principalement cette méthode étendue la durée de conservation des aliments en entravant la prolifération des micro-organismes, tels que les bactéries, les levures et les moisissures, qui requièrent un environnement humide pour se développer [12]. Alors, il est fréquemment connu que le séchage des aliments facilite leur transport contribue également à la réduction du poids, du volume des aliments, et facilitant leur stockage [13]. Le séchage des aliments est un phénomène de transfert de chaleur et de masse, il peut contenir deux essentielles étapes sont ; la migration de l'eau qui se trouve à l'intérieur du matériau lui-même vers à son interface, puis l'évaporation d'eau vers l'air de l'environnement, cette transition de phases nécessite l'apport de chaleur externe pour compenser l'énergie nécessaire à la vaporisation [14]. Il nécessite quatre phases distinctes :

1. Transport de chaleur d'une source externe vers l'interface de l'objet.
2. Le transfert de chaleur à l'intérieur de l'objet lui-même.
3. Le mouvement du matériau liquide et/ou en vapeur de l'objet vers son interface.
4. Le transport ultérieur de l'eau sous forme de vapeur vers l'environnement extérieur.

## **I.6.Objectif et principe du fonctionnement d'un séchoir solaire**

L'objectif d'un séchoir solaire est de fournir une quantité suffisante d'air chaud et sèche, qu'augmente la pression à l'intérieure de molécules du produit et pousse l'eau confinée à l'intérieur pour le transférer vers à la surface du produit, puis, il est évaporée et tiré à l'extérieure de séchoir. L'air haut et humide tiré vers à l'extérieure naturellement et parfois par un ventilateur. L'air naturel se chauffe dans le collecteur solaire et par la suite, il est transféré vers la chambre de séchage, le matériau à sécher capturant l'air chaud et transmis par la surface supérieure de produit. Le matériau est chauffé indirectement par l'air chaud ou bien directement par le soleil dans les séchoirs solaires directs (**figure I.4**).

Pour maintenir une humidité relative; L'air chaud peut contenir plus d'humidité que l'air froid telle sorte que la quantité d'humidité dépend à la température de l'air à laquelle il est chauffé dans le collecteur, ainsi que de l'humidité absolue de l'air quand il est entré dans le collecteur. La capacité d'absorption d'humidité de l'air est affectée par son humidité initiale et par la température à laquelle il est ensuite chauffé [15].

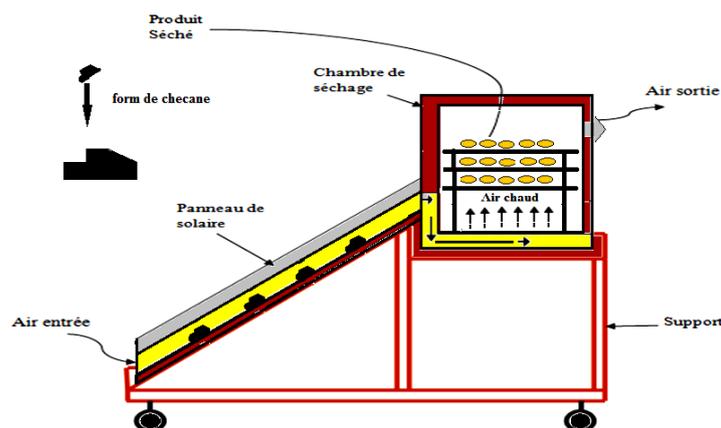


Figure I. 5: Principe du fonctionnement du séchoir solaire indirect.

### I.7.Types du séchage des produits agroalimentaires

Plusieurs critères peuvent être utilisés dans la classification des séchoirs, on peut trouver deux principaux critères de classement sont :

#### I.7.1.Selon l'épaisseur de l'échantillon

Selon l'épaisseur des échantillons à sécher on peut classifier l'opération de séchage des aliments en deux modèles de séchages:

##### I.7.1.1.Séchage en couche mince

Les produits à sécher sont organisés en une fine couche de quelques millimètres à centimètre seulement, à travers laquelle le flux d'air destiné à la déshydratation est induit soit par convection forcée, soit par convection naturelle, de manière parallèle ou perpendiculaire aux articles à sécher. Les formules de transfert de chaleur sont généralement dérivées de l'application de bilans thermique et massique à la fois au produit et à l'air de séchage [16].

##### I.7.1.2.Séchage en couche épaisse

C'est en particulier le séchage du fourrage et des grains comme les céréales et le café, qui sont exposés au flux d'air, que ce soit par convection forcée ou par convection naturelle. Ces produits, reconnus comme des substances poreuses, sont traversés par des courants d'air chaud. Le mécanisme de séchage est examiné et expliqué à l'aide de formules mathématiques qui définissent le mouvement de la chaleur et de l'humidité dans un milieu perméable à l'humidité [17, 18, 19,20, 21].

#### I.7.2.Selon le mode de séchage

Autres critères peuvent être utilisés dans la classification des processus de séchage, notamment le classement selon la méthode de génération de la chaleur et les méthodes de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [22]. Ces modes sont les suivants:

### **I.7.2.1. Le séchage par conduction**

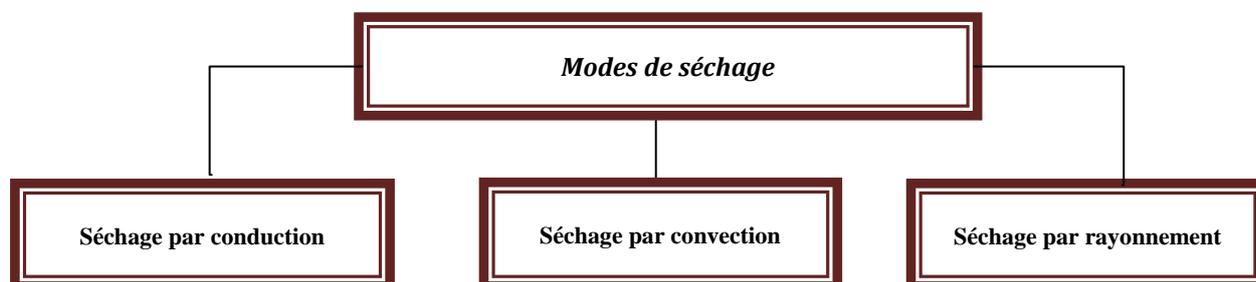
Ce mode de séchage implique un contact surfacique direct entre la source de chaleur et le produit à sécher. Cette méthode trouve une application dans divers secteurs industriels, notamment les textiles et la papeterie.

### **I.7.2.2. Le séchage par convection**

Quant à lui, implique l'interaction entre la source de chaleur (ou le matériau chauffant) et le produit grâce à l'utilisation d'un intermédiaire de séchage appelé le fluide caloporteur comme le séchage en soleil et le séchage solaire. Ce processus entraîne un échange de chaleur et de matière entre le produit et son environnement d'une manière direct ou indirect son contacte surfacique entre eux. Cette technique est couramment utilisée dans l'industrie alimentaire.

### **I.7.2.3. Le séchage par rayonnement**

Cette méthode de séchage utilise des sources de rayonnement électromagnétique pour éliminer l'humidité des matériaux. Cette approche permet un séchage rapide et efficace tout en préservant les caractéristiques physiques et chimiques des produits. Il est largement utilisé dans des industries telles que l'alimentation, le textile et les produits pharmaceutiques [23].



**Figure I. 6:** Différents modes de séchage

Au dessous du dernier mode, nous citons les modes de séchages suivants :

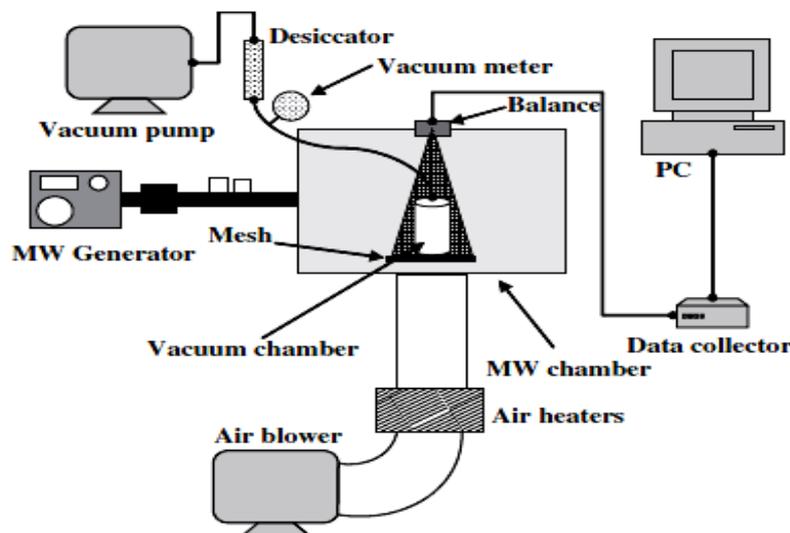
#### **I.7.2.3.1. Le séchage infrarouge**

Ce mode utilise la pénétration limitée de l'infrarouge (SIR) dans le produit, qui permet de chauffer rapidement les produits en couches minces. En raison de cette forme de séchage, il est classé comme chauffage surfacique. La chaleur absorbée est ensuite diffusée dans le produit par conduction. Il est utilisé dans les industries des peintures et vernis [24].

#### **I.7.2.3.2. Le séchage par micro-ondes**

La transmission de chaleur s'opère uniquement via les caractéristiques diélectriques des matériaux. Cette approche est particulièrement efficace dans le chauffage de l'eau en

raison de sa forte capacité à absorber les micro-ondes. Les ondes traversent les matériaux et subissent une diminution de leur puissance au cours du processus de transfert. Le séchage par micro-ondes est largement utilisé pour le séchage de divers produits tels que l'encre, la peinture, les adhésifs, et également pour le séchage sous vide des produits pharmaceutiques [25]. Et aussi dans le domaine des conservations des aliments, il englobe diverses applications telles que la cuisson des saucisses et de la viande, la déshydratation des croustilles et des légumes, la cuisson du pain, l'accélération du processus de décongélation des produits surgelés, la facilitation de la décongélation des produits surgelés, le blanchiment des légumes [26].



**Figure I. 7:** Equipements utilisées dans le séchage par micro-onde [26]

### **I.7.2.3.3. Séchage par lyophilisation**

La lyophilisation, également connue sous le nom de lyophilisation, est une technique de dessiccation alternative qui consiste à congeler une substance puis à l'exposer à une pression atmosphérique réduite. Grâce à ce procédé, l'eau peut passer directement de l'état solide à l'état gazeux sans passer par la phase liquide intermédiaire, préservant ainsi la structure et les caractéristiques du matériau [27]. Cette procédure particulière trouve une application dans des secteurs tels que l'industrie alimentaire et pharmaceutique dans le but de protéger les denrées périssables, les médicaments et autres matériaux sensibles à l'humidité ou nécessitant la conservation de leur saveur.

#### **I.7.2.3.4. Le séchage solaire**

Il utilise un parti des rayons solaire pour chauffer à la fois le produit et l'air ambiant. Ces systèmes ont utilisés pour collecter et concentrer le rayonnement solaire, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'air. Cette méthode gagne en popularité dans le domaine agroalimentaire [28].

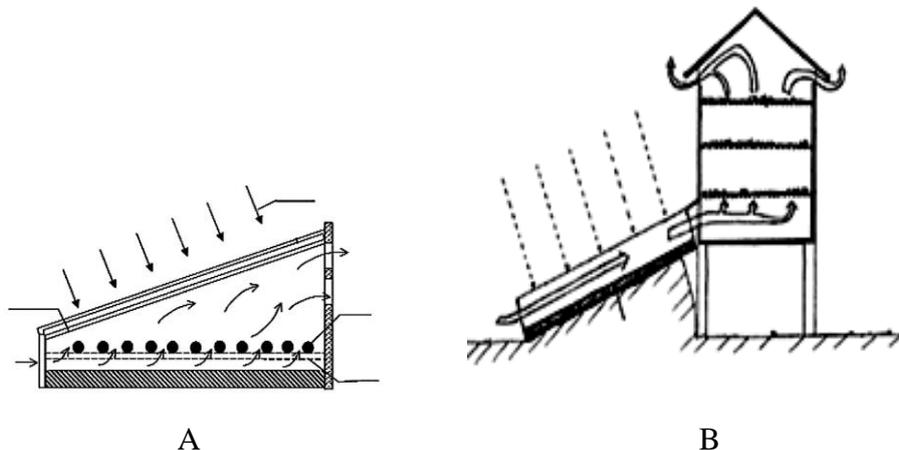
### **I.8. Type des séchoirs solaires**

À l'exception du séchage solaire, toutes les techniques de séchage requièrent des ressources énergétiques et des équipements pour leur fonctionnement, ce qui rend leur utilisation difficile, coûteuse ou impossible dans certains secteurs, notamment dans les pays en développement. Ainsi, le séchage solaire se présente comme la solution idéale pour ces régions, compte tenu des ressources solaires abondantes disponibles dans la plupart des pays en développement. Il existe plusieurs critères pour classer les séchoirs solaires, Parmi les critères les plus utilisant dans la classification de ce type des appareils, on distingue :

#### **I.8.1 Selon le mode d'alimentation par l'air chaude**

Les séchoirs solaires sont partagés suivants la méthode de chauffage et d'utilisation de la chaleur solaire en deux principales catégories comme la suite :

##### **I.8.1.1 Séchoirs solaires à convection naturelle (séchoirs passifs)**



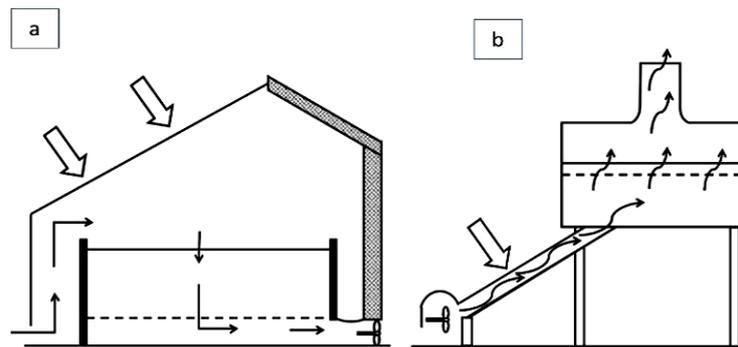
**Figure I. 8:** Séchoir solaire à convection naturelle ; A : direct, et B : indirect [29]

L'énergie solaire est exclusivement utilisée par les séchoirs solaires à convection naturelle, ce qui en fait la seule source de cette forme d'énergie. Ces séchoirs sont appelés séchoirs passifs. L'air à l'intérieur de ces séchoirs est chauffé par l'énergie solaire et traverse ensuite produits à sécher en raison des effets combinés de la flottabilité et de la pression du

vent. Ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux zones rurales. Par rapport au séchage à la lumière directe du soleil, ces séchoirs offrent une qualité de séchage nettement améliorée.

### **I.8.1.2 Séchoirs solaires à convection forcée (séchoirs actifs)**

Les séchoirs solaires à convection forcée, également appelés séchoirs solaires actifs, sont des appareils distincts qui utilisent l'énergie solaire comme principale source de chaleur pour sécher et déshydrater les produits agricoles, les fruits, les légumes, les herbes et d'autres matériaux.

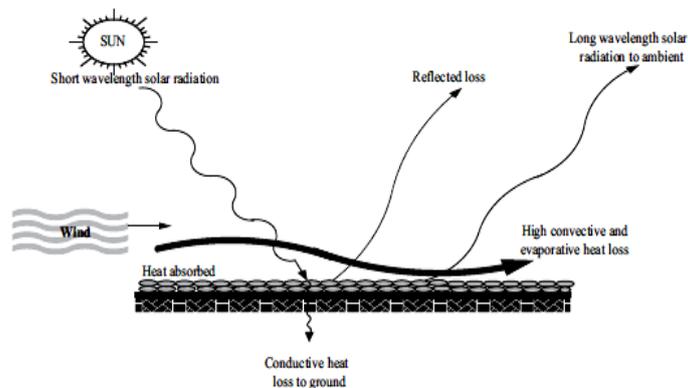


**Figure I. 9:** Séchoir solaire à convection forcée ; (a): direct, (b): indirect [30]

Et contrairement aux séchoirs solaires passifs qui utilisent uniquement l'énergie solaire dans le processus de séchage. Les séchoirs solaires à convection forcée utilisent des systèmes mécaniques pour transporter, gérer et accélérer la circulation de l'air vers ou à l'intérieur de la chambre de séchage (figure I.9).

## **I.8.2 Selon la méthode d'alimentation par l'air chaud**

### **I.8.2.1 Séchage au soleil ouvert (à l'air libre)**



**Figure I. 10:** schéma d'un séchage au soleil ouvert (à l'air libre) [31]

le "séchage au soleil ouvert" et appelé aussi par le séchage naturelle ou le séchage à l'air libre, il est un moyen de déshydrater les produits en les exposant directement au soleil

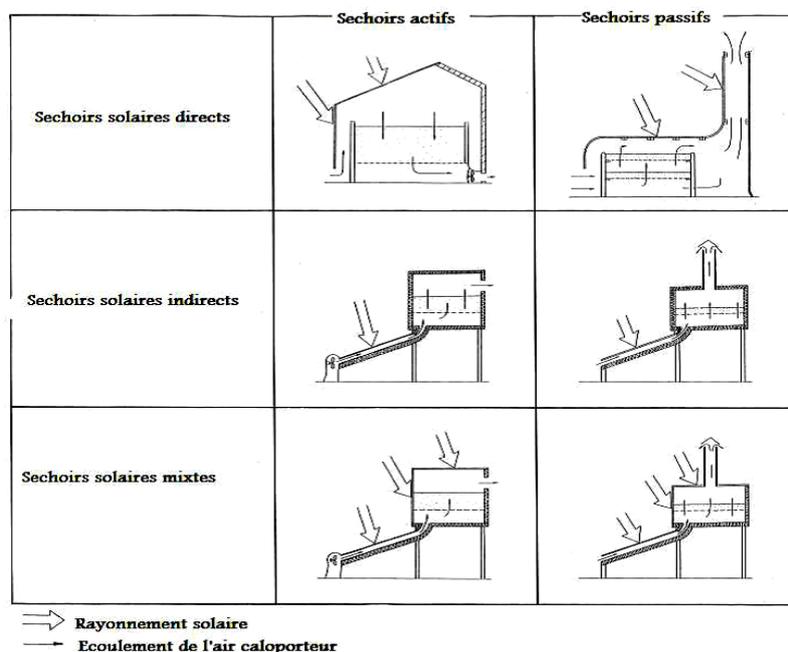
## Chapitre I : Généralité sur le séchage des produits agro-alimentaires

sans aucun type de protection ou de couverture. La plupart du temps, cette méthode est utilisée pour dessécher les produits végétaux, les vêtements, les substances naturelles telles que le bois et même les produits chimiques. Il convient de noter que les conditions météorologiques, telles que l'humidité de l'air, la température et d'autres facteurs écologiques, ont un impact important sur l'efficacité du séchage au soleil [31]. Cette méthode est souvent abordable et respectueuse de l'environnement, mais elle peut être limitée dans certaines régions ou pendant certaines saisons.

### **I.8.2.2. Séchage utilisant des séchoirs solaires**

Autre catégories peut être utilisé dans la conception et la configuration des constituants les séchoirs solaires, cette conception modifiant fondamentalement l'organisation des éléments du système séchage et la méthode d'utilisation de l'énergie solaire. Trois catégories secondaires distinctes de systèmes de séchage solaire dynamiques ou inertes sont identifiées, à savoir:

- ❖ Les séchoirs solaires directs.
- ❖ Les séchoirs solaires indirects.
- ❖ Les séchoirs solaires mixtes.
- ❖ Les séchoirs solaires hybrides.



**Figure I. 11:** les séchoirs solaires en fonction les modes d'utilisation d'énergie solaire [32].

### I.8.3. Types de Séchage utilisant des séchoirs solaires

#### I.8.3.1. Séchoir solaire direct

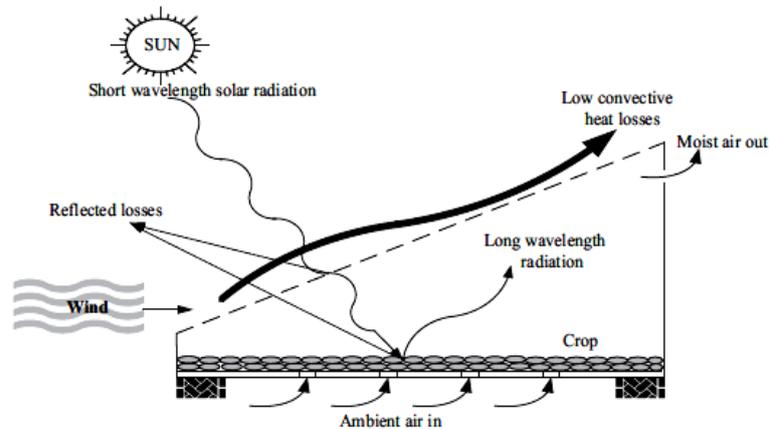


Figure I. 12: Schéma d'un séchoir solaire direct [33]

Le séchoir solaire direct est composé d'un composant unique qui occupe efficacement à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Généralement, un panneau de verre, de polyéthylène ou de plastique transparent est utilisé comme toit, tandis que la chambre de séchage est revêtue d'une teinte noire afin d'augmenter sa capacité à absorber la chaleur. Par conséquent, les produits desséchés peuvent être directement exposés au soleil.

#### I.8.3.2. Séchoir solaire indirect

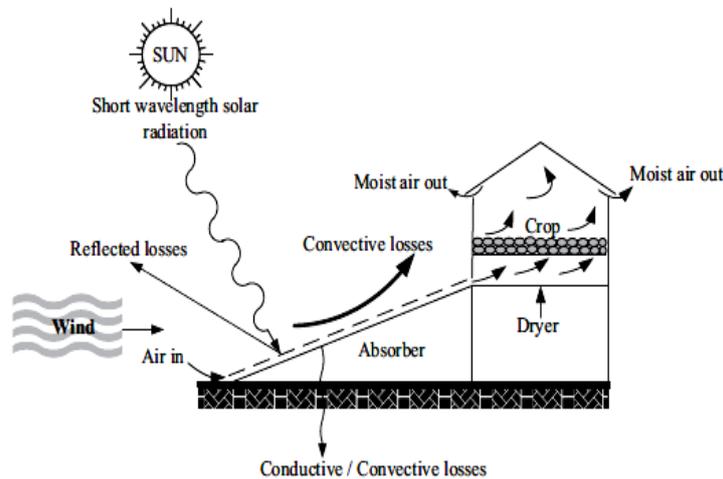


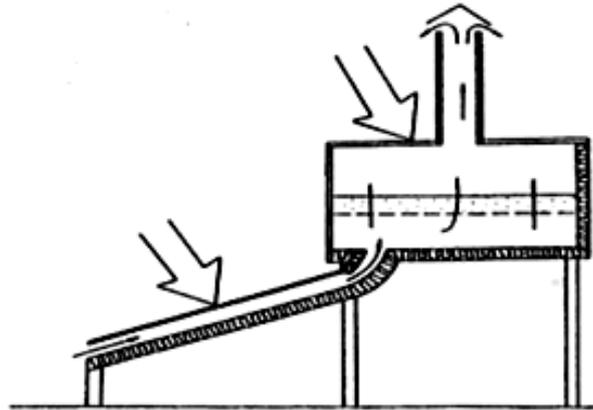
Figure I. 13: Schéma d'un séchoir solaire indirect [33]

Les séchoirs solaires indirects se composent de deux éléments sont les collecteurs, qui convertissent le rayonnement solaire en énergie thermique, et la chambre de séchage qui abrite les produits destinés au séchage. Le processus de transfert de chaleur et de masse entre

**Chapitre I : Généralité sur le séchage des produits agro-alimentaires**

l'air (agissant comme fluide caloporteur) et les articles à sécher fait également partie de ce système. L'air humide extrait des produits est expulsé de la chambre par une cheminée pendant le processus de séchage. En raison de leurs avantages, ces systèmes sont plus répandus et efficaces que les séchoirs directs, car ils contribuent à préserver les propriétés nutritionnelles des aliments [33].

**I.8.3.3. Les séchoirs solaires mixtes**

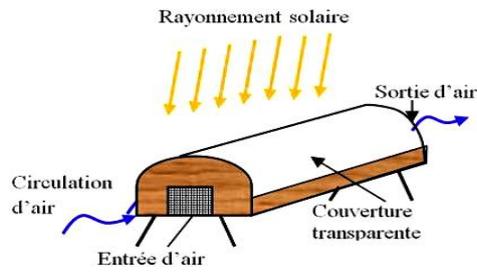


**Figure I. 14:** Séchoir solaire mixte passif [28]

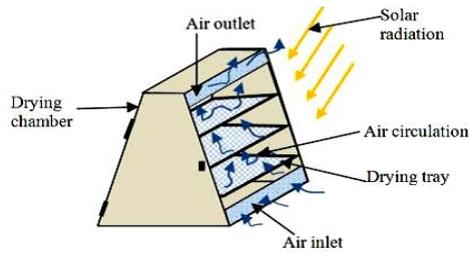
Ces séchoirs combinent les processus de transferts de chaleur introduisant dans les séchoirs directs et indirects. Ils exploitent l'impact collaboratif de la lumière directe du soleil sur la substance à déshydrater, en plus du capteur solaire, garantissant ainsi la fourniture de la chaleur nécessaire au processus de séchage.

Mode de séchage	Mode d'emplois	appellation	Exemple exprementale
Séchoirs solaires directs		Tente	

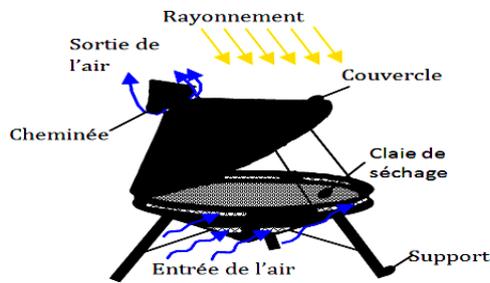
**Chapitre I : Généralité sur le séchage des produits agro-alimentaires**



Serre

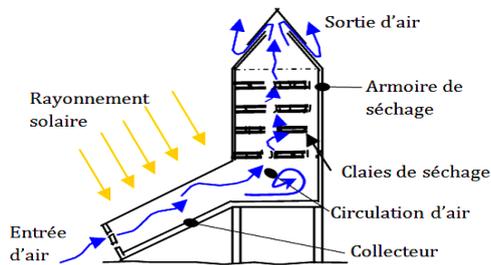


Direct cupboard

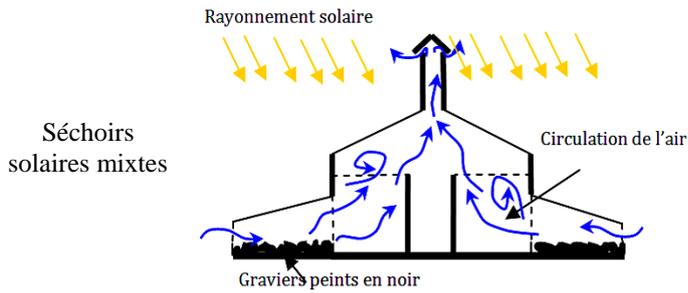


Séchoirs solaires indirects

Coquillage



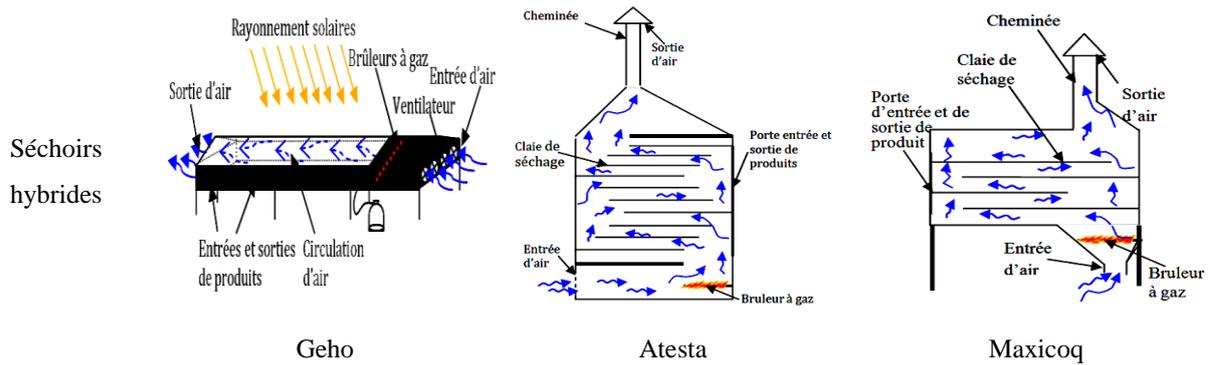
Armoire indirecte



Séchoirs solaires mixtes

Chambre





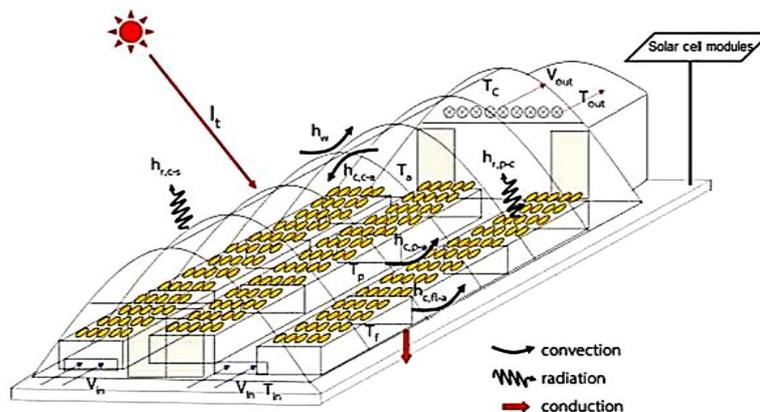
**Figure I. 15:** Différent types des séchoirs solaires [34]

### I.8.3.4. Autres types des séchoirs solaires

On note qu'il y a d'autres types des séchoirs dans les littératures, on cite les principales modèles comme suit :

#### I.8.3.4.1. Les séchoirs solaires tunnels

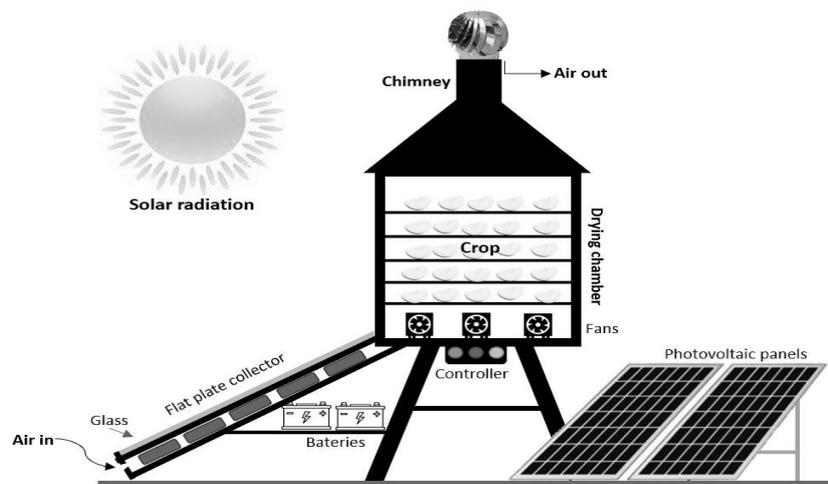
Ce séchoir spécifique est principalement conçu pour répondre aux besoins de production alimentaire, avec une attention particulière portée aux zones tropicales et subtropicales. Principalement déployé à des fins commerciales dans près de soixante pays, le séchoir Tunnel tire avantage des cellules photovoltaïques pour alimenter ses ventilateurs, accélérant ainsi le processus de séchage en favorisant une circulation d'air optimale. Cette innovation réduit considérablement les temps de séchage, améliorant ainsi l'efficacité globale du processus. Le système fonctionne en faisant passer l'air à travers une zone absorbant la chaleur solaire, avant de le diriger à travers des plateaux contenant les produits à sécher. Certains modèles sont dotés de dispositifs supplémentaires tels que des cheminées ou des systèmes de chauffage externes, comme l'utilisation d'eau chaude, permettant un séchage plus efficace, notamment la nuit ou par mauvais temps [34].



**Figure I. 16:** séchoirs solaires tunnels [29].

### **I.8.3.4.2. Les séchoirs solaires hybrides**

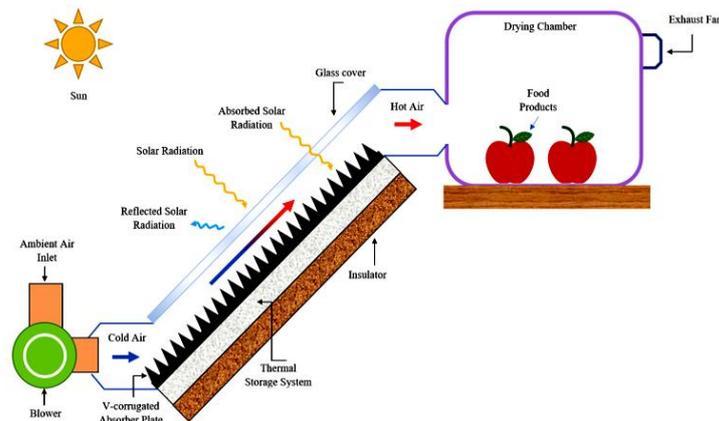
Dans ce type de séchoir, une source d'énergie supplémentaire telle que l'électricité, le gaz, le combustible, le bois ou la biomasse est intégrée. Cette source d'énergie est utilisée soit pour minimiser l'impact du changement climatique, soit pour contrôler précisément la température de l'air de séchage grâce à des thermorégulateurs. Les séchoirs solaires hybrides surpassent les modèles passifs en termes d'efficacité, car ils peuvent fonctionner même par temps nuageux ou la nuit. Cependant, leur production et leur investissement sont plus coûteux que ceux des séchoirs passifs. Ils nécessitent un accès à l'électricité locale, au gaz, aux pièces de rechange et à du personnel qualifié pour la maintenance [34].



**Figure I. 17:** Les séchoirs solaires hybrides. [35]

### **I.8.3.4.3. Séchoir solaire à rainures en V et équipé à un système de stockage thermique à PCM (Phase Change Material)**

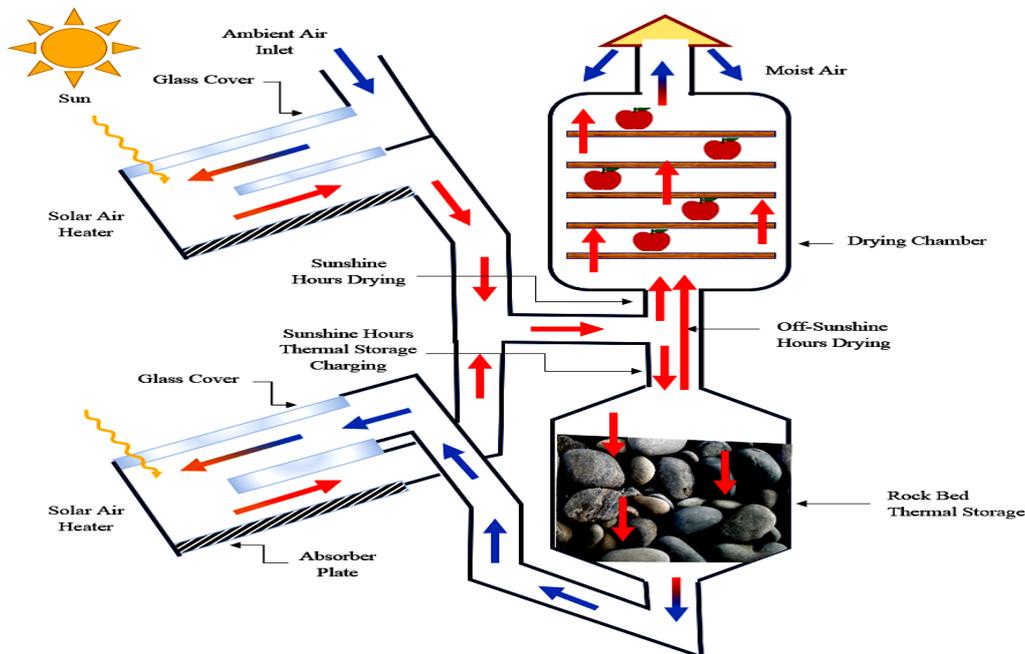
Ce type des séchoirs est équipé d'un chauffe-air solaire à rainures en V et d'un stockage thermique à PCM est un dispositif conçu pour sécher des produits, tels que des aliments ou des produits agricoles, en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur. Le système comprend un chauffe-air solaire à rainures en V, qui absorbe l'énergie solaire pour chauffer l'air, et un stockage thermique à PCM (Phase Change Material), qui stocke et libère la chaleur de manière efficace. Ce type de sèche-linge permet un séchage efficace et éco-énergétique, même dans des conditions météorologiques variables, grâce à l'utilisation de l'énergie solaire et à la capacité de stockage thermique



**Figure I. 18:** Séchoir solaire à rainures en V et équipé à un système de stockage thermique à PCM (Matériau a Change de Phase) [36]

**I.8.3.4.4. Séchoir solaire avec stockage thermique à lit de galets**

Les lits de roches ou de galets sont des solutions de stockage très prisées parmi les différents types de lits utilisés pour emmagasiner l'énergie solaire, en raison de leur grande capacité volumétrique, de leur coefficient de transfert de chaleur élevé, de leur faible porosité, de la faible chute de pression à travers le lit, ainsi que du coût modeste des matériaux de stockage et des conteneurs. La figure (Figure I.19) illustre un séchoir solaire équipé d'un système de stockage à lit de galets [36].



**Figure I. 19:** Séchoir solaire avec stockage thermique à lit de galets [36]

#### I.8.3.4.5. Le séchage basé sur le chauffage géothermique

Il est basé sur le chauffage géothermique utilise les ressources géothermiques à faible enthalpie, extraites près de la surface ou en profondeur, pour le séchage des fruits et légumes. Cette méthode exploite la chaleur extraite sous forme de vapeur ou d'eau chaude des puits géothermiques, ainsi que les déchets de chaleur des centrales géothermiques. Elle présente des coûts opérationnels très faibles et est particulièrement adaptée aux pays en développement situés près des frontières des plaques tectoniques, où les ressources géothermiques sont abondantes. Un schéma d'un séchoir alimentaire géothermique est présenté dans la Figure 5, montrant comment l'eau souterraine chaude est pompée à travers un échangeur de chaleur pour chauffer l'air servant de milieu de séchage [36].

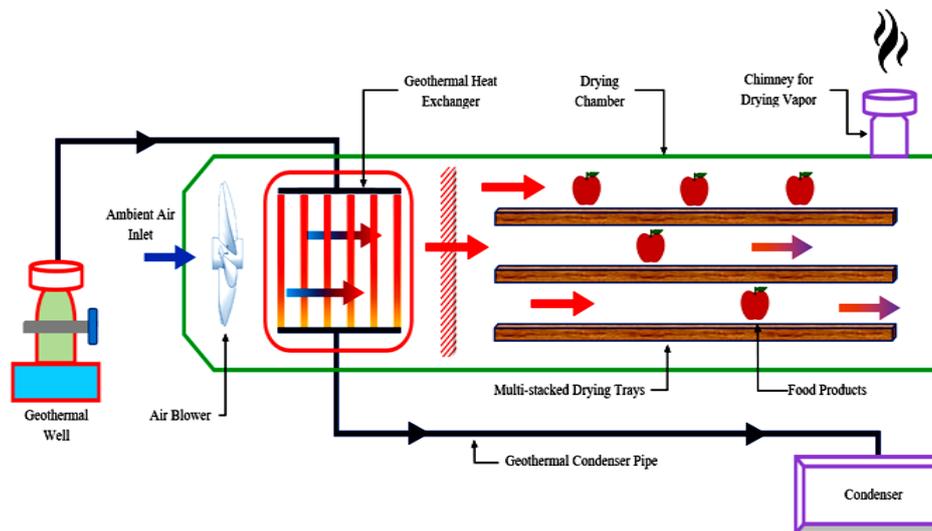
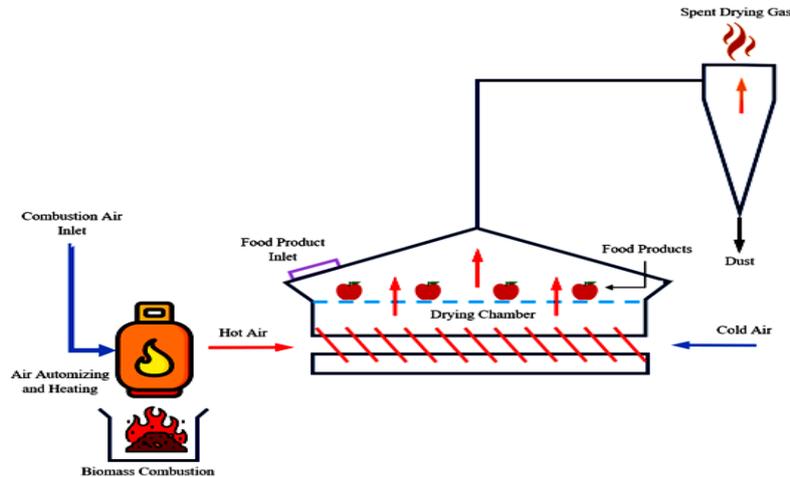


Figure I. 20: Schéma du séchoir géothermique à plusieurs plateaux empilés [36]

#### I.8.3.4.6. Système de séchage à base de biomasse:

Depuis des siècles, l'énergie issue de la biomasse est employée comme une source renouvelable de chaleur pour le séchage. Ce processus implique la production d'air chaud par la combustion de la biomasse, lequel est ensuite distribué à travers le séchoir. Néanmoins, les séchoirs conventionnels utilisant la biomasse présentent un rendement faible, principalement en raison de leur conception peu efficace, ce qui entraîne un gaspillage significatif d'énergie. Une solution consiste à concevoir des séchoirs avancés (Figure I.21), caractérisés par des pertes de chaleur réduites, un meilleur taux de transfert thermique et massique, ainsi qu'une qualité de produit améliorée, afin de dépasser les limitations des modèles traditionnels. Parmi les alternatives proposées, on trouve le séchoir rotatif à chaleur directe continue, le séchoir flash et le séchoir à lit fluidisé [36].



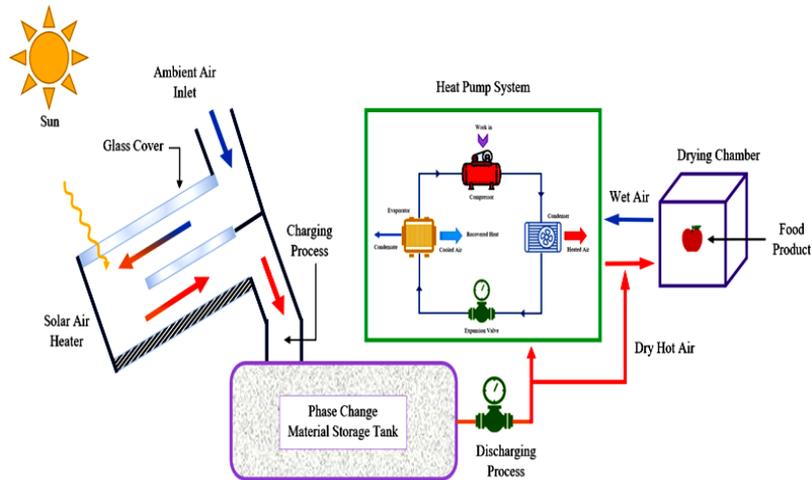
**Figure I. 21:** Séchoir à lit fluidisé utilisant la biomasse comme source d'énergie [36]

#### **I.8.3.4.7. Séchage hybride basé sur les pompes à chaleur:**

Les pompes à chaleur (PAC) sont une solution éco-énergétique qui exploite la chaleur de l'environnement pour économiser l'énergie. Dans le domaine du séchage, les séchoirs à pompe à chaleur utilisant l'air comme moyen de séchage dominant. Ces systèmes récupèrent la chaleur perdue, permettant des économies d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 50 % par rapport aux séchoirs conventionnels. Outre ces économies, ils améliorent la qualité des produits séchés. Surtout, dans les pays en développement à climat humide, où le contrôle de l'humidité pendant le séchage est crucial pour réduire le gaspillage alimentaire, les séchoirs à pompe à chaleur se révèlent particulièrement efficaces [36].

#### **I.8.3.4.8. Séchoirs à pompe à chaleur intégrant des PCM assistés par énergie solaire**

Le système de stockage thermique solaire utilisant des PCM peut réduire considérablement le coût du séchage et rendre le séchage hybride par pompe à chaleur plus flexible. Le système hybride, avec son énergie stockée pour les heures sans soleil, offre une efficacité accrue. Une conception avancée de séchoir à pompe à chaleur assisté par énergie solaire intégrant un stockage thermique PCM est présentée dans la (Figure I.22) [36].



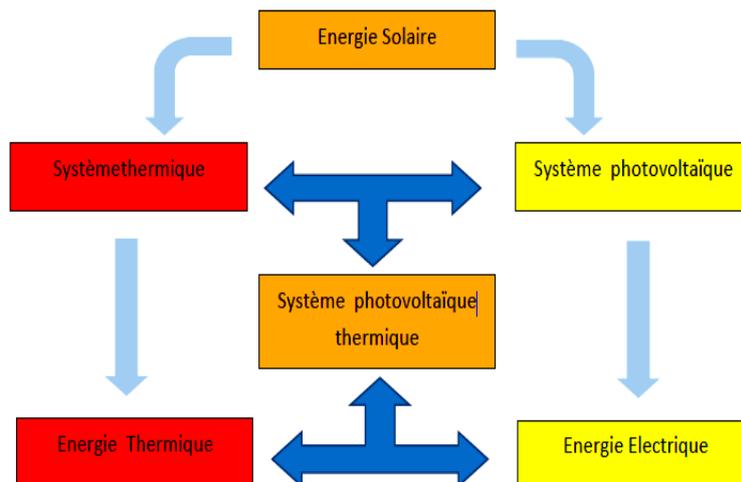
**Figure I. 22:** Séchoirs à pompe à chaleur intégrant des PCM assistés par énergie solaire [36].

### **I.9. Composantes d'un séchoir solaire**

Pour garantir un système de séchage solaire performant, il est nécessaire d'inclure différents éléments indispensables à la déshydratation efficace des aliments grâce à l'énergie solaire [37]. Les principaux éléments d'un séchoir solaire sont comme suit:

- ❖ Capteur solaire thermique.
- ❖ Chambre de séchage.
- ❖ Ventilateur ou système de circulation d'air.
- ❖ Évent de ventilation (cheminée).
- ❖ Grille de séchage.

#### **I.9.1. Capteur solaire thermique**



**Figure I. 23:** Schéma de divers systèmes technologies utilisées dans les capteurs solaires [38]

Ce composant est chargé de capter la lumière du soleil et est généralement constitué d'un matériau transparent tel que le verre ou du plastique qui laisse passer la lumière du soleil tout en retenant la chaleur à l'intérieur [38].

### **I.9.1.1.Rôle et fonctionnement**

Un capteur solaire thermique est pour les buts suivants:

#### **I.9.1.1.1.Absorption du rayonnement solaire**

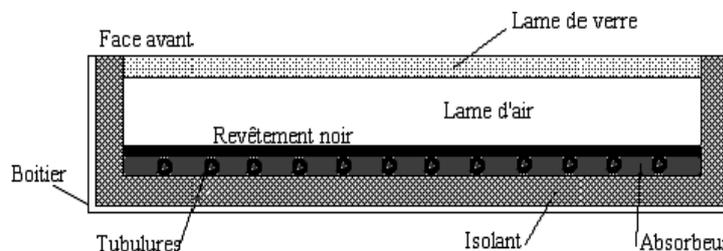
Les capteurs solaires thermiques sont conçus pour capter le rayonnement solaire en utilisant un milieu absorbant, généralement un revêtement foncé ou une surface métallique spécialisée. Ce milieu transforme le rayonnement solaire en énergie thermique.

#### **I.9.1.1.2.Transfert d'énergie thermique**

Après absorption, l'énergie thermique est transmise à un fluide caloporteur qui circule à travers le capteur solaire. Ce fluide peut être constitué d'eau, d'un mélange d'eau et d'antigel ou d'un autre fluide spécifiquement conçu pour le transport de chaleur.

#### **I.9.1.1.3.Récupération de chaleur**

Le fluide caloporteur chauffé est ensuite dirigé vers un échangeur de chaleur, où il libère son énergie thermique vers un système de stockage ou un circuit de chauffage domestique. Dans les séchoirs solaires, la chaleur accumulée peut être utilisée ultérieurement pour chauffer l'air de séchage entrant dans la chambre [39].



**Figure I. 24:** Schéma des composantes d'un capteur solaire plan [37]

### **I.9.1.2.Types de capteurs solaires**

Il existe plusieurs types sont :

#### **I.9.1.2.1.Capteurs plans à liquide sans vitrage**

Une alternative moins coûteuse aux capteurs solaires traditionnels, mais peuvent réduire l'efficacité en raison de la perte de chaleur si le verre ne retient pas la chaleur à l'intérieur du capteur.



**Figure I. 25:** Capteurs plans sans vitrage [40]

### **I.9.1.2.2. Capteurs plans à liquide avec vitrage**

Les capteurs liquides plans avec vitrage sont des composants utilisés dans les systèmes de chauffage solaire. Ils comprennent un absorbeur solaire pour capter la lumière solaire, un vitrage transparent pour retenir la chaleur et un système de tuyauterie pour faire circuler le fluide caloporteur. Ce fluide transporte la chaleur vers un réservoir de stockage ou un échangeur de chaleur. Ces capteurs fonctionnent en absorbant la lumière solaire, en la convertissant en chaleur et en la retenant à l'intérieur du capteur grâce au vitrage, fournissant ainsi de la chaleur pour divers usages domestiques.

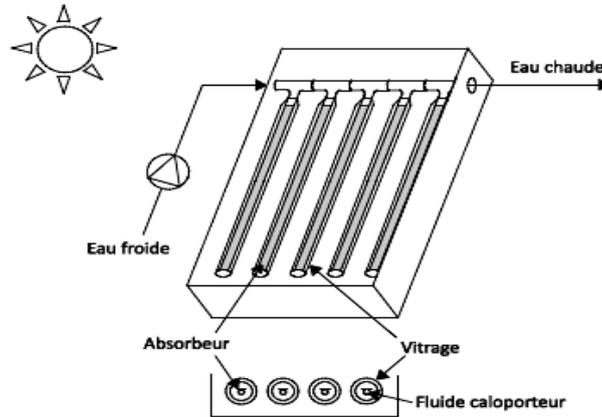


**Figure I. 26:** Capteur plan vitré [41]

### **I.9.1.2.3. Capteurs solaires à tubes sous vide**

Ce dispositif est utilisé pour convertir l'énergie solaire en chaleur. Il se compose de tubes en verre transparents, scellés hermétiquement pour créer un vide à l'intérieur, avec un revêtement absorbant qui convertit la lumière solaire en chaleur. Un fluide caloporteur circule à l'intérieur des tubes, absorbant la chaleur et la transportant vers un réservoir de stockage ou

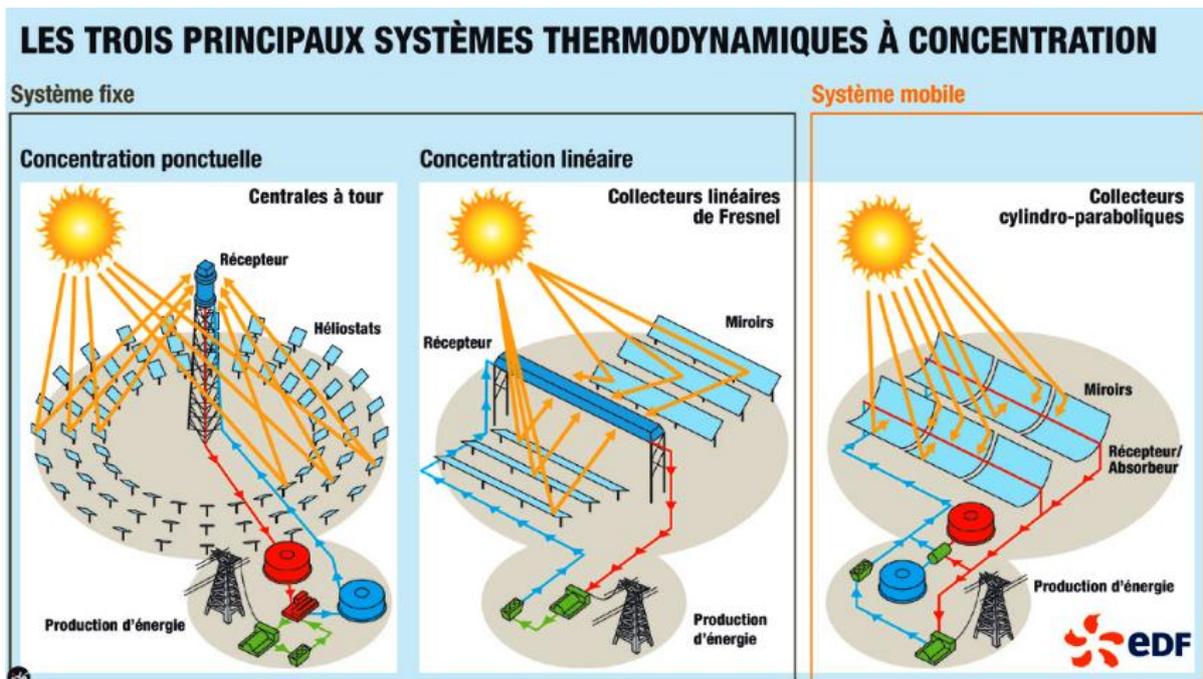
un échangeur de chaleur pour une utilisation domestique. Les capteurs à tubes sous vide sont réputés pour leur haute efficacité, même par temps froid ou nuageux, en raison de leur capacité à retenir la chaleur dans le vide des tubes.



**Figure I. 27:** Capteur à tube sous vide [42]

#### **I.9.1.2.4. Capteur solaires à concentration**

Ils utilisent des miroirs ou des lentilles pour rayonner la lumière du soleil dans une zone limitée. Cette méthode permet de générer de grandes quantités d'énergie thermique pour chauffer des liquides ou pour convertir des liquides en électricité à l'aide de cellules solaires. Ils trouvent des applications fréquentes dans les grandes installations solaires destinées à la production d'électricité et dans les secteurs industriels nécessitant des températures élevées.



**Figure I. 28:** Capteurs solaires à concentration [43]

### **I.9.1.3. Composantes d'un Capteur solaire plan**

Le capteur plan se compose essentiellement à 4 parties [37] sont :

#### **I.9.1.3.1. La plaque de verre**

Ce composant joue un rôle crucial pour absorber la plus grande quantité des rayonnements solaires incidents. Aussi il joue un rôle crucial pour assurer une transmission efficace du rayonnement reçu à l'absorbeur. Selon les besoins, il peut être simple, double ou triple vitrage pour renforcer l'effet de serre et réduire les pertes dans l'environnement.

#### **I.9.1.3.2. Le fluide caloporteur**

Ce type des fluides est le responsable sur le transfert de la chaleur stockée du capteur vers l'environnement intérieur ou extérieur. Il possède une grande capacité de stockage et d'échange de chaleur. L'eau et l'air sont couramment utilisés comme fluides caloporteurs en raison de leur rentabilité.

#### **I.9.1.3.3. L'absorbeur**

Généralement fabriqué à partir de tôle noire, a pour but d'absorber et de retenir la chaleur afin de faciliter sa transmission aux autres composants par convection, rayonnement ou conduction. Pour une efficacité optimale du capteur, l'absorbeur doit permettre un échange thermique maximal avec le fluide caloporteur afin de minimiser les pertes dans l'environnement extérieur.

#### **I.9.1.3.4. Le capteur solaire**

Stockage de l'énergie thermique provenant du rayonnement solaire; toutefois, pour tirer pleinement partie de cette énergie, il est impératif d'utiliser un matériau isolant qui minimise les pertes de chaleur dans l'environnement. Les composantes de capteur solaire sont présentées dans la figure suivante;

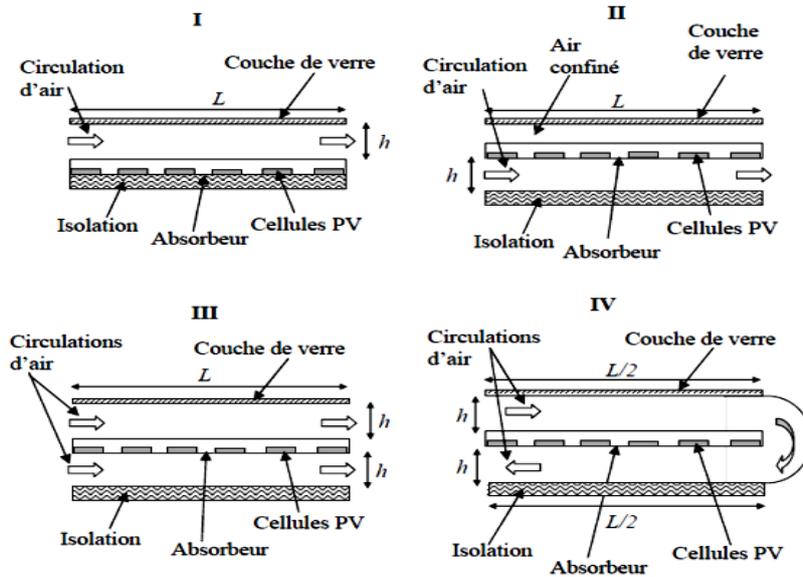


Figure I. 29: Schéma de différents prototypes d'un capteur solaire plan [44]

### I.9.2. Chambre de séchage

C'est l'espace où les aliments sont disposés pour être séchés. Il est situé juste en dessous du capteur solaire, cette zone est utilisée comme un espace de séchage pour les produits alimentaires. Son organisation vise à maximiser l'exposition des aliments à la chaleur solaire tout en favorisant une bonne circulation d'air.



Figure I. 30: Exemple d'une chambre de séchage [45]

### I.9.3. Ventilateur ou système de circulation d'air

Il est nécessaire pour assurer une déshydratation homogène des aliments en assurant un flux d'air constant dans la pièce de séchage. Qu'il permet d'éliminer plus facilement l'humidité des aliments, ce qui accélère le processus de séchage.

### I.9.4. Événement de ventilation (cheminée)

Permet à l'humidité extraite des aliments de s'échapper du système, ce qui évite l'accumulation d'humidité qui pourrait perturber le processus de séchage

### **I.9.5. Grille de séchage**

Les aliments sont disposés sur des plateaux ou des grilles à l'intérieur de la chambre de séchage. Ce qui favorise une distribution homogène des aliments et facilite la circulation de l'air autour des plateaux.

## **I.10. Paramètres influençant le temps de séchage solaire des produits agricoles**

Temps de séchage ou bien, périodes de séchage des produits agro-alimentaires tels que les fruits et les légumes peuvent être influencés en fonction des plusieurs facteurs : le type de produit, sa taille, sa forme, sa teneur initiale en eau, la méthode de séchage utilisée (air chaud, solaire, lyophilisation, etc.) et les conditions de séchage (température, humidité de l'air, vitesse de l'air, ... etc). Dans le paragraphe présenté ci-dessous on cite les principaux facteurs qui influencent la durée de séchage:

### **I.10.1. Caractéristiques de l'air de séchage**

Le séchage par convection est la méthode la plus courante dans l'industrie alimentaire. Elle consiste à utiliser un flux d'air chaud à faible humidité pour extraire l'humidité des matériaux. Le flux d'air se transforme en un mélange d'air sec et de vapeur d'eau en raison de l'évaporation de l'eau contenue dans les solides [21], [46]. Ce mélange est appelé air humide. Ensuite, quelques paramètres clés caractérisant l'air humide sont définis :

#### **I.10.1.1. L'humidité absolue (X)**

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau; représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau ( $m_{v,e}$ ) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec ( $m_{a,s}$ ) contenue dans ce même volume.

$$X = \frac{m_{v,e}}{m_{a,s}} \quad (\text{I. 1})$$

#### **I.10.1.2. L'humidité relative ( $\varphi$ )**

L'humidité relative ( $\varphi$ ) représente la proportion entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air ( $P_v$ ) et la pression de saturation ( $P_{s,\theta}$ ) de cette vapeur d'eau à la température  $\theta$

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{s,\theta}} \quad (\text{I. 2})$$

Dans la pratique de séchage, on utilise l'humidité absolue (X), qu'il remplace la pression  $P_v$  par conséquent on donne le rapport entre l'humidité absolue (X) de l'air pour une certaine température et  $X_s$  humidité absolue correspondante à l'état de saturation pour la même température; rapport appelée degré de saturation  $\Psi$ .

$$\Psi = \frac{x}{x_s} \quad (\text{I. 3})$$

### **I.10.1.3. La température sèche T et la température humide T<sub>H</sub> de l'air**

La température sèche d'un air ou d'un gaz est définie comme la température mesurée par une sonde de température exposée directement au courant d'air ou de gaz. La température humide correspond à la température relevée par un thermomètre lorsque son bulbe est enveloppé dans une mèche humide. La différence (T-TH) représente l'humidité relative de l'air [46].

❖ Elle est égale à zéro si l'air est saturé en vapeur d'eau c'est-à-dire  $\phi=100\%$  donc pas d'évaporation possible.

❖ Elle augmente avec la différence  $[P_s(\theta) - P_v]$  qui est le terme moteur du transfert de masse.

### **I.10.1.4. Enthalpie de l'air humide**

L'enthalpie de l'air humide caractérise la quantité d'énergie contenue dans cet air. Elle est représentée par H pour 1 kg d'air sec associé à Y kg de vapeur d'eau à une température de  $\theta^\circ\text{C}$ . Cette enthalpie correspond à la quantité de chaleur à fournir au mélange, sous une pression constante, pour le porter de sa température de référence,  $0^\circ\text{C}$ , à la température de  $\theta^\circ\text{C}$ . Les états de référence pris en compte sont l'eau liquide et le gaz sec à  $0^\circ\text{C}$ . L'enthalpie de l'air humide, notée H, est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

$$H = cp_a\theta + Y(L_v + cp_e\theta) \quad (\text{I. 4})$$

Où

- ♦  $cp_a$ : chaleur massique de l'air.
- ♦  $cp_e$ : l'eau à l'état gazeux
- ♦  $L_v$ : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $0^\circ\text{C}$ .

## **I.10.2. Caractéristiques des solides humides**

### **I.10.2.1. Humidité absolue**

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I. 5})$$

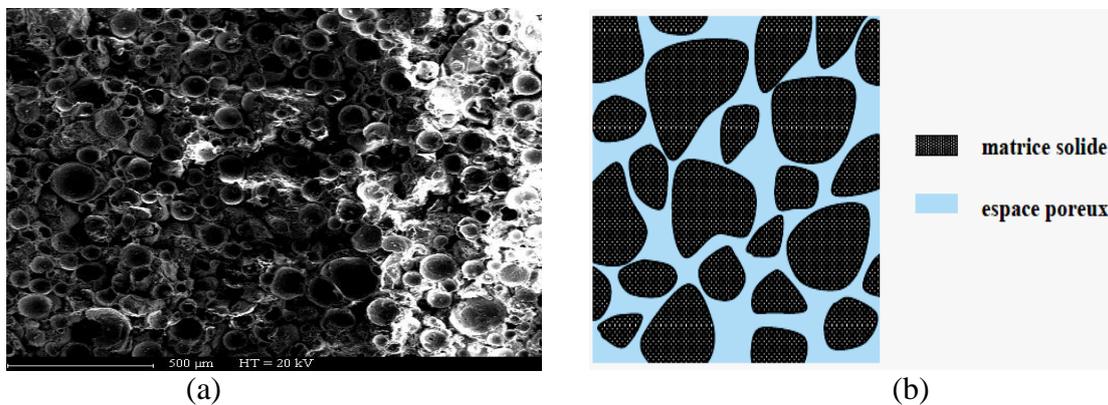
### **I.10.2.2. Humidité relative**

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

$$\varphi = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{I. 6})$$

### I.11. Les produits agricoles comme des milieux poreux

En raison de leur structure interne, Les légumes et les fruits peuvent être considérés comme des matériaux poreux, car ils contiennent plusieurs pores et espaces intercellulaires. Le transport de l'humidité dans le produit agro-alimentaire dépend à la fois de la structure des pores, le pourcentage de porosité dans les produits et l'interaction de l'humidité avec la matrice alimentaire, cette pourcentage de porosité joue un rôle très important dans l'efficacité du séchage [47]. Connaître la structure poreuse des fruits et légumes aide à optimiser les méthodes de séchage et à garantir la qualité des produits.



**Figure I. 31:** Matrice d'un produit poreux ; (a): photos d'un microscopique d'un produit végétale, et (b): composants d'un produit poraux [48]

Les matériaux poreux sont caractérisés par des cavités ou des vides dans leur structure, allant de tailles nanométriques à millimétriques. Cette porosité peut être aléatoire ou organisée et confère aux matériaux des propriétés telles que l'absorption, la perméabilité aux fluides, la légèreté, ainsi que l'isolation thermique ou acoustique. Leur structure complexe offre une variété de propriétés utiles [48].

#### I.11.1. Grandeurs caractéristiques des milieux poreux

Les principales propriétés des milieux poreux effectuent le phénomène de séchage sont les suivantes [49]:

##### I.11.1.1. Perméabilité

Capacité d'un milieu poreux à permettre le mouvement d'un fluide à travers ses pores. Ceci est déterminé par la taille des pores, la forme, la connectivité et la viscosité du fluide.

La perméabilité intrinsèque  $k$  [ $L^2$ ] est une propriété intrinsèque du milieu poreux, indépendamment des caractéristiques du fluide. Il caractérise l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de charge, elle est donnée par:

$$K = \frac{\varphi \cdot \mu}{S \cdot (\Delta p / \Delta x)} \quad (I. 7)$$

Avec:

- $\varphi$ : Débit du fluide [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ].
- $\mu$ : La viscosité dynamique du fluide [ $M L^{-1} T^{-1}$ ].
- $S$ : L'aire de la section traversée par le fluide [ $L^2$ ].
- $\Delta P / \Delta x$ : La variation de la charge par l'unité de longueur [ $ML^{-2}T^{-2}$ ].

Le coefficient de perméabilité  $K$  [ $L/T$ ] (ou la conductivité hydraulique) est le paramètre reliant la vitesse d'écoulement au gradient hydraulique dans la loi de Darcy. Elle dépend de la perméabilité intrinsèque  $k$  mais aussi de la viscosité dynamique  $\mu$  [ $M/(L.T)$ ] et de la masse volumique du fluide  $\rho$  [ $M/L^3$ ] qui circule :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (I. 8)$$

### **I.11.1.2.Porosité**

Pourcentage du volume total d'un milieu poreux occupé par des vides ou des pores. La porosité dépend de la taille et de la répartition des pores au sein du matériau. La porosité totale est le rapport entre le volume des vides et le volume total du milieu poreux:

$$\varepsilon = V_{vide} / V_{Total} \quad (I. 9)$$

Une partie de l'eau contenue dans le milieu poreux est liée à celui-ci. Elle ne peut pas circuler. D'un point de vue hydrodynamique, elle peut être considérée comme une partie du solide. Cela nous conduit à définir une porosité cinématique ou porosité efficace,  $\varepsilon_c$  liée à la circulation des fluides donc la porosité efficace est le rapport du volume d'eau mobile, par opposition à l'eau liée à la matrice par des forces d'attraction moléculaire, qu'un milieu poreux peut contenir à son volume total.

$$\varepsilon_c = V_{eau\ mobile} / V_{Total} \quad (I. 10)$$

**I.11.1.3.Capacité d'absorption**

Capacité d'un milieu poreux à retenir le liquide à sa surface ou dans ses pores. Cette propriété est influencée par la surface spécifique du matériau et la nature de l'interaction entre le liquide et le matériau.

**I.11.1.4.Capacité de rétention d'eau**

Capacité d'un milieu poreux à retenir l'eau dans ses pores. Cette propriété est importante dans des applications telles que l'agriculture, l'ingénierie environnementale et la construction.

**I.11.1.5.Saturation**

La saturation représente la fraction de l'espace poreux qui est occupée par un fluide. Elle peut varier en fonction des conditions externes telles que la pression et la température.

**I.11.1.6.Conductivité hydraulique**

La conductivité hydraulique mesure la capacité d'un matériau poreux à transmettre un flux d'eau sous l'effet d'un gradient de pression. Elle dépend de la perméabilité, de la porosité et de la viscosité du fluide

**I.11.1.7.Conductivité thermique**

Capacité d'un milieu poreux à conduire la chaleur. Cela dépend de la composition du matériau, de la conductivité thermique des composants solides et de la conductivité effective du liquide présent dans les pores.

**I.12.L'eau dans les produits agricoles**

La quantité de l'eau présentant dans les produits agricoles peut être trouvée sous trois formes [50], libre (eau capillaire), liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau.



**Figure I. 32:** Formes des eaux dans un milieu poreux [48]

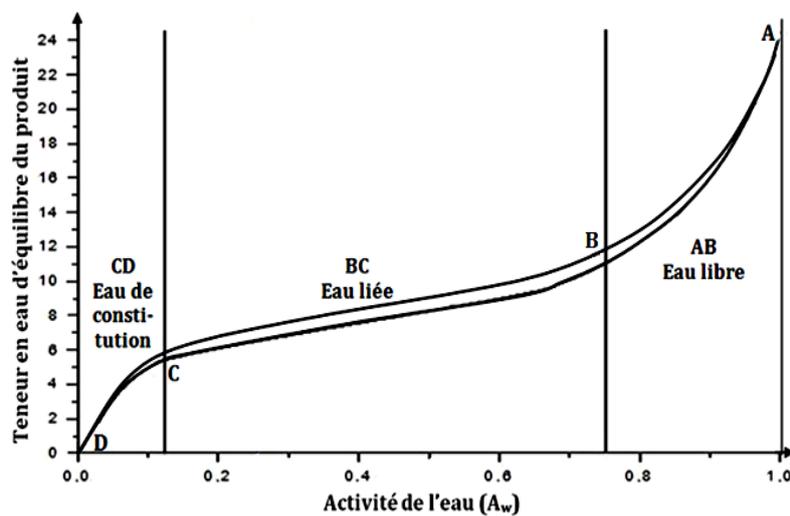
- L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire.

- L'eau liée est adsorbée dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants et la taille des pores dans le matériau (un produit constitué de "petits pores" aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores").

- La vapeur d'eau mélangée à l'air sec occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

### **I.12.1. Courbe de sorption-désorption du matériau poreux**

À l'échelle macroscopique, l'humidité accumulée dans un matériau à l'équilibre dépend de l'humidité relative de l'environnement ambiant. Cette capacité de stockage est représentée par la courbe de sorption du matériau, qui montre la teneur en eau massique en fonction de l'humidité relative (HR). Pour un matériau hygroscopique, cette courbe, illustrée à la (Figure I.32), est unique. Elle décrit les états d'équilibre successifs du matériau avec l'environnement ambiant, dans des conditions de température constantes [51]. Pour traduire les comportements d'un matériau poreux à l'échelle microscopique, on distingue trois phases ou domaines comme suivant:



**Figure I. 33:** Courbe caractéristique de sorption-désorption d'un produit alimentaire [51]

#### **I.12.1.1. Zone hygroscopique**

Lorsque le matériau est exposé à de faibles humidités relatives (jusqu'à environ 40 %), l'eau s'adsorbe sur les parois des pores, d'abord en couches mono-moléculaires, puis en couches multimoléculaires. La condensation capillaire survient lorsque tout l'espace d'un pore

est rempli d'eau, se manifestant d'abord dans les plus petits pores. Dans cette zone (jusqu'à 95 % d'humidité relative), l'eau est principalement transportée sous forme de vapeur.

**I.12.1.2.Zone super-hygroscopique**

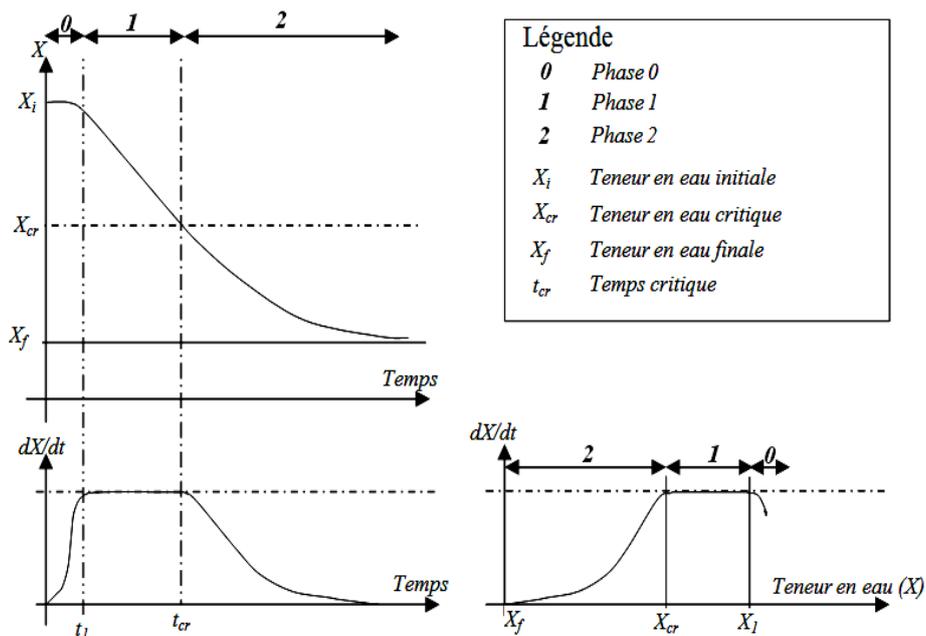
Au-delà d'un certain seuil d'humidité relative (généralement autour de 95 %), l'eau liquide remplit la majorité de l'espace poreux, formant des poches où la vapeur circule. Le matériau peut alors absorber de l'eau jusqu'à atteindre sa saturation capillaire.

**I.12.1.3.Zone saturée**

Lorsque le matériau est en contact prolongé avec de l'eau liquide, les petites poches d'air résiduelles disparaissent progressivement, menant à la saturation maximale. Le transfert d'air à travers le matériau devient alors impossible.

**I.12.2.Périodes des courbes de la cinétique de séchage**

La courbe de séchage des produits agroalimentaires (voire la figure I.33) montre l'évolution de la teneur en eau d'un produit au fil du temps pendant son processus de séchage.



**Figure I. 34:** Courbes de cinétique de séchage [54]

Cet outil permet de suivre la réduction de l'humidité dans le produit et d'optimiser le séchage pour garantir la qualité du produit final. La courbe de séchage comporte trois phases distinctes [52] [53]:

**I.12.2.1.Phase de taux de séchage constant (phase 0)**

Au début du séchage, l'eau s'évapore principalement de la surface du produit, ce qui entraîne un taux de séchage rapide et constant. Cette phase dure jusqu'à ce que la surface commence à se dessécher.

**I.12.2.2.Phase de taux de séchage décroissant (phase 1)**

Lorsque la surface du produit est sèche, le taux de séchage ralentit car l'eau doit migrer des couches internes vers la surface pour s'évaporer. Cette phase se caractérise par une diminution progressive du taux de séchage.

**I.12.2.3.Phase d'équilibre d'humidité (phase 2)**

La plupart de l'eau a été éliminée du produit et le taux de séchage est négligeable. Cette phase marque l'atteinte de l'humidité d'équilibre souhaitée, signifiant la fin du séchage. La définition des courbes de séchage aident à améliorer les processus pour maximiser l'efficacité énergétique et garantir une qualité optimale du produit fini. L'allure de courbes de séchage des produits traçantes ont décrit à partir de types des courbes suivantes:

1. courbe de séchage donnant la teneur en eau en base sèche (X) (ou en base humide) en fonction du temps (t).
2. courbe de vitesse de séchage  $\left(\frac{dX}{dt}\right)$  en fonction du temps (t) obtenue en dérivant la fonction de la teneur en eau par rapport au temps.
3. courbe de la vitesse de séchage  $\left(\frac{dX}{dt}\right)$  en fonction de la teneur en eau (X).

La représentation fiable de l'équilibre et aussi de l'allure de la perte en eau du produit est nécessaire pour contrôler le procédé du séchage. Le contrôle ou la bonne conduite de l'opération du séchage permet d'éviter l'altération du produit au cours du séchage.

**I.13.Les avantages et inconvénients du séchage solaire des produits agro-alimentaire**

Le séchage solaire présente des avantages écologiques et économiques, parce qu'elle exploite une source d'énergie renouvelable et gratuite, réduisant ainsi la dépendance à l'égard de sources d'énergie non renouvelables. Le séchage solaire est fréquemment utilisé dans le Sahara et les régions caractérisées par un ensoleillement abondant et chaleur météorologiques [54]. Comme toutes les méthodes de préservation des produits alimentaires, l'utilisation du séchage solaire des aliments présente à des avantages et des inconvénients sont comme la suit:

### **I.13.1. Avantages et Inconvénients du séchage solaire**

Les principaux avantages associés au procédé de séchage peuvent être notes comme les suivantes:

- ❖ Le séchage solaire utilise l'énergie du soleil, une source d'énergie renouvelable et gratuite, réduisant la dépendance aux sources d'énergie fossiles.
- ❖ Le coût opérationnel du séchage solaire est souvent inférieur à celui d'autres méthodes.
- ❖ Les technologies de séchage solaire sont relativement simples et accessibles, adaptées aux variables échelles, des grandes ou des petites exploitations agricoles dépend aux initiatives communautaires.
- ❖ L'utilisation de l'énergie solaire aidée à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, favorisant ainsi des pratiques sur le plan environnemental.
- ❖ Le séchage solaire peut valoriser les produits agricoles locaux à plus longue durée de conservation.
- ❖ Rendement satisfaisant par rapport les moyens utiles dans le séchage.
- ❖ Conserver les enzymes responsables de goûts et brillance des aliments.
- ❖ La réduction significative des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises, grâce à la diminution de leur masse.

### **I.13.2. Inconvénients du séchage solaire**

Bien que le séchage solaire des aliments présente de nombreux avantages, il comporte également certains inconvénients. Voici quelques principaux inconvénients associés au séchage solaire:

- ❖ Dépendance aux conditions météorologiques, ou Le séchage solaire est étroitement lié aux conditions météorologiques, notamment à l'ensoleillement.
- ❖ Temps de séchage prolongé par rapport à d'autres méthodes de séchage.
- ❖ Risque de contamination est très élevé lorsque les aliments sont exposés à l'air libre pendant le séchage par des insectes, des poussières ou d'autres agents extérieurs, surtout dans l'absence de protections adéquates.
- ❖ Espace requis : Les installations de séchage solaire nécessitent souvent une grande surface d'exposition au soleil, ce qui peut poser des défis dans les zones urbaines densément peuplées ou sur des terrains limités.

## Chapitre I : Généralité sur le séchage des produits agro-alimentaires

❖ Le processus de séchage solaire nécessite une surveillance constante pour s'assurer que les conditions météorologiques n'affectent pas négativement le processus de séchage.

❖ Dans certaines régions, le séchage solaire peut être moins efficace pendant les saisons moins ensoleillées, limitant ainsi la disponibilité de cette méthode de conservation à certaines périodes de l'année.

❖ Des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments,

❖ Influence négative sur brunissement.

❖ Des durcissements superficiels dans les tranches épaisses.

❖ Des modifications irréversibles de la texture, affectant ainsi la capacité de réhydratation.

Malgré ces inconvénients, le séchage solaire reste une méthode de conservation largement utilisée et précieuse, surtout dans les régions où l'énergie solaire peut être pleinement exploitée.

# **CHAPITRE II**

---

## **ETATS DE L'ART**

## **II.1. Introduction**

La recherche scientifique sur le séchage solaire des produits agroalimentaires suscite de plus en plus d'attention en raison de son potentiel de fourniture de remèdes durables en matière de conservation des aliments. La section d'ouverture souligne l'importance et les aspects fondamentaux de ces enquêtes. Bien entendu, le séchage solaire incarne une approche écologique et rentable visant à prolonger la durée de conservation des produits alimentaires tout en préservant leur valeur nutritionnelle et leurs caractéristiques sensorielles. Les chercheurs se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité des mécanismes de séchage solaire, le réglage précis des variables de séchage telles que la température, les niveaux d'humidité et la circulation de l'air, et l'évaluation des répercussions de ces techniques sur l'excellence des produits finaux. En outre, ces enquêtes portent sur les diverses utilisations du séchage solaire dans différents domaines agroalimentaires, allant de la transformation des fruits et légumes à la conservation des viandes et des céréales. Généralement, les recherches scientifiques sur le séchage solaire des produits agroalimentaires visent à promouvoir des approches durables et innovantes pour relever les défis de la sécurité alimentaire et réduire les pertes après récolte.

## **II.2. Domaines d'application des recherches scientifiques sur le séchage solaire**

Durant notre recherche dans la bibliographie de séchage solaire des produits agroalimentaires; plusieurs domaines de recherche apportent une contribution précieuse à l'amélioration de la compréhension et des méthodologies dans le domaine du séchage solaire des produits agricoles et alimentaires, dans le but de promouvoir des approches durables et efficaces pour répondre aux défis liés à la sécurité alimentaire et à l'atténuation des pertes après récolte. Les recherches scientifiques sur le séchage solaire des produits agroalimentaires touchent plusieurs axes comprennent :

- ❖ Etudes sur l'amélioration des conceptions et optimisation des systèmes et des nouvelles technologies dans le séchage solaire.
- ❖ Étude sur l'amélioration de cinétiques de séchage solaire et évaluation de la qualité des produits.

## **II.3. Quelques travaux sur le séchage solaire**

Le séchage des produits agro-alimentaires est un sujet de recherche très intéressant des nombre important des communications scientifiques et études depuis les premiers travaux

scientifiques sur le séchage solaire des produits agroalimentaires, Cette technique demeure encore de nos jours un domaine de recherche privilégié notamment les pays ensoleillé ou l'utilisation de séchage solaire s'impose toujours avantageux. Un nombre important des études et des recherches scientifique ont été réalisés touchants des axes importants de ce domaine comme:

### **II.3.1. Etudes sur l'amélioration des conceptions et optimisation des systèmes et des nouvelles technologies dans le séchage solaire**

Dans ce thème de recherche on vise la narration des différentes études qui touche les comparaisons des multiples méthodes de conservation les fruits, légumes et herbes, réduisant leur volume et poids pour faciliter le transport et prolonger leur durée de conservation, limitant ainsi le gaspillage alimentaire comme l'étude de :

Lopez et al. (2020), ont créé et examinés un séchoir solaire passif, et ont évalué son efficacité grâce à l'utilisation de deux systèmes combinés (direct et indirect) et son efficacité thermique dans le contexte du séchage des tomates. Les résultats ont révélé que la durée de séchage était prolongée avec le système indirect (26 heures) par rapport au système mixte (17 heures). De plus, les observations empiriques de la procédure de séchage ont été simulées et juxtaposées avec le modèle Henderson & Papis [55].

Akhilesh Singh et al. (2020), ont étudié un séchoir par pompe à chaleur à assistance solaire (SAHDP) de type discontinu a été formulé et testé dans le but de sécher des tranches de banane en circuit fermé, à la fois en mode de séchage par pompe à chaleur simple (HDP) et en mode SAHDP. Différents paramètres de performance énergétique et économique ont été passés au crible afin d'évaluer leur réactivité à la durée de séchage. Les résultats indiquent que le SAHDP présente une efficacité énergétique et opérationnelle supérieure, ainsi qu'un taux d'extraction d'humidité spécifique plus élevé que le HDP simple. De plus, l'évaluation économique a identifié le dispositif de détente et l'évaporateur comme les composants critiques nécessitant une amélioration. En résumé, cette recherche souligne que le système SAHDP présente des performances nettement supérieures par rapport à l'approche HDP simple [56].

Nadiya Philip et al. (2022) présentent le développement et l'analyse d'un séchoir solaire de serre de 100 kg conçu pour produire des produits séchés de haute qualité. Ce dispositif, en élevant la température à l'intérieur à plus de 10 à 14 °C au-dessus de la température ambiante, permet un séchage plus rapide des produits testés par rapport à

l'exposition au soleil en extérieur. De plus, il est souligné que le coût du séchage des produits avec ce type de séchoir solaire est considérablement inférieur à celui associé à l'utilisation de séchoirs électriques [57].

Bilal Lamrani, et al. (2022), ont portés sur la faisabilité économique et thermodynamique d'un séchoir solaire hybride équipé d'un collecteur solaire en forme de V et d'un système de stockage de chaleur en granit, utilisé pour le séchage des chips de pommes de terre en Afrique du Nord. Le séchage a duré 4,5 heures avec une efficacité combinée de 60,08 %. Le rayonnement solaire a contribué à 78,18 % de l'énergie utilisée, tandis que le stockage de chaleur dans le granit a représenté 21,82 %. Les résultats ont permis de déterminer les meilleurs modèles cinétiques pour prédire le processus de séchage [58].

Ahmad, A, et Al, (2023), ont présentés que le séchage par énergie solaire est une méthode écologique et économique. Les séchoirs solaires de serre, dotés de stockage thermique, offrent une qualité de séchage supérieure aux méthodes traditionnelles en plein air. Ils sont adaptés à une variété de cultures et peuvent être utilisés de manière autonome dans les zones rurales. Cet article examine en détail leur conception, leur modélisation thermique, leur coût et leur impact environnemental, tout en explorant l'utilisation de panneaux solaires et de stockage d'énergie pour un séchage continu. Il compile également des études sur la prédiction des performances et la cinétique de séchage des produits agricoles [59].

Zouhair Aouissi et Foued Chabane (2022) cherchent à améliorer les performances d'un collecteur solaire d'air en intégrant des déflecteurs rectangulaires dans le canal. Quatre configurations différentes ont été évaluées pour étudier l'impact du nombre de déflecteurs sur le transfert de chaleur et le coefficient de friction. Les simulations CFD ont été validées par des tests expérimentaux, confirmant la fiabilité des résultats. Les conclusions indiquent que l'ajout de déflecteurs permet d'optimiser le transfert de chaleur et les performances globales du collecteur solaire [60].

Zouhair Aouissi et al (2022) combinent des approches numériques et expérimentales pour améliorer le transfert de chaleur à l'intérieur d'un collecteur solaire thermique. Des déflecteurs rectangulaires ont été ajoutés au canal d'air pour créer un modèle H, testé dans des conditions naturelles à Biskra, en Algérie. Les simulations numériques ont été réalisées avec ANSYS Fluent 18.1 pour comparer les performances thermiques et hydrauliques du collecteur.



**Figure II. 1:** Positionnement expérimental des appareils



**Figure II. 2:** Position des chicanes dans le Channel

Les résultats ont montré que l'ajout de déflecteurs augmentait le transfert de chaleur en favorisant un écoulement turbulent, ce qui réduisait les couches thermiques mortes près de la plaque absorbante [61].

D.S, Malwad et al ont examiné une méthode différente approches, le séchage solaire indirect, combiné à des collecteurs solaires et un stockage thermique, offre un contrôle efficace de la température. Cette étude se penche sur l'amélioration du taux de séchage grâce à divers mécanismes de chauffage de l'air, notamment les collecteurs plats et les tubes sous vide. Les paramètres clés incluent les fluides de travail, la température et la vitesse de l'air, ainsi que le rayonnement solaire. L'utilisation de dispositifs de stockage thermique permet une réduction significative du temps de séchage. Enfin, des produits séchés et des modèles de séchage appropriés sont présentés, avec une discussion sur les défis associés à la réduction du temps de séchage [62].

## Chapitre II : Etats de l'art

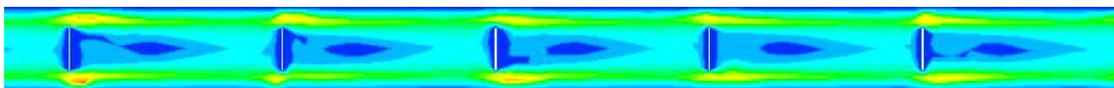
Zouhair Aouissi, et al. , (2023), étudient des méthodes expérimentales et numériques pour analyser le transfert de chaleur par convection forcée à l'intérieur d'un canal de collecteur solaire, en utilisant des déflecteurs sous formes rectangulaires (figure II.3, et II. 4).



**Figure II. 3:** La forme rectangulaire des chicanes



**Figure II. 4:** Dimensions a l'intérieur du capteur solaire et les chicanes



**Figure II. 5:** Champ de variation du contour de la vitesse à travers les déflecteurs à l'intérieur du canal

Les résultats de cette étude démontrent l'impact de la forme des déflecteurs et des conditions opérationnelles sur le transfert de chaleur. Une augmentation du nombre de Reynolds entraîne une accélération de l'air, favorisant son refroidissement et augmentant ainsi le transfert de chaleur avec la plaque absorbante [63].

Romdhane Ben Slama et Michel Combarous, (2011) ont visé à utiliser l'énergie solaire pour sécher des produits périssables. Le séchoir, composé d'un collecteur solaire et d'une chambre de séchage (Figure II.6) transforme le rayonnement solaire en chaleur, atteignant une efficacité de 80%. Le processus de séchage dépend de facteurs tels que la température, la vitesse de l'air et la surface du produit en contact avec l'air de séchage.



**Figure II. 6:** Photo expérimental d'un séchoir solaire indirect

## Chapitre II : Etats de l'art

Cette étude approfondit le processus de séchage des produits naturels en mettant en lumière des aspects essentiels. Elle insiste particulièrement sur l'importance des capteurs solaires d'air pour ce processus, surtout lorsque les produits sont protégés contre une exposition directe au soleil. En utilisant les écorces d'orange comme cas d'étude, l'article présente la cinétique de déshydratation établie dans des conditions quasi-stationnaires, pouvant être extrapolée à d'autres scénarios similaires. La section suivante explore un système de séchage d'air concret, démontrant l'efficacité des déflecteurs pour améliorer les capteurs solaires d'air et mettant en avant les avantages d'une combinaison de convection naturelle et forcée pour une régulation précise du processus de séchage. En réduisant l'humidité de 76 à 13% en une journée, ce système produit des aliments séchés de manière saine, plus résistants aux conditions climatiques locales, avec une efficacité totale de 28% [64].

Vishal Gupta et al (2021) met en évidence l'importance du séchage pour prolonger la durée de conservation des aliments (tranches de pommes de terre (figure II.7 et figure II.8)) en réduisant leur teneur en humidité et en inhibant la croissance des micro-organismes.



**Figure II. 7:** Tranches de pommes de terre sécher; (A): dans l'air libre, et (B): dans le séchoir solaire proposée



**Figure II. 8:** Photos des tranches de pommes de terre séchées (A): à l'air libre, et (B): dans le séchoir proposé

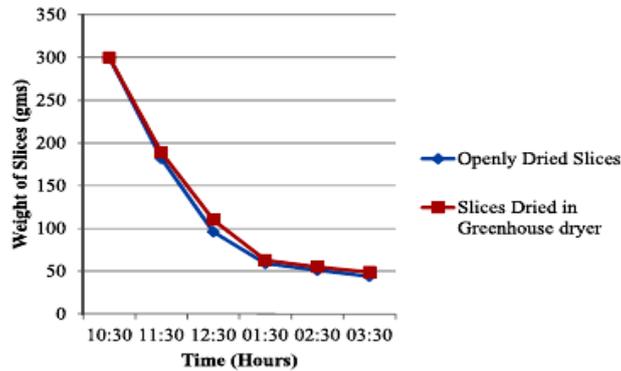


Figure II. 9: Poids des échantillons sécher dans l'expérience

La présente étude est une étude d'enquête expérimentale sur le séchage de tranches de pommes de terre à l'aide d'un séchoir de serre amovible conçu pour un usage domestique, qui démontrant des résultats (Figure II.9) prometteurs en termes d'efficacité de séchage et de rentabilité, avec une période de récupération relativement courte [65].

N. Vigne shkumar et al (2021) présentent la conception et l'évaluation d'un séchoir solaire à convection forcée de type indirect (Figure II.10), intégrant de la paraffine comme matériau à changement de phase (PCM) pour améliorer les performances en dehors des heures d'ensoleillement.

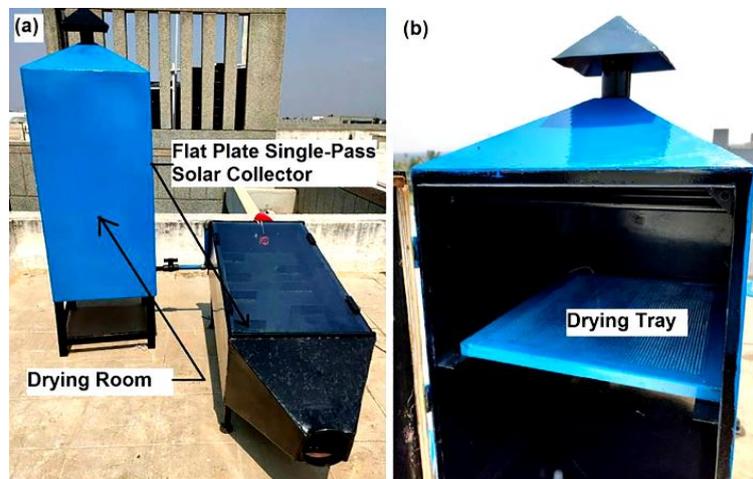
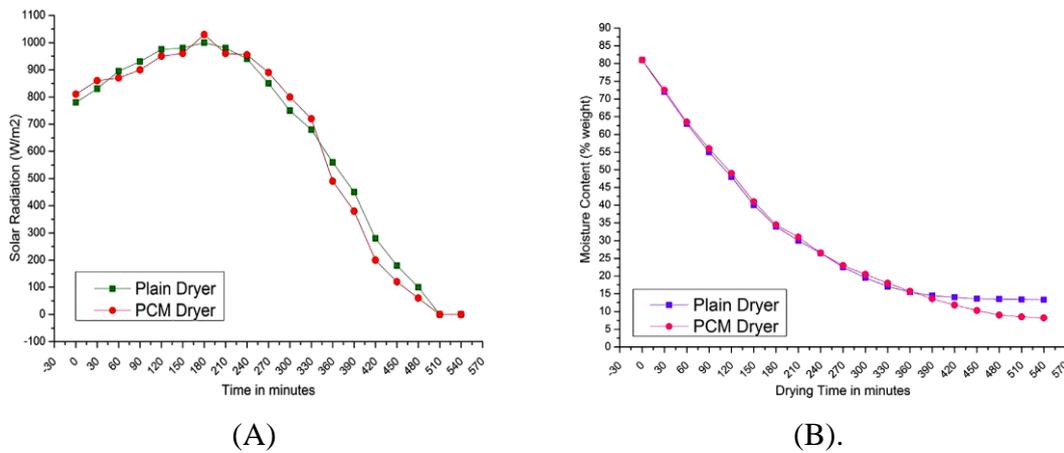


Figure II. 10: Photos expérimentales d'un séchoir solaire; (a) montage Complete et (b) intérieure de la chambre de séchage.

L'ajout de PCM a augmenté la température de la chambre de séchage et amélioré le taux d'élimination de l'humidité des tranches de pommes de terre comme indique dans la (Figure II.11). Tel que La teneur en humidité des tranches de pommes de terre a été réduite à 13,3 % à

partir de 81 % dans le cas du séchoir sans PCM (séchoir simple), tandis qu'elle est descendue à 8,2 % avec l'aide du séchoir intégrant du PCM (séchoir avec PCM) [66].



**Figure II. 11:**(A) Radiation solaire durant la période de séchage, et (B): taux d'humidité des tranches de patata durant la période de séchage.

Á. C. Sánchez et al qui compare l'efficacité de quelques méthodes de séchage. Cependant, la qualité des produits séchés dépend de différentes techniques de séchage, avec des paramètres de qualité tels que la couleur, la densité, la porosité, etc., nécessitant une évaluation spécifique pour chaque matériau. Ils ont conclu que les nouvelles techniques doivent garantir la qualité des produits séchés tout en étant éco-énergétiquement efficaces et respectueuses de l'environnement [67].

### II.3.2. Étude sur l'amélioration de cinétiques de séchage solaire et évaluation de la qualité des produits

Dans ce partie on cherchant d'analyser les paramètres clés telles que la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la taille des produits à séchant, pour déterminer leur influence sur l'efficacité du séchage et la qualité des produits finis. Dans cet axe de recherche on distingue plusieurs recherches comme:

Ndukwu Macmanus, et al. (2022), utilisent un séchoir solaire indirect alimenté par une éolienne et un collecteur solaire thermique, l'étude a porté sur l'impact du séchage des tranches de patates douces préalablement bouillies dans de l'eau chaude et traitées par immersion dans une solution saline. Une amélioration relative du taux de séchage a été constatée avec l'amélioration des conditions météorologiques. De plus, l'importance de la rétraction et de son effet direct sur la détermination des propriétés physiques thermiques du produit étudié a été soulignée pour les échantillons traités et non traités [68].

M. C. Ndukwu, et Al. (2023), examine l'efficacité économique d'un séchoir solaire hybride par rapport aux séchoirs artificiels, ainsi que l'impact d'un prétraitement à l'eau chaude sur le séchage des racines de gingembre. L'utilisation du séchoir solaire hybride réduit les coûts et accélère le taux de séchage. Il permet également de réduire les émissions de dioxyde de carbone et offre des opportunités pour investir dans des sources d'énergie propre [69].

M. C. Ndukwu, et Al(2022), ont examinés l'impact de deux prétraitements, le blanchiment à l'eau chaude et l'immersion saline, sur les chips de patates douces séchées au soleil. Les résultats ont montré que le taux de séchage était influencé par le rayonnement solaire et la température ambiante. Les chips ont subi un rétrécissement significatif, mais les échantillons traités par immersion saline ont présenté un volume légèrement plus élevé. Les propriétés thermo- physiques ont également été analysées, révélant des variations selon les traitements. Ces conclusions soulignent l'importance du rétrécissement dans la caractérisation des produits séchés au soleil, qu'ils aient été prétraités ou non [70].

Rafie et Al. Déterminent la diffusivité effective de l'humidité et l'énergie d'activation des tranches d'orange lors du séchage par convection. Les expériences ont impliqué différentes températures et vitesses d'air, ainsi que différentes épaisseurs de tranches. Les résultats ont montré que la diffusivité effective augmentait avec la température et la vitesse de l'air, tandis que l'épaisseur des tranches n'avait pas un impact significatif sur ce paramètre [71].

Kolawole O. Falade et Oluwakemi J. Solademiles ont étudiés l'effet du blanchiment, des températures de séchage et de l'épaisseur des tranches de patate douce sur leurs caractéristiques de séchage. Différents modèles ont été utilisés pour analyser les schémas de séchage, avec les modèles Page et Page modifié qui correspondent le mieux. Les résultats ont montré une corrélation élevée entre le rapport d'humidité et le temps de séchage, avec de faibles erreurs. Le séchage était principalement dans la période de taux de chute, et le coefficient de diffusion augmentait avec l'épaisseur et la température. L'énergie d'activation pour la diffusion de l'humidité variait selon les conditions spécifiques de séchage [72].

Franco Pedreschi et al ont examiné l'effet du blanchiment et du séchage sur la perte d'eau et l'absorption d'huile lors de la friture de tranches de pommes de terre. Deux prétraitements ont été appliqués : blanchiment seul et blanchiment suivi de séchage. Les résultats montrent que le blanchiment réduit l'absorption d'huile, tandis que le blanchiment

suivi de séchage augmente cette absorption. Deux modèles de diffusion ont été utilisés pour étudier la perte d'eau pendant la friture, montrant que le modèle avec diffusivité variable s'ajuste mieux aux données expérimentales [73]

Shweta Solanke et al (2018), ont évalué l'influence de divers agents édulcorants sur les tranches d'orange douce immergées dans un milieu osmotique, en plus de la palatabilité des tranches d'orange douce (Fig. II.12).



**Figure II. 12:** Tranches d'orange douce séchées par osmo-convexion en utilisant différents agents osmotiques.

Les tranches d'orange douce ont été soumises à un traitement utilisant du sucre, du Jagger, du miel et de la Stévia. Une analyse des tranches a été réalisée en ce qui concerne les attributs de qualité tels que le niveau d'humidité, la couleur, la fermeté et la perception sensorielle. Les résultats ont révélé que les tranches d'orange douce traitées avec une solution de sucre osmotique présentaient une qualité supérieure, tandis que celles traitées avec de la Stévia présentaient des problèmes liés au rétrécissement pendant le processus de séchage. Ils ont conclu que les tranches d'orange douce séchées par osmo-convexion en utilisant une solution osmotique de sucre donnent de bons résultats comparativement au miel et à la Jagger. Une tranche d'orange douce séchée par osmo-convexion en utilisant une solution de Stévia n'est pas fonctionnelle en raison de son rétrécissement pendant le séchage [74]

Morteza Sadeghi et al ont examiné la cinétique de séchage et les phénomènes de transfert de masse lors du séchage combiné micro-convectif de tranches de citron. Deux modèles analytiques ont été utilisés pour cette analyse. Les résultats ont montré des courbes cinétiques de séchage distinctes pour les méthodes de séchage par convection et par micro-ondes, avec des variations significatives dans les paramètres de transfert de masse. Le modèle de Dincer et Dost a fourni une prédiction plus précise des caractéristiques de transfert de masse. Ainsi, il pourrait être utile pour prédire ces caractéristiques lors du séchage de tranches de citron.

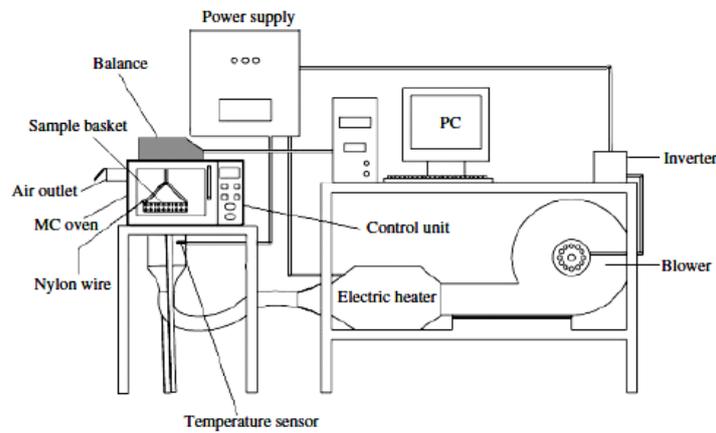


Figure II. 13: Vue schématique de l'installation expérimentale de séchage micro-convectif par micro-ondes.

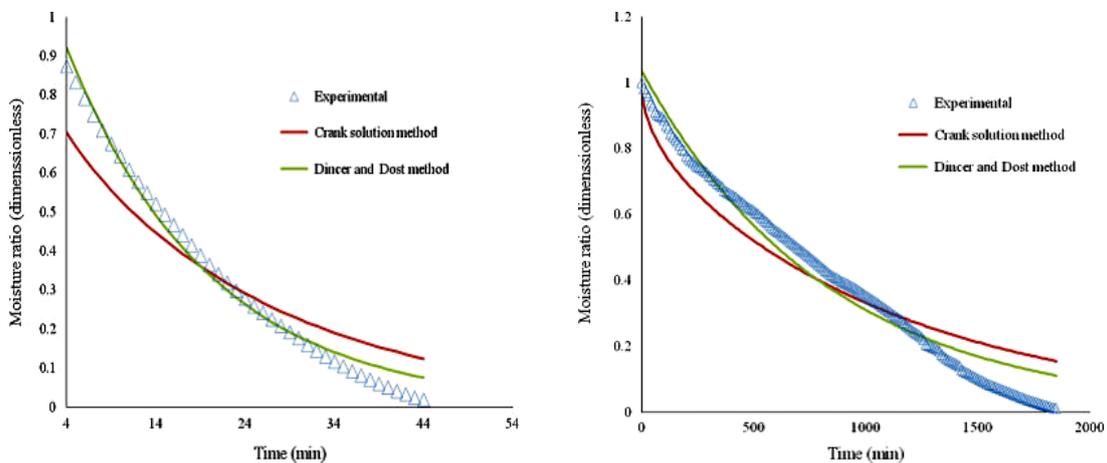
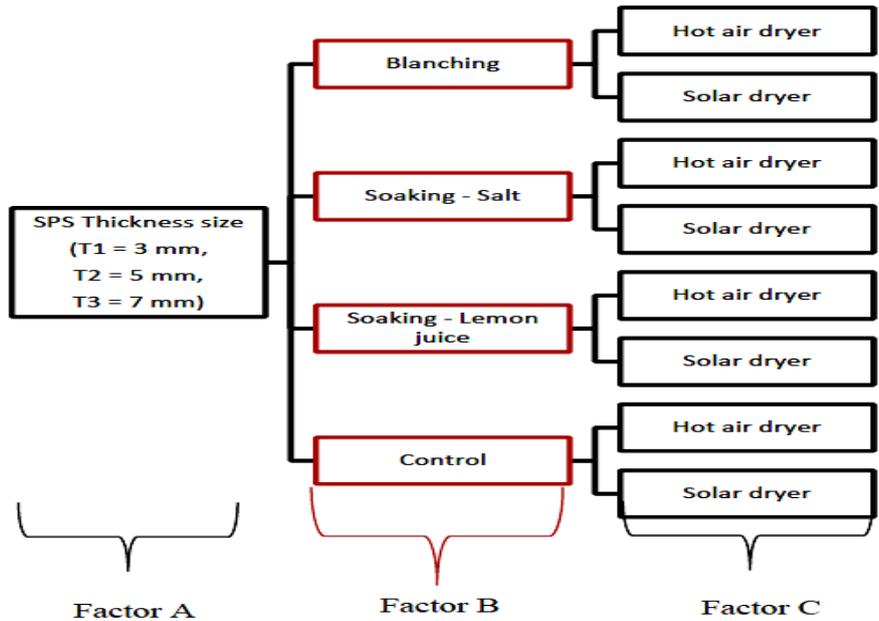


Figure II. 14: Valeurs expérimentaux et prédites du taux d'humidité moyen pour les tranches de citron déshydratées sous la méthode convective et la méthode combinée micro-convective à  $2,04 \text{ W g}^{-1}$  et  $50 \text{ }^\circ\text{C}$

Les résultats présentés dans (Figure II.14) montre le degré de précision prédictive plus élevé a été atteint en utilisant le modèle de Dincer et Dost pour tous les traitements. Par

conséquent, ce modèle pourrait être appliqué comme un outil efficace pour prédire les caractéristiques de transfert de masse lors du séchage de tranches de citron [75].

Siyabonga Gasa et al (2022) ont examiné le processus de séchage des produits agricoles, un aspect essentiel de leur conservation. Une comparaison est établie entre deux techniques de séchage des tranches de patates douces (l'utilisation d'un four à air chaud par rapport à un autre séchoir à venturi solaire équipé d'une ventilation naturelle).



**Figure II. 15:** Présentation schématique de la structure expérimentale du traitement avec trois facteurs (A: épaisseur, B: prétraitement au séchage, et C: méthode de séchage)

L'évaluation est menée sur l'efficacité de différents modèles mathématiques pour prédire les coefficients de séchage.

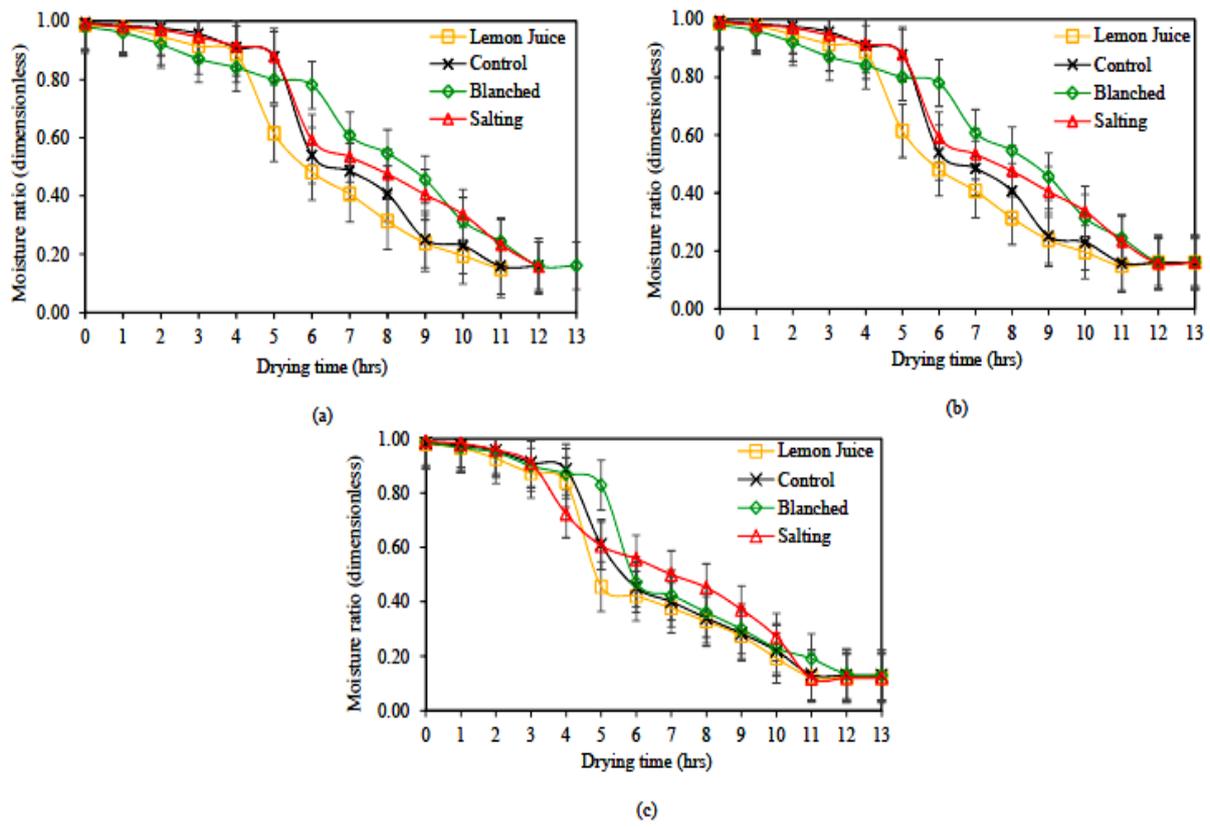


Figure II. 16: Rapport d'humidité des tranches de patate douce de (a) 3mm, (b) 5mm et (c) 7mm d'épaisseur séchées dans un séchoir solaire-venturi à ventilation naturelle.

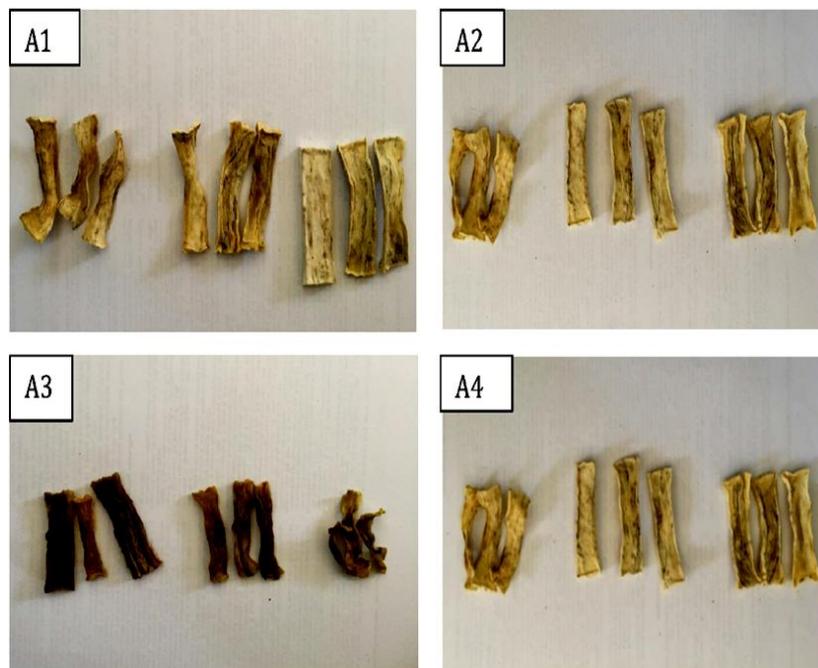
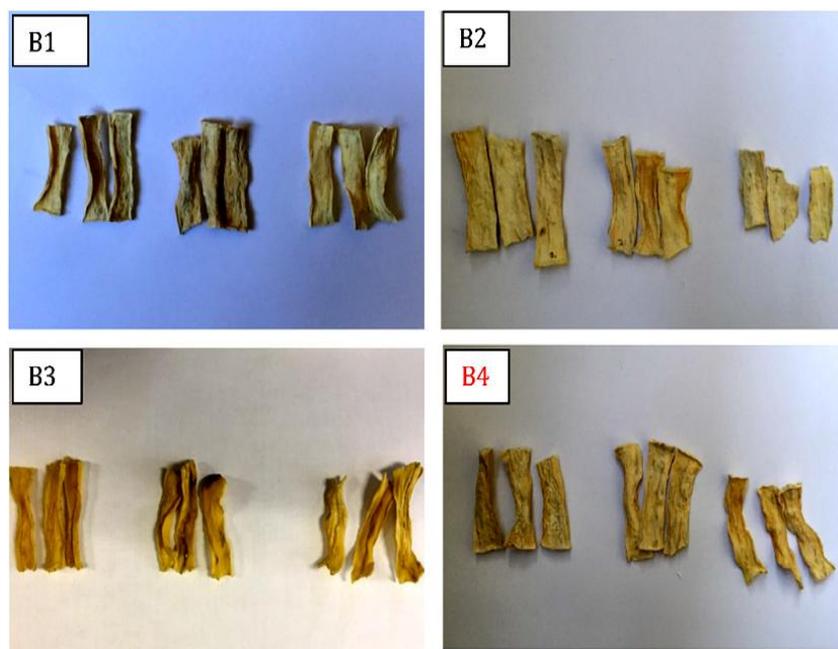


Figure II. 17: Naturally-ventilated solar dried SPS (A1: Control, A2: Salting, A3: Blanching, A4: Lemon juice).



**Figure II. 18:** Hot-air oven dried SPS (B1: Control, B2: Salting, B3: Blanching, B4: Lemon juice).

Le modèle développé par Midilli et al étant considéré comme le choix le plus approprié. Les résultats indiquent que l'épaisseur des tranches influe de manière significative sur la durée du processus de séchage. Pour des résultats de séchage optimaux à petite et moyenne échelle dans le climat de Pietermaritzburg, la mise en œuvre d'un séchoir venturi solaire et un prétraitement au jus de citron sont recommandés [76].

A. C. Godswill, E. T. Nwankwere (2018). Ont étudié des patates douces à chair jaune clair et mûres ont été prétraitées dans une solution de chlorure de sodium (NaCl) à différentes concentrations, puis séchées au four. Les tranches de pommes de terre séchées ont été analysées pour leur teneur en calcium. Pendant le prétraitement en vue du séchage, les patates douces sont immergées dans une solution saline pour améliorer leurs caractéristiques sensorielles et leur durabilité. Cette étape, fréquemment pratiquée par les vendeurs de chips de pommes de terre, peut altérer la valeur nutritionnelle des produits finaux. L'élimination de l'eau repose sur le phénomène d'osmose à travers les membranes cellulaires, qui entraîne également la diffusion de certains composés cellulaires dans la solution saline. Afin de préserver les nutriments et d'obtenir la texture souhaitée, il est recommandé d'utiliser des tranches de pommes de terre d'une épaisseur de 6 mm, une solution saline avec une concentration de 10 à 20 %, et un temps de trempage de 20 à 40 minutes [77].

Mohammad Afzal Hossain et al explorent l'impact de divers prétraitements sur le séchage du Taikor, un fruit souvent négligé mais riche en éléments nutritifs. Trois méthodes de prétraitement ont été appliquées à différentes températures de séchage.

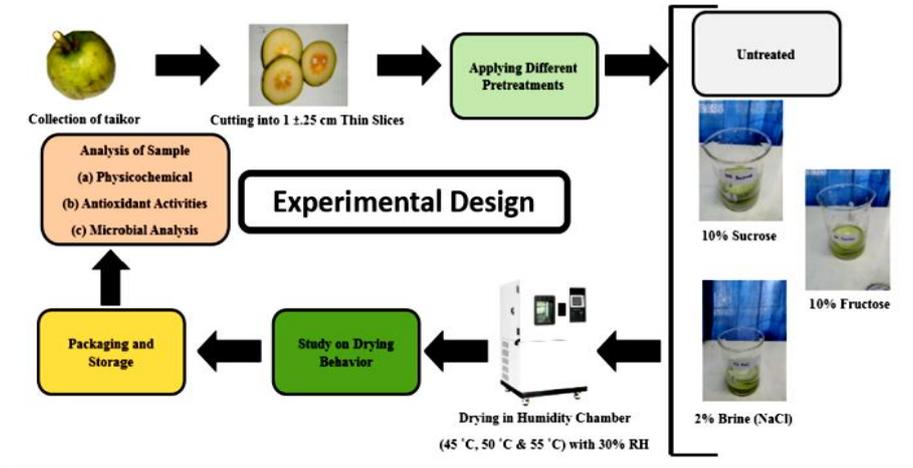


Figure II. 19: Les étapes expérimentales de séchage

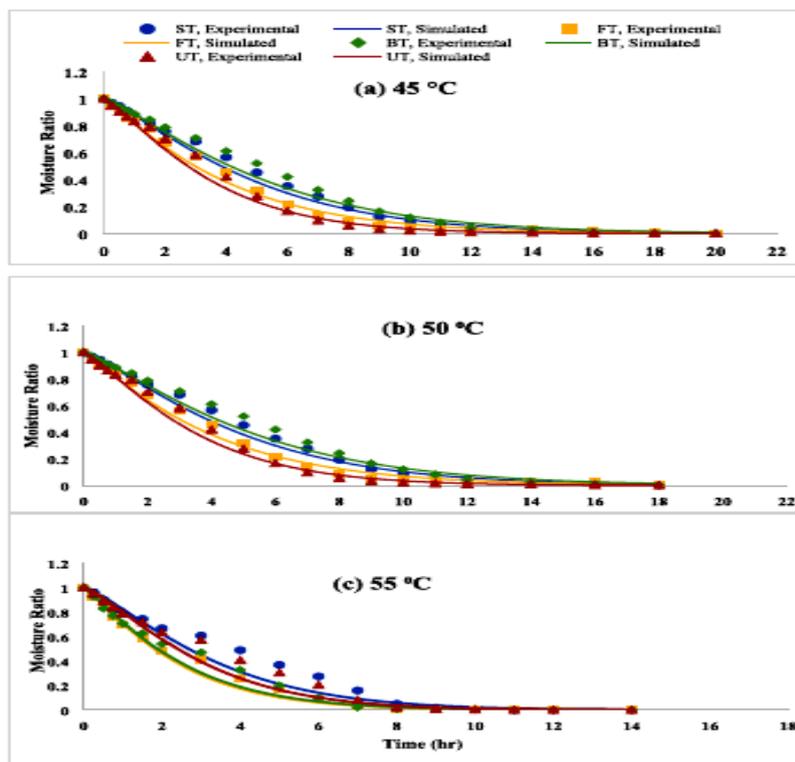


Figure II. 20: Résultats de validation des modèles pour le taux d'humidité du Taikor.

Les résultats présentés dans la (Figure. II.20) mettent en évidence le modèle de Page comme le plus adapté pour décrire les caractéristiques de déshydratation. Le saccharose a préservé l'acide ascorbique et l'activité antioxydant, tandis que la saumure a réduit la croissance

microbienne. Le fructose a favorisé une augmentation des vitamines B, du contenu phénolique et flavonoïde. En résumé, le prétraitement au fructose suivi d'un séchage à 55 °C a offert la meilleure préservation de la qualité du fruit séché [78].

Yurong Ma et al (2021), étudient le brunissement enzymatique des pommes de terre fraîchement coupées est un problème majeur affectant leur qualité et leur durée de conservation. Cette étude examine l'effet du traitement préalable à la solution de NaCl sur le brunissement, l'activité du poly-phénol oxydase (PPO) et les teneurs en acides aminés des pommes de terre fraîchement coupées.

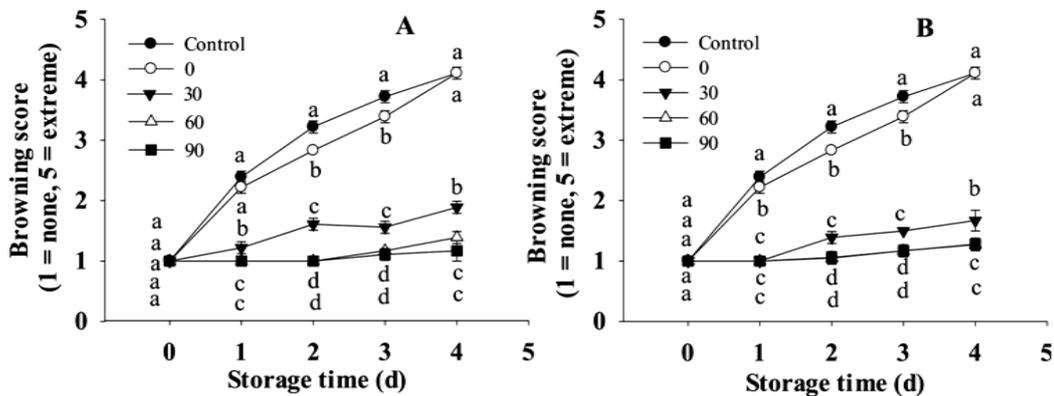


Figure II. 21: Brunissement des pommes de terre fraîchement coupées préalablement traitées et testées.

Les tranches des pommes de terre fraîchement coupées et préalablement traitées par des solutions de proline à 0, 30, 60 et 90 mol L<sup>-1</sup> pendant 1h (A) et 3 h (B), et stockées à 5 °C pendant 4 jours. Les résultats (Figure II.22) montrent que le traitement préalable à la solution de NaCl à 5 % pendant 3 heures améliore la qualité visuelle, réduit le brunissement et prolonge la durée de conservation. Il influence également les activités enzymatiques et les teneurs en acides aminés, fournissant ainsi un nouvel outil pour prévenir le brunissement et éclairant le mécanisme sous-jacent [79].

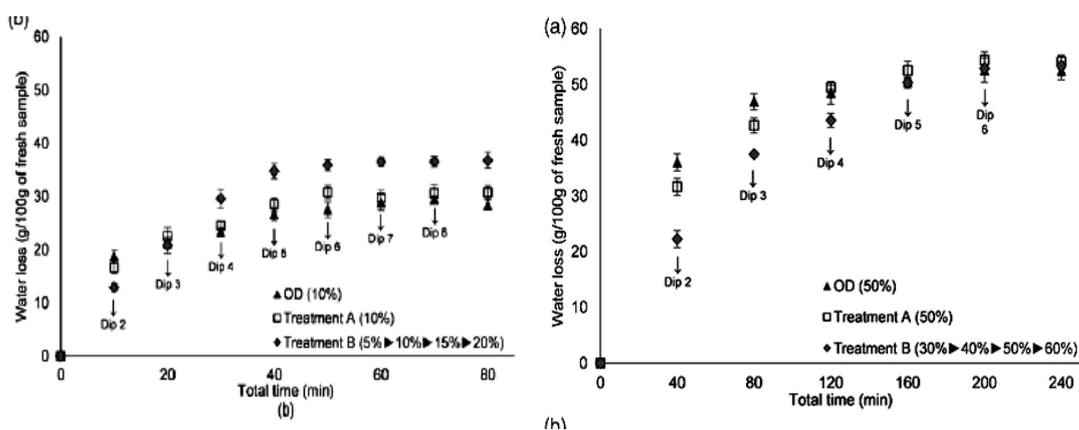
Rui Wang et al. (2011), examinent l'effet de la teneur en sel et en saccharose sur le séchage par congélation micro-ondes (MFD) des tranches de purée de pommes de terre et leurs propriétés diélectriques. Les résultats indiquent que l'ajout de sel et de sucre augmente les propriétés diélectriques des échantillons à basse température. Le sel a une plus grande influence que le saccharose sur ces propriétés. Le taux de séchage par MFD est significativement plus élevé après l'ajout de sel et de sucre [80].

N. Hafezi et al. (2016), ont examiné l'effet du séchage sous vide-infrarouge sur les tranches de pommes de terre. Les chercheurs ont constaté que la puissance du rayonnement

infrarouge influençait significativement la vitesse de séchage, tandis que l'épaisseur des tranches affectait le rétrécissement et la capacité de réhydratation. Une puissance infrarouge et un vide plus élevés réduisaient le rétrécissement mais diminuaient la capacité de réhydratation [81].

K. K. Dash et al. (2021), L'étude examinait comment différents traitements de pré-séchage affectaient la qualité des tranches de citrouille séchées selon deux méthodes. Les résultats ont montré que le trempage dans une solution saline à 10 % avant le séchage préservait efficacement la qualité chimique. Le meilleur compromis qualité a été observé avec un traitement de pré-séchage suivi d'un séchage au four à basse température. Pour le séchage au soleil, l'utilisation de séchoirs solaires en combinaison avec des traitements de pré-séchage adéquats était recommandée pour compenser les temps de séchage prolongés [82].

Wan M. F. et al. (2018), explore une nouvelle méthode de déshydratation osmotique, appelée déshydratation post-immersion, a été étudiée pour réduire la teneur en eau des tranches de pomme de terre sans ajouter beaucoup de sucre ou de sel. cette 'étude explore une nouvelle méthode de déshydratation des tranches de pomme de terre en les trempant brièvement dans des solutions de sucre ou de sel concentrées, puis en les laissant perdre de l'eau à l'air ambiant. Cette technique réduit efficacement la teneur en humidité des tranches en une heure, avec une absorption de sucre/sel significativement moindre par rapport à la déshydratation osmotique classique. L'utilisation de cette méthode en plusieurs étapes maintient des pertes d'eau similaires à la déshydratation osmotique, mais avec un gain de solide considérablement réduit.



**Figure II. 22:** résultats obtenus dans la déshydratation par post-immersion des tranches de pomme de terre

## Chapitre II : Etats de l'art

Les résultats (voire la Figure II.22) montrent une perte d'eau initiale rapide suivie d'une stabilisation. Une approche en plusieurs étapes a été testée pour relancer le processus de perte d'eau. Cette méthode offre des niveaux de perte d'eau comparables à la déshydratation osmotique traditionnelle, mais avec un gain de matière solide global inférieur à 50 %, ce qui pourrait être une option plus saine [83].

K. K. Dash et al. (2021), examinent le processus de déshydratation osmotique de tranches de carambole en utilisant une solution de sel et de sucre. En optimisant le temps, la température, la concentration en sel et le rapport fruit/sirop, la performance de déshydratation est améliorée. La Méthodologie de Surface de Réponse est utilisée pour évaluer ces paramètres. La déshydratation osmotique de la carambole à l'aide d'une solution binaire s'est avérée être une méthode efficace, encourageant son application pratique. Quatre paramètres de processus ont été examinés sous différentes conditions, et des modèles quadratiques ont été développés pour chaque réponse étudiée. Les valeurs optimisées ont démontré une concordance satisfaisante entre les prévisions et les résultats expérimentaux, suggérant la fiabilité de cette approche pour la déshydratation de la carambole [84].

L'utilisation de l'intelligence artificielle dans le séchage solaire des produits agroalimentaires marque une avancée majeure pour la conservation des aliments, L'IA offre des opportunités prometteuses pour optimiser ce processus grâce à des algorithmes sophistiqués et des techniques d'apprentissage automatique. On explore les différentes applications de l'IA dans ce domaine, mettant en avant ses avantages potentiels en termes d'efficacité énergétique, de qualité des produits et de durabilité environnementale. Plusieurs études sont faites pour présenter les avantages de l'utilisation de l'IA, ces études distinguent l'étude de :

Amit Malik et Mahesh Kumar (2022), qui cite des logiciels utilisés dans les études des développements des séchoirs solaires comme TRNSYS, ANSYS et COMSOL analysent diverses configurations de séchage solaire, tandis que Statistica, SPSS et Excel sont utilisés pour les analyses de comportement de séchage et les calculs statistiques. Ces outils informatiques deviennent une solution populaire pour ces défis [85].

A. Bousselma et al, ont modélisé le séchage d'abricots prétraités avec du saccharose, du NaCl et du bisulfite de sodium dans un four à micro-ondes. Les modèles ANN et ANFIS ont prédit le temps de séchage et le rapport d'humidité. Le modèle créé par les chercheurs s'est

avéré le plus précis pour les abricots traités au NaCl, offrant une perspective pour simuler le séchage d'autres fruits et légumes [86].

P.P. Tripathy, et Subodh Kumar (2009) utilisent la théorie des réseaux de neurones pour anticiper la température des aliments séchés au soleil. À partir de données expérimentales sur neuf jours de séchage de pommes de terre, le réseau de neurones est entraîné et testé. Les résultats soulignent qu'un réseau de quatre neurones se démarque comme le plus performant, surpassant ainsi d'autres modèles de prédiction [87].

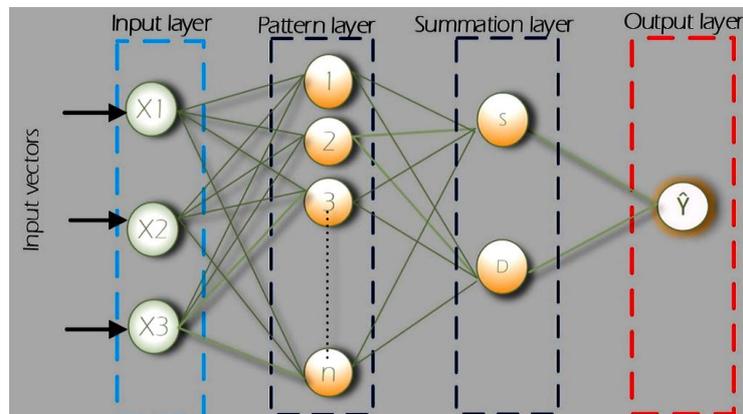
L'étude menée par A. Sadadou et al (2021) a mis au point un réseau de neurones artificiels (ANN) afin de modéliser le processus de séchage solaire des plantes médicinales. En utilisant des données provenant de recherches antérieures, ils ont divisé l'ensemble en ensembles d'entraînement (70 %), de test (15 %) et de validation (15 %). Grâce à l'utilisation de dix paramètres, ils ont pu prédire avec précision la teneur en humidité (MC) et le taux de séchage (DR). Le modèle ANN le plus performant, avec une topologie de 10-28-14-2, s'est révélé hautement précis, offrant ainsi la possibilité de le généraliser à toutes les localités du globe [88].

Qing Sun, Min Zhanga et Arun S. Mujumdar explorent le rôle de l'intelligence artificielle (IA) dans l'amélioration du processus de séchage alimentaire. Ils abordent les fondements théoriques et passent en revue les diverses applications de l'IA, notamment dans la modélisation, la prédiction et l'optimisation du séchage, tout en identifiant ses opportunités et ses défis [89].

Akinjide A. Akinola et Gabriel A. Okanlawon ont utilisé des réseaux neuronaux artificiels (RNA) pour prédire le rapport d'humidité de tranches d'igname déshydratées à partir de données partielles. Entraînés avec l'algorithme Levenberg-Marquardt, les modèles RNA ont montré une forte corrélation ( $R^2$  de 0,97 à 0,99) entre les valeurs prédites et observées, démontrant ainsi l'efficacité des RNA pour prédire les rapports d'humidité dans les processus de séchage alimentaire, même avec des données incomplètes [90].

Dinh Anh Tuan Tran et al analysent l'effet de l'épaisseur et de la température sur le séchage des tranches de concombre amer à l'aide d'un séchoir à halogène. Les résultats montrent que ces facteurs influencent significativement le temps de séchage et la teneur en humidité. Un modèle de Réseau Neuronal à Régression Généralisée (GRNN) a été utilisé pour prédire la teneur en humidité, en utilisant la température, l'épaisseur et le temps de séchage comme paramètres d'entrée. Le modèle GRNN a démontré une grande précision, avec des

scores élevés de R-carré (0,995), RMSE (1,499) et P (0,092), prouvant son efficacité pour cette application [91]



**Figure II. 23:** Présentation d'un modèle GRNN [91]

j. Khazaei et al. (2008), ont analysé l'effet de la température de l'air et de l'épaisseur des tranches sur la qualité et la cinétique de séchage des tranches de tomate. Le séchage pour atteindre 15 % d'humidité variait de 2,6 à 18,7 heures. La technique de superposition temps-température (TTST) et les réseaux neuronaux se sont révélés efficaces pour modéliser le séchage. Le séchage a significativement affecté l'acide ascorbique, les solides solubles, l'acidité et le pH [92].

Istvan Farkas (2024) explore la détermination de l'humidité dans le matériau en utilisant des modèles basés sur la physique et des modèles « boîte noire ». Bien que ces modèles soient des alternatives viables, ils présentent certaines limitations. Cette étude examine l'application des méthodes d'intelligence artificielle, en mettant l'accent sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour le séchage des grains. Il propose une méthodologie pour sélectionner la structure des ANN et les paramètres influents. L'étude conclut que les ANN sont efficaces pour estimer la distribution de la température et de l'humidité dans les processus post-récolte [93].

Loan et al. (2023), compare les modèles mathématiques et les modèles des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour modéliser le séchage du riz brun instantané "Câm" à différentes températures (55, 60, 65, et 70 °C). L'approche par diffusion a donné les meilleurs résultats parmi les modèles mathématiques. Le modèle ANN avec 10 couches cachées a également fourni d'excellents résultats. Les ANN sont particulièrement avantageuses pour les processus à grande échelle en raison de leur précision [94].

## **II.4. Conclusion**

Les recherches sur le séchage solaire des produits agroalimentaires révèlent des perspectives d'amélioration prometteuses. Les scientifiques explorent diverses approches pour optimiser l'efficacité du processus, notamment en combinant des techniques avancées. Par ailleurs, l'intégration de méthodes mathématiques et d'intelligence artificielle permet une évaluation plus précise des performances, contribuant ainsi à une meilleure qualité des produits et à une réduction significative du temps de séchage.

# **CHAPITRE III**

---

## **ETUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE**

### **III.1.Introduction**

Le séchage solaire, une technique répandue en Algérie, elle est largement adoptée en raison de la richesse du rayonnement solaire du pays. Son objectif principal est de préserver des produits agricoles pour l'utiliser ultérieurement.

Dans cette étude, notre principal objectif est de réduire la période de séchage des produits agroalimentaires. Pour atteindre cet objectif, nous avons défini deux axes d'amélioration. Tout d'abord, nous visons à améliorer et à optimiser l'efficacité d'un séchoir solaire. Cette démarche nécessite des modifications structurelles sur un séchoir solaire indirect préexistant, suivies de l'intégration de ces modifications pour réguler les températures dans la chambre de séchage déjà en place utilisant la convection forcée. Ensuite, notre deuxième objectif est de faciliter l'évaporation de l'eau et d'accélérer le processus de séchage. À cet effet, nous avons recours à une méthode exploitant la mobilité moléculaire de l'eau à l'intérieur des produits pour la faire remonter à la surface extérieure, où elle entre en contact direct avec les températures élevées de la chambre de séchage, pour ensuite être évacuée vers l'extérieur de la chambre à l'air libre.

De plus, nous avons utilisé des modèles mathématiques pour élucider ce processus en se basant sur les données expérimentales collectées. Toutes les expériences ont été menées à l'Université de Biskra au pendant les années universitaires 2021/2022 et 2022/2023.

### **III.2. Localisation des expériences et climat de zone**

#### **III.2.1.Lieu des expériences**

Nos expériences ont été réalisées près de hall technologique de département de génie mécanique dans l'université Mohamed Khider à Biskra. Biskra est une ville située dans le sud-est de l'Algérie (Fig. III.1). Elle 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 à le niveau de la mer, la ville se situe à environ 400 km d'Alger.

#### **III.2.2.Données Climatiques de la zone d'expérience**

Climat de la wilaya de Biskra est principalement désertique, caractérisé par des étés très chauds et secs et des hivers doux. Les températures estivales peuvent atteindre des niveaux très élevés, dépassant souvent les 43 degrés Celsius, tandis que les hivers sont généralement doux avec des températures diurnes agréables et des nuits fraîches. Les précipitations sont rares et irrégulières, concentrées principalement pendant les mois d'hiver. Les vents, notamment le sirocco, peuvent parfois souffler, apportant des températures élevées

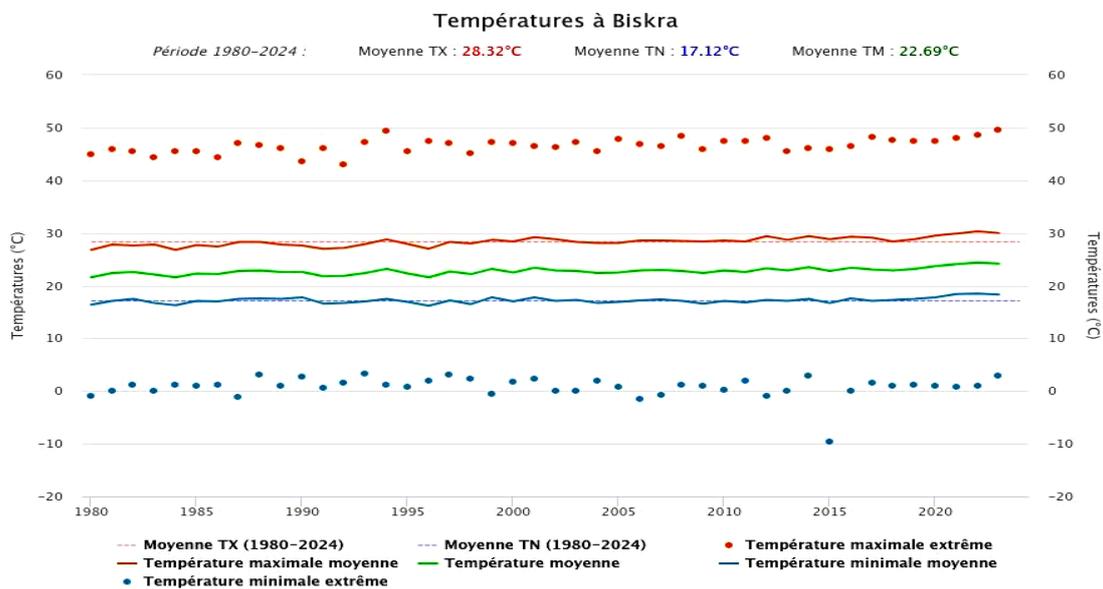
et de la poussière. En raison de son climat sec et ensoleillé, Biskra est orienté vers les recherches sur les applications de l'énergie solaire.



**Figure III. 1:** Image représente la localisation des expériences.

### III.2.3. Données physiques

Biskra se caractérise par un climat estival très chaud et sec, affichant une température moyenne de 43,5°C et une humidité relative moyenne de 12%. À l'inverse, l'hiver y est très froid, avec une température minimale moyenne de 4°C et une humidité relative moyenne de 89%. Les précipitations sont rares dans cette région, ne dépassant pas 31 jours par an, et le cumul annuel avoisine les 200 mm. [95] (Fig. III.2)



**Figure III. 2:** Evolution des températures de l'air chaud durant la période 1980-2024 de la ville de Biskra [95]

**III.2.4. Insolation**

La durée d’insolation sur le territoire national dépasse les 2000 heures/an, sur les Haut Plateaux et le Sahara, elle atteint les 3900 heures/an [96]. La durée d’insolation moyenne quotidienne et la durée moyenne d’insolation mensuelle de la ville de Biskra sur le territoire de la willaya de Biskra dépasse les 2000 heures/an, sur les Haut Plateaux et le Sahara, elle atteint les 3900 heures/an (Tab. III.2 et III.3).

**Tableau III. 1:** Durée moyenne d’insolation quotidienne (heures) de la ville de Biskra [96]

Insolation moyenne quotidienne											
Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Oùt	Sep	Oct	Nov	Dec
7.3	8.2	9	9.7	10.3	11.2	12.4	11.5	10.5	8.2	7	7

**Tableau III. 2:** Durée moyenne d’insolation mensuelle de la ville de Biskra [96]

Insolation moyenne mensuelle											
Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	oùt	Sep	Oct	Nov	Dec
226	230	278	290	320	337	383	355	314	254	210	219

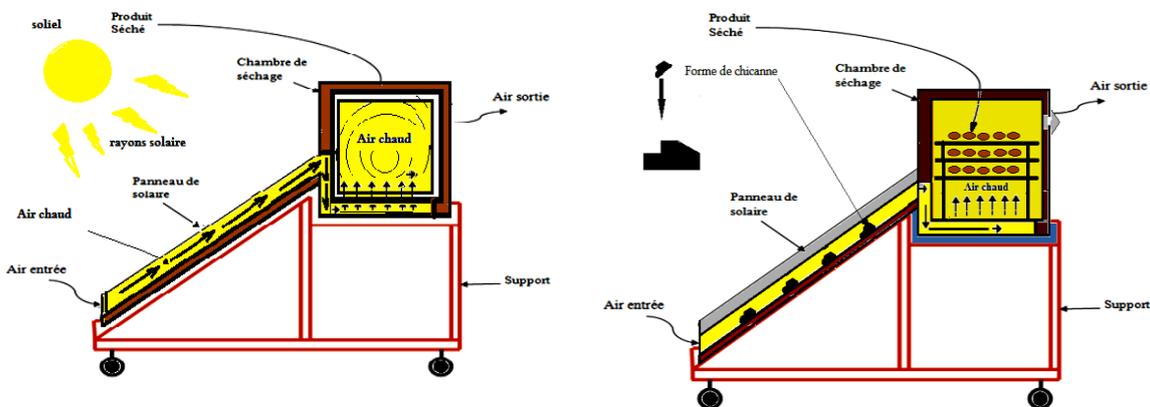
**III.2.5. Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire incident est très intense et de l’ordre de 7680 Wh/m<sup>2</sup> sur un plan horizontal pendant le mois de Juillet qui correspond à une durée d’ensoleillement de 383 heures et qui peut dépasser 12 heures par jour [96].

**III.3. Parties expérimentales**

**III.3.1. Description de séchoir solaire indirect à écoulement forcé destiné pour le séchage des produits agroalimentaires**

Dans cette expérience, nous utilisons un dispositif de séchage solaire conçu et amélioré dans les ateliers du département de Génie Mécanique de l’Université de Biskra. Le dispositif développé est un séchoir solaire indirect et forcé.



**Figure III. 3:** Mécanisme échauffement de l’air et de séchage des produits dans un séchoir solaire indirect



**Figure III. 4:** Photo expérimental de séchoir solaire indirect forcé préconçus

**Tableau III. 3:** Données techniques du séchoir solaire préconçu

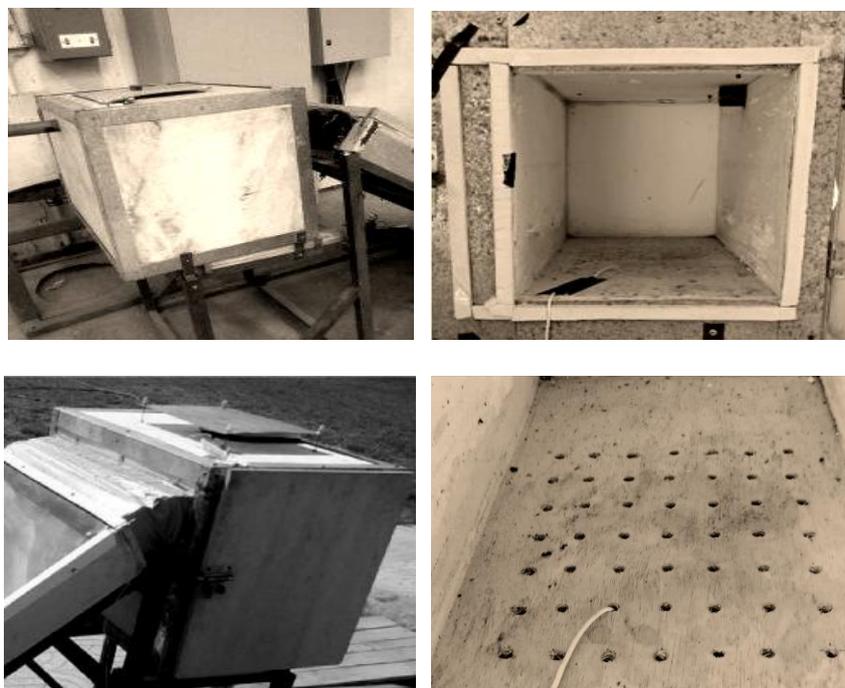
Capteur solaire	Matériau	Tôle galvanisée
	Dimensions externes	$(15.50 \times 85 \times 10) \text{ cm}^3$
	Couvercle	Plexiglas
	Épaisseur du couvercle	0.004 m
	Absorbeur	Tôle en acier
	Épaisseur de l'absorbeur	0.0005 m
	Distance (Couvercle - Absorbeur)	0.04 m
	Isolation thermique	Polystyrène
	Épaisseur de l'isolant	0.05 m
	Angle d'inclinaison	fixe ( $60^\circ$ )
Chambre de séchage	Dimensions externes	$(85 \times 45 \times 45) \text{ cm}^3$
	Dimensions internes	$(75 \times 35 \times 35) \text{ cm}^3$ .
	Isolation thermique	Polystyrène
	Chargement	Porte simple située sur le côté de la chambre de séchage $(0,55 \times 0,55 \times 0,03) \text{ m}^3$
	Nombre de plateaux	Cas N°1 : 1 pour le séchage en couches minces Cas N°2 : 3 pour le séchage en couches minces
	Dimensions des plateaux	$(55 \times 30 \times 0.2) \text{ cm}^3$ .

Le séchoir solaire se compose de deux parties principales (le collecteur d'air et la chambre de séchage). Le collecteur d'air est directement relié à l'intérieur de la chambre de séchage par des canaux permettant le transfert de l'air chaud. Pour extraire l'air humide de la chambre de séchage, celle-ci est connectée à un respirateur électrique. Le collecteur d'air remplit le rôle d'absorber les rayons solaires et de chauffer l'air ambiant entrant de l'extérieur

vers l'intérieur du collecteur. Il chauffe ensuite cet air grâce aux mécanismes de convection et de conduction de la chaleur. Par la suite, l'air est transféré à l'intérieur de la chambre de séchage pour assurer le séchage des produits (fig. III.5).

### **III.3.1.1. Chambre de séchage**

La chambre de séchage (fig. III.5) est une boîte cubique en bois conçue dans le but de préserver la qualité optimale des produits en cours de séchage. Elle est reliée au collecteur solaire par un tuyau permettant le passage de l'air à travers des orifices pour une distribution homogène sur les produits en cours de séchage. Ses dimensions sont de 80 cm x 50 cm x 70 cm. Des perforations sont réalisées dans la chambre de séchage pour garantir une répartition uniforme de l'air sur les produits et éviter tout risque de surchauffe. Dans notre configuration, nous pratiquons des trous de 10 mm de diamètre dans une planche carrée de 30 cm de côté.



**Figure III. 5:** photo expérimental de l'extérieure et a l'intérieure (les orifices) de la chambre de séchage

#### **i. Système de pesée**

Avant de commencer les expériences de séchage, nous avons testé notre séchoir solaire pour évaluer son état de préparation pour l'opération de séchage. Nous avons découvert un problème de lectures des valeurs avec le système de pesée, c'est la perte de chaleur pendant l'ouverture et la fermeture de la chambre de séchage ce qui empêche la balance électronique de fournir des valeurs précises. Et pour résoudre ce problème, nous élaborons un système de pesage suspendu à la balance électronique, qui se compose de deux

plaques rectangulaires en treillis métallique, l'une à l'extérieur et l'autre à l'intérieur de la chambre de séchage, reliées par quatre fils métalliques (Fig.III.6)

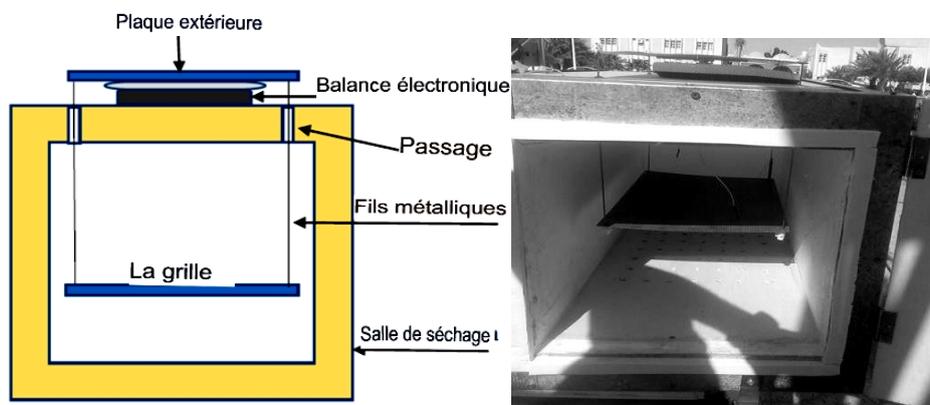


Figure III. 6: Schéma photo de système de pesée proposé

### ii. Remarque

Dans la deuxième partie de l'étude, nous préférons que les échantillons soient placés dans les mêmes conditions que dans la chambre de séchage. Étant donné que le système proposé convient uniquement à un seul échantillon à la fois, nous avons décidé de revenir à la méthode classique pour mesurer individuellement le poids de chaque échantillon.

### III.3.1.2. Collecteur solaire

Se compose de deux parties principales le collecteur d'air et l'absorbeur solaire. Le collecteur d'air est une boîte en bois de forme cubique (voir Fig. 3) avec des dimensions externes de  $(1550 \times 850 \times 100)$  mm<sup>3</sup>, et une ouverture sur sa surface supérieure. La surface supérieure de la boîte constitue l'absorbeur solaire, tandis que sa partie inférieure est une plaque stratifiée composée de trois couches. La première couche inférieure est une plaque de fer d'une épaisseur de 0,5 mm, peinte en noir mat. La deuxième couche est une isolation thermique (polyester blanc de 3 cm d'épaisseur) collée sous la plaque de fer. En dessous de la couche isolante, une troisième plaque en bois d'une épaisseur de 1,5 cm est placée pour protéger et isoler tous les composants des éraflures et des fissures.

### III.3.2. Amélioration de séchoir solaire

#### III.3.2.1. Amélioration par adjonctions des chicane dans le capteur solaire

Dans cette section de l'étude, notre attention s'est portée sur le processus de séchage d'un produit agricole, tel que le fruit d'oranges, en utilisant un système composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Ce système avait été élaboré et mis en place auparavant

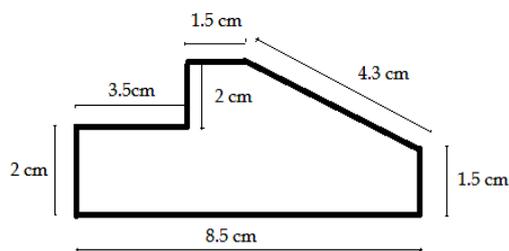
## CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'Université de Biskra. Les expériences sont mettre eu lieu de février à mars 2020.



**Figure III. 7:** Configurations initial d'un séchoir solaire indirect (capteur solaire)

L'augmentation de rendement thermique de notre collecteur solaire préconçu, nécessite une amélioration de son capteur solaire dans l'état initial (sans chicane) vers un état amélioré avec des chicanes transversales (figure III.6), les chicanes proposées ont une forme complexe (voir la Figure III.7). Elles sont mise en distance de 24.5cm entre aux (voir la Figure III.8)



**Figure III. 8:** La géométrie et dimension des chicanes



**Figure III. 9:** Disposition des chicane dans le capteur solaire

Après l'intégration des chicane dans le capteur, une étude portant sur le séchage des tranches d'orange a été menée afin d'évaluer l'effet concret des modifications apportées sur les performances thermiques. Cela incluait l'ajout des rangées de chicane. L'objectif de ces ajustements était d'optimiser le rendement du système. Les procédures des expériences et les résultats sont présentées ultérieurement.

### **III.3.2.2. Amélioration du collecteur solaire par l'adjonction d'une plaque absorbante supérieure**

Pour plus d'amélioration et d'optimisation d'utiliser l'énergie solaire pour d'augmenter la température de sortie de notre collecteur, nous envisageons d'introduire un autre mécanisme consistant à ajouter une deuxième plaque absorbante. Cette modification apporte un changement significatif dans le fonctionnement de notre collecteur. La différence entre précédente configuration et la nouvelle réside dans le fait que dans le premier cas, le fluide circule au-dessus de la plaque absorbante, tandis que dans le deuxième cas, le fluide circule en dessous de la plaque absorbante. Notre collecteur comprend donc une plaque d'absorbante supérieure et une plaque d'inférieure, la deuxième plaque absorbante étant disposée en série avec la première dans le même collecteur. Notre approche permet au fluide caloporteur de circuler entre les deux plaques. La plaque absorbante supérieure absorbe les rayons solaires et les transforme en chaleur, chauffant ainsi le fluide caloporteur circulant à l'intérieur du collecteur. La deuxième plaque a pour rôle de stabilisé la température de l'air chauffé. Cette

#### **CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES**

configuration vise à maximiser le rendement énergétique et à optimiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible, ce qui se traduit par une efficacité accrue du collecteur. Deuxième plaque métallique absorbante étant peinte en noir mat voire, puis elle est bien fixée sur un cadre en bois, équipé d'une plaque de verre. Cette étape permet l'assemblage complet de tous les éléments ajoutés auparavant, y compris le collecteur d'air préconçus et fabriqué précédemment et doté par des chicanes transversales (Figure III.9).



**Figure III. 10:** Composantes d'un capteur solaire avant et après la deuxième modification

Une fois toutes les modifications intégrées et toutes les pièces nécessaires montées dans le collecteur, notre séchoir solaire est prêt à être utilisé (Figure III.10) et (Figure III.11).



**Figure III. 11:** Séchoir solaire après l'intégration de toutes les modifications proposées

### **III.4. Procédures et étapes expérimentaux**

#### **III.4.1. Cas N°1: Séchage solaire des tranches d'orange**

Après l'amélioration et les changements dotés pour augmenter le rendement et l'efficacité de notre séchoir solaire préconçus et fabriqués, ou les changements sont faites par l'adjonction des chicane dans un collecteur d'air qui alimenté le séchoir solaire par l'air chaud comme lui présenté précédemment.

Après l'assemblage des différentes parties de séchoir, on a étudié l'effet de cette amélioration. L'expérience impliquant d'utiliser notre séchoir solaire amélioré pour sécher des tranches d'orange fines (Figure III.12)



**Figure III. 12:** Exemple des tranches d'orange fines à sécher.

Des observations expérimentales ont été enregistrées entre 9h00 et 16h30 pendant les mois de février et avril 2020 à l'Université de Biskra. Des tranches fines d'orange de trois

#### **CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES**

épaisseurs différentes, à savoir 1, 2 et 3 mm, ont été placées sur des plaques rectangulaires en treillis métallique, conçues pour accueillir différentes masses de nos échantillons. Ces plaques ont été pesées sur une balance électronique numérique afin de déterminer la quantité d'humidité éliminée à chaque demi-heure de séchage, voici un récapitulatif des étapes que vous avez fournies.

- ♦ Installation du séchoir solaire et du matériel : placez le séchoir solaire face au sud, assemblez et connectez les dispositifs nécessaires à l'expérience.

- ♦ Ajustement de la vitesse du moteur d'admission d'air: réglez la vitesse du moteur d'admission d'air à 0,018 m/s.

- ♦ Préparation des échantillons : sélectionnez des oranges fraîches, nettoyez-les et coupez-les selon les dimensions souhaitées (tranches circulaires avec un diamètre de 5 à 8 cm et des épaisseurs variables de 2 mm, 3 mm et 5 mm). Disposez soigneusement les tranches dans les grilles de déshydratation."

- ♦ Placement des sondes et mesure du poids des outils : assurez-vous du placement correct des sondes de mesure sur les échantillons de produit. Mesurez le poids des outils avant et après avoir placé les tranches pour le séchage. Prenez également la température de la chambre de séchage et la température ambiante.

- ♦ Collecte les mesures : enregistrez les mesures de température et d'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage, ainsi que la température de l'air ambiant, la température du produit et l'humidité de l'air. Mesurez l'humidité et la température de l'air sortant à la sortie du canal.

- ♦ Mesures répétées : répétez les mesures toutes les 30 minutes jusqu'à ce que le poids du produit ne change plus, ce qui indique son assèchement complet.

- ♦ Calcul du taux d'humidité relative (rapport d'humidité): calculez le rapport d'humidité (MR) pour déterminer le teneur en eau.

- ♦ Ajustement de la vitesse de l'air et répétition des étapes: modifiez la vitesse de l'air sortant dans les valeurs suivantes 0,024 kg/s et 0,032 kg/s et répétez les mêmes étapes précédentes pour les autres différents épaisseurs.

En suivant les précédentes étapes à une manière méthodique, vous pourrez mener une expérience complète pour analyser le processus de séchage des tranches d'orange à l'aide d'un séchoir solaire dans différentes conditions.

**III.4.1.1. Séchoir solaire à capteur simple (sans chicanes)**

Les figures (III.13, III.14, III.15 et III.16) présentent les photos expérimentales des tranches d'oranges à épaisseur égale de 2, 3 et 5 mm avant et après le séchage



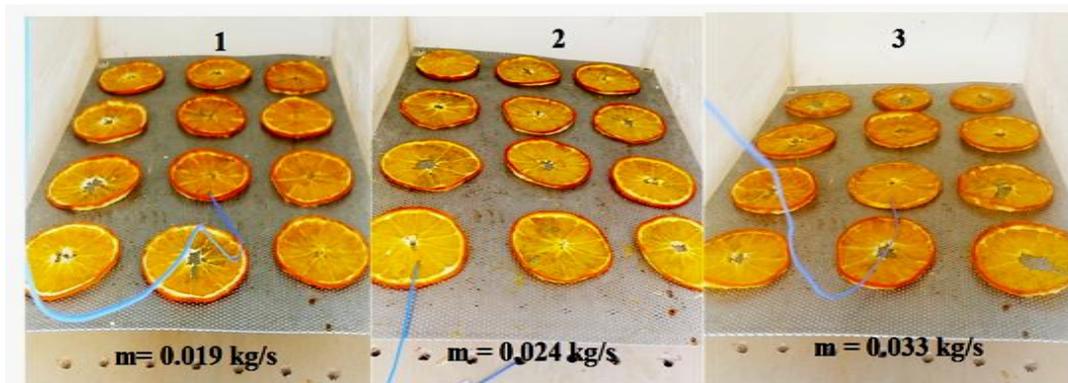
**Figure III. 13:** Tranches d'orange avant et après le séchées sans chicanes de 2 mm d'épaisseur, 8cm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s



**Figure III. 14:** Tranches d'orange avant et après le séchées sans chicanes de 3 mm d'épaisseur, et 8cm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s



**Figure III. 15:** Tranches de orange humides et séchées sans chicanes de 5 mm d'épaisseur, et 8cm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s



**Figure III. 16:** Tranches d'orange séchées dans un séchoir solaire à capteur simple (sans chicanes) de 3mm d'épaisseur, 80mm de diamètre, différent débit massique d'air sortant.

### III.4.1.2. Séchage solaire à capteur amélioré avec des chicanes

Les figures suivantes démontrent les oranges séchées après et avant le séchage solaire dans le cas d'un capteur amélioré (Avec chicane)



**Figure III. 17:** Tranches d'orange humides et séchées avec chicanes de 2 mm d'épaisseur, et 80mm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s



**Figure III. 18:** Tranches d'orange humides et séchées avec chicanes de 3mm d'épaisseur, et 80mm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s



**Figure III. 19:** Tranches d'orange humides et séchées avec chicanes de 5mm d'épaisseur, 80mm de diamètre, le débit 0,019 Kg /s

### **III.4.2. Cas N°2 : Séchage solaire des tranches de pommes de terre**

Dans l'étude expérimentale de cas N°2, une deuxième modification est menais dans le séchoir solaire, et pour étudier l'effet de ces modifications. Des expériences utilisent le séchoir solaire amélioré pour sécher des tranches de pommes de terre avec différentes épaisseurs, débits massique d'air, et teneur en sel, les étapes que nous avons les fournies sont les suivants:

- ♦ Installation du séchoir solaire et du matériel: placez le séchoir solaire face au sud, assemblez et connectez les dispositifs nécessaires à l'expérience.

- ♦ Ajustement de la vitesse du moteur d'admission d'air: réglez la vitesse du moteur d'admission d'air à 0,018 m/s.

- ♦ Préparation des échantillons: sélectionnez des pommes de terre fraîches, nettoyez-les et coupez-les selon les dimensions souhaitées (tranches circulaires avec un diamètre de 5 cm et des épaisseurs variables de 2 mm, 4 mm et 6 mm). Disposez soigneusement les tranches dans les grilles de déshydratation."

- ♦ Ajout de sel : appliquez un poids de 0,25 g de sel sur les tranches désignées pour le séchage.

- ♦ Placement des sondes et mesure du poids des outils: assurez-vous du placement correct des sondes de mesure sur les échantillons de produit. Mesurez le poids des outils avant et après avoir placé les tranches pour le séchage. Prenez également la température de la chambre de séchage et la température ambiante.

- ♦ Collecte des mesures: enregistrez les mesures de température et d'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage, ainsi que la température de l'air ambiant, la température du produit et l'humidité de l'air. Mesurez l'humidité et la température de l'air sortant à la sortie du canal.

#### **CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES**

♦ Mesures répétées: répétez les mesures à toutes les 30 minutes jusqu'à ce que le poids du produit ne change plus, ce qui indique son assèchement complet.

♦ Calcul du taux d'humidité relative (rapport d'humidité): calculez le rapport d'humidité (MR) pour déterminer le teneur en eau.

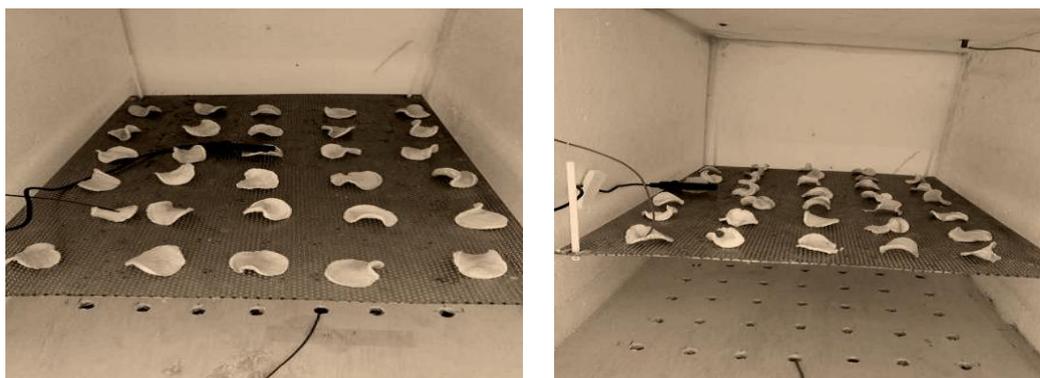
♦ Ajustement de la vitesse de l'air et répétition des étapes: Modifiez la vitesse de l'air sortant et répétez les étapes précédentes pour différents poids de sel (0,5 g, 0,75 g).

En suivant ces étapes de manière méthodique, vous pourrez mener une expérience complète pour analyser le processus de séchage des tranches de pommes de terre à l'aide d'un séchoir solaire dans différentes conditions.

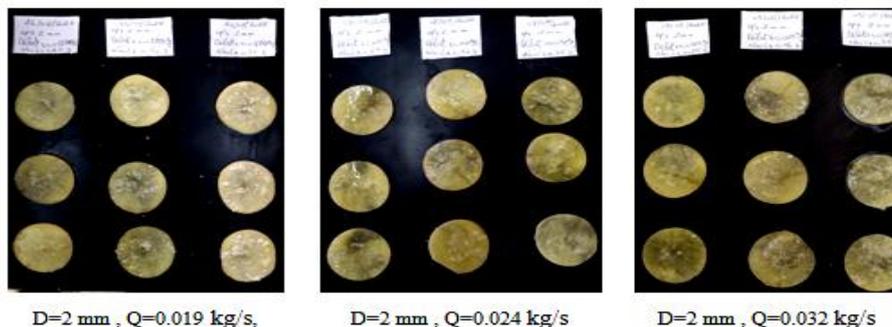
Dans cette partie d'étude, nous avons intéressé par l'effet chaleur et le produit à sécher,



**Figure III. 20:** Disposition des Tranches de pomme de terre humides de 2mm et 3 mm d'épaisseur avants le séchage (sans prétraitement)



**Figure III. 21:** Disposition des Tranches de pomme de terre séchées de 2mm et 3 mm d'épaisseur après s le séchage (sans prétraitement)



**Figure III. 22:** Tranches circulaires avec un diamètre de 5 cm et des épaisseurs de 2 mm avant le séchage dans les différents débits massiques de l'air sortant.

### **III.5. Appareils et instruments de mesure expérimentale**

#### **III.5.1. Les appareils utilisés dans séchage des tranches d'orange (cas N°1)**

Pour la première étude expérimentale on utilise les appareils suivants

- **Balance électronique numérique:**

La balance électronique numérique est utilisée pour mesurer précisément le poids des échantillons et suivre l'élimination de l'humidité toutes les demi-heures de séchage. Elle est illustrée dans la (figure III.23).



**Figure III.23:** Balance électronique numérique.

- **Thermomètre-Contrôle (Modèle TPM-10):**

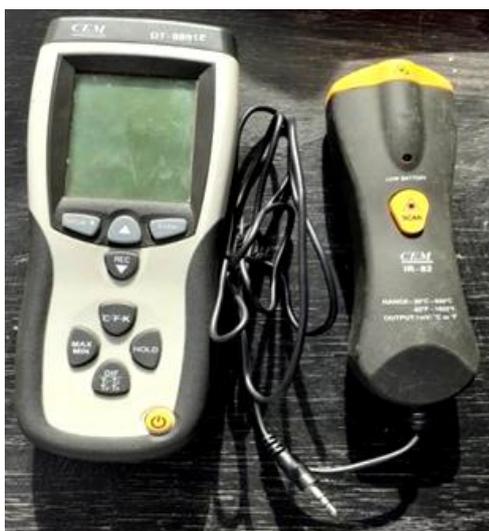
Le thermomètre-contrôle TPM-10 est placé juste au-dessus de la surface du produit pour mesurer avec précision la température et l'humidité. Cet appareil est présenté dans la figure suivante voire la (figure III.24).



**Figure III. 24:** Un thermomètre-contrôle (modèle TPM-10).

♦**Thermocouples de Type K:**

Les thermocouples calibrés de type K sont utilisés pour mesurer diverses températures (Température d'entrée du sécheur, Température de surface du produit, Température d'entrée et de sortie de la chambre de séchage, Température d'entrée du capteur solaire, Température de sortie, Température de la plaque absorbante du collecteur) Ces mesures sont illustrées dans la (figure III.25).



**Figure III. 25:** Thermocouples de type k.

♦**Hygromètre (Modèle PCE-555):**

Hygromètre PCE-555 est utilisé pour mesurer l'humidité relative de l'air extérieur (figure III.26).



**Figure III. 26:** Hygromètre (modèle PCE-555).

•**Pyranomètre (Modèle Voltcraft 4890.20) :**

Ce pyranomètre est robuste et facile à utiliser, mesure l'intensité du rayonnement solaire en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ), comme illustré (figure. III.27).



**Figure III. 27:** Pyranomètre (Modèle Voltcraft 4890.20)

•**Anémomètre Numérique (Model PCE-TA30) :**

L'anémomètre numérique KIMO-LVA, ayant une précision de 0.01 m/s, est utilisé pour mesurer la vitesse du vent, la figure (figure III.28) présente cet appareil.



**Figure III. 28:** Anémomètre numérique (Model PCE-TA30).

•**Régulateur de Tension (AC 220V 4000W) :**

Le régulateur de tension AC 220V 4000W est utilisé pour ajuster la tension du moteur électrique et contrôler sa vitesse. Cet appareil est illustré dans la (figure III.29).



**Figure III. 29:** Régulateur de Voltage (AC 220V 4000W).

•**Moteur d'Aspiration d'Air:**

Le moteur d'aspiration d'air permet de créer un flux d'air forcé, expédiant l'air chaud de la chambre de séchage vers l'extérieur. Ce moteur est montré sur la figure suivante (figure III.30).



**Figure III. 30:** Aspirateur de l'air utilisé dans la partie expérimentale

**III.5.2. Les appareils utilisés dans séchage des tranches de pomme de terre (cas N°2)**

Dans le tableau suivant en résume les étapes à suivrais dans l'expérience, incluant les quantités de sel (NaCl), la température, le rayonnement solaire, et le taux d'humidité pour les différents cas étudiés au cours de cette expérience.

**Tableau III. 4:** Résumé des études expérimentales, incluant les quantités de sel (NaCl)

Cas N°	MR (kg water/ kg prs) T (c°) R (w/m²)	Épaisseur d'échantillon Ep (mm)	Debit massique de l'air (Kg/s)	Poids de Nacl (g)
Case 1	MR T R	2 mm 3 mm 5 mm	0.01884 0.024 0.032	0

**CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES**

Case 2	MR T R	2 mm	0.01884 0.024 0.032	0.25 0.50 0.75
Case 3	MR T R	3 mm	0.01884 0.024 0.032	0.25 0.50 0.75
Case 4	MR T R	5 mm	0.01884 0.024 0.032	0.25 0.50 0.75

Dans ces expériences nous utilisons tous les appareils précédentes cités dans le cas N°1 et on utilise aussi un balance électronique numérique de laboratoire de précision  $10^{-3}$  (Fig. III.31) pour mesurer les petits poids des ajouts de NaCl



**Figure III. 31:** Balance électronique numérique de laboratoire de précision de  $10^{-3}$ g

**Tableau III. 5:** Matériaux et outils de mesure utilisés dans l'expérience

Appareille / instrument	Model et précisions
Balance	Digital electronic scale with an accuracy of 1g
Balance	Digital electronic scale with an accuracy of ( $10^{-3}$ g)
Thermometer	Thermometer-control (Model TPM-10).
Digital Thermocouple Thermometer	Digital Thermocouple Thermometer, 4 Channel K-Type Digital Thermocouple Sensor Thermometer, Digital Thermocouple Thermometer with Min/Max/Average data display and function/model: Licx
Air flow meter	Mobile differential pressure gauge AIRFLOW model (DM3).
Wattmeter	Electronic Energy Meter Measuring Outlet Socket Digital Wattmeter Power Voltage Wattmeter Power (220 V/ DC)
Hygrometer	Hygrometer (Model PCE-555).
Pyranomètre	Pyranomètre (Model Volt craft 4890.20)
anemometer	Digital anemometer (Model PCE-TA30).
Voltage regulator	Voltage regulator (AC220V4000W)
air sucker	Système mobile d'aspiration d'air, fonction d'arrêt manuel, type FE 840

### **III.6. Analyse énergétique de séchoir solaire**

Dans cette partie, l'analyse énergétique de notre système est équivalent de l'analyse énergétique de la chambre du séchage alimentée par le collecteur solaire pour but d'extraire l'eau à l'intérieure des produits agroalimentaires à séchant dans la chambre de séchage. Les valeurs fournit dans l'analyse énergétique, telle que l'enthalpie de la vapeur d'eau du produit, de la chambre de séchage, et de collecteur solaire et latente, aidons à contrôler le système de séchage.

Cette partie d'étude nécessite l'enregistrement des températures correspondant à la chambre de séchage, telles que la température du produit, la température de la chambre et la température d'entrée de la chambre, puis le contrôle de l'équilibre pour chaque expérience afin de sélectionner de la quantité de l'eau extrait dans les tranches d'orange. L'air chauffé provient du collecteur solaire, qui prend sa température chaude à partir de la plaque absorbante, puis transférer l'air chauffé vers la chambre de séchage, ou on estimant en même temps la température de sortie du collecteur solaire.

#### **III.6.1. Puissance de système de séchage**

Le système de séchage tire l'énergie thermique à partir du collecteur d'air solaire, cette énergie correspond à 100 % de puissance donnée à la chambre de séchage. Mais la puissance d'entrée a été distribuée dans la chambre de séchage sous forme d'enthalpies telles que (vapeur d'eau, produit et latente).

$$Q_{effective} = Q_{eau} + Q_{pro} + Q_{vap} + Q_{ch} + Q_L + Q_{loss_{col-ch}} \quad (III. 1)$$

- ♦  $Q_{effective}$ : puissance effective (W)
- ♦  $Q_{eau}$ : puissance thermique de l'eau (W)
- ♦  $Q_{pro}$ : puissance thermique du produit (W)
- ♦  $Q_{vap}$ : puissance thermique de la vapeur (W)
- ♦  $Q_{ch}$ : puissance thermique de la chambre de séchage (W)
- ♦  $Q_L$ : latente (W)
- ♦  $Q_{loss_{col-ch}}$ : perte de puissance thermique entre le collecteur et la chambre de séchage (W)

La puissance thermique correspondant à l'eau, au produit et à la vapeur est écrite sous forme d'équation (1).

$$Q = \frac{mC_p(T_f - T_i)}{t} \quad (III. 2)$$

La latente est estimée par le changement de cas de l'eau de liquide à gaz écrit par (2).

$$Q_L = m_{vap} \times L \quad (III. 3)$$

L'enthalpie du chauffage solaire de l'air et de la chambre de séchage est écrite par (3).

La perte globale de puissance provient de l'enthalpie des chauffages solaires de l'air moins une puissance effective (4).

$$Q = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (\text{III. 4})$$

### III.6.2. Puissance perdus de système

Le coefficient global de transfert de chaleur est déterminé par l'épaisseur et la conductivité thermique des matériaux à travers lesquels la chaleur est transférée. Plus le coefficient est élevé, meilleure est la diffusion thermique. Dans un échangeur de chaleur, la relation entre le coefficient global de transfert de chaleur (U) et la puissance thermique échangée (Q) peut être démontrée par l'équation suivante (5), (6) et (7).

$$Q_{globalloss} = Q_{col} - Q_{effective} \quad (\text{III. 5})$$

$$Q_{globalloss} = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (\text{III. 6})$$

$$Q_{globalloss} = \frac{\Delta T_{LM}}{R_{eq}} = \frac{(T_{ch} - T_{am})}{R_{eq}} \quad (\text{III. 7})$$

Avec : Q : Puissance thermique échangée (W)

A : Surface d'échange (m<sup>2</sup>)

U : Coefficient global de transfert de chaleur (W/(m<sup>2</sup>°C))

$\Delta T_{LM}$  : Différence de température logarithmique moyenne (°C)

### III.6.3. Efficacité du system de séchage solaire

#### III.6.3.1. Efficacité d'un collecteur solaire

La mesure de l'efficacité du collecteur est le rapport entre la puissance thermique qu'il fournit au fluide caloporteur et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface utile du collecteur. Ce rapport est appelé l'efficacité du collecteur

$$\eta_{cs} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{G \cdot A} \cdot 100 \quad (\text{III. 8})$$

$$\eta_{eff\ cs} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A \cdot G + P_e} \cdot 100 \quad (\text{III. 9})$$

De plus, l'équation (9) est l'équation qui donne la valeur réelle de la mesure de l'efficacité du collecteur solaire.

#### III.6.3.2. Efficacité de la chambre de séchage

C'est l'efficacité que fournit la chambre de séchage. Elle tire son énergie du collecteur solaire, ce qui lui confère une meilleure efficacité.

$$\eta_{ch} = \frac{\dot{m} \cdot c_p (T_{out\ ch} - T_{in\ ch})}{\dot{m} \cdot c_p (T_{out\ cs} - T_{in\ cs})} \cdot 100 \quad (\text{III. 10})$$

Après simplification de l'équation, nous obtenons

$$\eta_{ch} = \frac{(T_{out_{cs}} - T_{in_{cs}})}{(T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}})} \cdot 100 \quad (III. 11)$$

Il existe également une autre équation pour cette efficacité, qui donne la valeur réelle obtenue par ce travail, et qui est la suivante :

$$\eta_{ch_{eff}} = \frac{\dot{m} \cdot cp(T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}})}{\dot{m} \cdot cp(T_{out_{cs}} - T_{in_{cs}}) + \dot{m} \cdot cp(T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}})} \cdot 100 \quad (III. 12)$$

Nous simplifions l'équation

$$\eta_{ch_{eff}} = \frac{T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}}}{T_{out_{cs}} - T_{in_{cs}} + T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}}} \cdot 100$$
$$\eta_{ch_{eff}} = \frac{T_{out_{ch}} - T_{in_{ch}}}{2 \cdot T_{out_{cs}} - (T_{in_{cs}} + T_{in_{ch}})} \cdot 100 \quad (III. 13)$$

### **III.7. Modélisation mathématique du phénomène du séchage solaire**

La modélisation mathématique du séchage solaire constitue une méthodologie utilisée pour comprendre et prévoir les mécanismes de séchage des produits alimentaires soumis au rayonnement solaire. Cette modélisation repose sur des formulations mathématiques et des modèles délimitant les phénomènes de transfert de chaleur, de masse et d'énergie impliqués dans le processus de séchage solaire.

#### **III.7.1. Modèles utilisés**

Pour modéliser le phénomène de transfert (masse et chaleur) qui se produit lors du processus de séchage. Dans les littératures, Plusieurs formules de configurations présentent et restent acceptables. Ces formules mathématique de configurations le processus de séchage appelant des modèles de calcul, ils sont regroupés dans les trois familles principales comme suivant [97] :

##### **a. Modèles purement empiriques**

Les modèles de séchage purement empiriques sont des modèles basés sur des observations et des expérimentations pratiques plutôt que sur des principes théoriques ou des équations physiques.

##### **b. Modèles théoriques**

Les modèles théoriques de séchage reposent sur des principes physiques et mathématiques fondamentales pour comprendre en profondeur le processus de séchage. Contrairement aux modèles empiriques, qui s'appuient sur des observations pratiques et des

## CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

données expérimentales, les modèles théoriques cherchent à décrire le séchage en utilisant des équations qui décrivent les phénomènes physiques sous-jacents. Bien que leur construction et leur application puissent être plus complexes en raison de la nécessité de maîtriser les principes physiques et de résoudre des expressions mathématiques complexes, ils offrent une compréhension approfondie du processus de séchage et permettent une prédiction plus précise de l'efficacité du séchoir dans différentes situations. Diverses méthodologies théoriques sont utilisées pour modéliser le séchage, notamment les modèles de diffusion, les modèles cinétiques et les modèles thermodynamiques.

### c. Modèles semi-théoriques

Les modèles semi-théoriques de séchage offrent une approche unique en combinant des éléments empiriques et théoriques pour décrire le processus de séchage. En intégrant à la fois des équations basées sur des principes physiques et des paramètres empiriques, ces modèles offrent une meilleure compréhension et une prédiction plus précise du processus de séchage dans une variété de contextes.

Plusieurs modèles sont utilisés dans les études de séchage solaire des produits agroalimentaires, permet ces modèles on distingue les suivants:

**Tableau III. 6:** Modèles mathématiques de séchage des produits agroalimentaires [98]

N°	Le model	Equation descriptive de Model	Référence
1	Newton	$MR = e^{(-kt)}$	(O'Callaghan <i>et al.</i> , 1971)
2	Page	$MR = e^{(-kt^n)}$	(Diamante and Munro, 1993)
3	Page Modifie	$MR = e^{[-(kt)^n]}$	(Overhults <i>et al.</i> , 1973; White <i>e al.</i> , 1978)
4	Henderson et Pabis	$MR = a e^{(-kt)}$	(Zhang and Litchfield, 1991)
5	Henderson et Pabis Modifie	$MR = a e^{(-kt)} + b e^{(-gt)} + c e^{(-ht)^{\frac{1}{m}}}$	(Karathanos, 1999)
6	Deux termes	$MR = a e^{(k_0t)} + b e^{(-k_1t)}$	(Sharaf-Eldeen <i>et al.</i> , 1980)
7	Exponential de deux termes	$MR = a e^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kat)}$	(Sharaf-Eldeen <i>et al.</i> , 1980)
8	Approximation de diffusion	$MR = a e^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kbt)}$	(Yaldiz <i>et al.</i> , 2001)
9	Verma <i>et al.</i>	$MR = a e^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-gt)}$	(Lalit <i>et al.</i> , 1985)
10	Logarithmique	$MR = a e^{(-kt)} + c$	(Yagcioglu & A., 1999)
11	Wang <i>et Singh</i>	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang and Singh, 1978)
12	Midilli <i>et Kucuk</i>	$MR = a e^{(-kt^n)} + bt$	(Akpinar and Bicer, 2007)

Le teneur en eau dans les échantillons pendant le séchage a été exprimé par l'équation (III.6):

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (\text{V. Shanmugam, 2006}). \quad (\text{III. 14})$$

Où ( $M_t$ ) est la mesure de l'humidité à tout moment de séchage (% , base humide), ( $M_0$ ) est l'humidité initiale (% , base humide), et ( $M_{eq}$ ) est pourcentage d'humidité dans l'équilibre (% , base humide).

Les modèles de couches minces (tab. III.6) étaient appropriés pour trouver le modèle le plus approprié pour décrire la courbe de séchage des pommes de terre. La régression non linéaire a été utilisée pour obtenir chaque constante des modèles mathématiques choisis à l'aide des programmes informatiques pour choisir le meilleur modèle expérimental pour décrire les courbes de séchage. ( $\chi^2$ ) est un écart carré entre les observations expérimentales et projetées des modèles de couche mince et l'erreur de racine carrée moyenne (RMSE). Plus les valeurs de  $R^2$  (proximité de un) sont élevées, plus les valeurs de  $\chi^2$  et RSME (proximité de zéro) équation (2,3). Ces paramètres peuvent être décrits dans les équations suivantes :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}})^2}{N-m} \quad \text{(III. 15)}$$

$$\text{RMSE} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(III. 16)}$$

$$\text{SSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}})^2 \quad \text{(III. 17)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}}) \sum_{i=1}^N (M_{\text{modi}} - M_{\text{expi}})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}})^2][\sum_{i=1}^N (M_{\text{expi}} - M_{\text{modi}})^2]}} \quad \text{(III. 18)}$$

Où ( $M_{\text{expi}}$ ) est le rapport d'humidité expérimental, ( $M_{\text{mod},i}$ ) est le rapport d'humidité prédéfini, (N) est le nombre d'observations et (m) est le nombre de constante du modèle de séchage.

### **III.7.2. Modélisation mathématique de teneur en eau (MR) à l'aide des modèles semi empirique**

Dans le cadre d'une meilleure compréhension de la cinétique de séchage, La modélisation mathématique du séchage solaire est une traduction des différents phénomènes physiques associés au fonctionnement du séchage solaire (changement d'humidité, transfert de masse, transfert de chaleur, etc.) en équations mathématiques. Dans notre étude de ce phénomène, nous utilisons la méthode d'itérations de monter carrée pour analyser les résultats expérimentaux et choisissent le modèle mathématique le plus adéquate de notre cas.

Cette section du chapitre s'attache à explorer le modèle mathématique de séchage solaire de tranches de pommes de terre (voire l'équation III.19). Elle vise à utiliser le modèle mathématique semi-empirique choisis qui base sur les conditions expérimentales, afin d'élucider et de caractériser le processus de séchage solaire

## CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

Les méthodes numériques sont utilisées pour évaluer la cohérence entre les résultats présentés dans les courbes de séchage tracés dans les cas étudiés, après avoir une bonne cohérence des valeurs a données, les calculs s'arrêtent, ce qui montrent que les résultats expérimentaux ont très proches avec celles de notre modèle proposé, on constate que ce dernier produisait des valeurs plus élevées de  $R^2$ . Par ailleurs, le modèle affichait les valeurs les plus faibles de SEE et de  $x^2$ , tout en présentant des valeurs significatives de  $R^2$ . Pour évaluer l'impact des variables de séchage sur les constantes du modèle A, B et C, ces dernières ont été régressées en fonction des températures de l'air de séchage, du débit massique, de l'épaisseur des échantillons et de la quantité de sel, en utilisant des méthodes de régression multiple. À partir de cette analyse de régression multiple, le modèle accepté est décrit par l'équation suivante :

$$MR(t) = A * e^{(-B*(m*ep)^{\tau})} + C * (1 + \tau) \quad (III. 19)$$

Tel que : m: est le débit massique [kg/s]

ep : est l'épaisseur des tranches [m]

$\tau$  : est le teneur en sel [kg]

Les valeurs des constantes du modèle A, B et C en fonction de l'épaisseur, le débit massique, et le teneur en sel sont présentés suivants les cas étudiés dans les tableaux suivants :

### 1.Cas des tranches a épaisseur égalé à 2mm

**Tableau. III. 7:** Les valeurs des constantes du modèle A, B et C en fonction de l'épaisseur, le débit massique, et le teneur en sel (cas des tranches d'épaisseur égale à 2mm)

	Ep= 2mm											
	Q=0.01884 kg/s				Q=0.024 kg/s				Q=0.032 kg/s			
	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075
a	1,143	1,534	1,3112	1,0957	1,201	1,9175	1,465	1,101	1,285	1,285	1,148	1,03
b	168,4	156,61	244,07	456,1	113,89	75,1	123,5	288,5	76,84	179,02	215,88	456,7
c	-0,1152	-0,50398	-0,25678	-0,06191	-0,20637	-0,8794	-0,421	-0,07684	-0,2133	-0,2065	-0,1301	-0,02362
R <sup>2</sup>	0,9936	0,9894	0,9734	0,9838	0,99307	0,9796	0,9824	0,9924	0,9831	0,9858	0,9945	0,9973

### 2.Cas des tranches a épaisseur égalé à 3mm

**Tableau. III. 8 :** Les valeurs des constantes du modèle A, B et C en fonction de l'épaisseur, le débit massique, et le teneur en sel (cas des tranches d'épaisseur égale à 3mm)

	Ep= 3mm											
	Q=0.01884 kg/s				Q=0.024 kg/s				Q=0.032 kg/s			
	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=075

## CHAPITRE IV: ÉTUDES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

a	1,34	1,392	1,306	1,153	1,161	1,254	1,083	1,083	1,391	1,398	1,511	1,172
b	79,93	75,28	130,4	182	94,7	95,53	165,7	216,36	44,21	64,44	62,45	122,1
c	-0,2775	-0,3974	-0,2333	-0,1128	-0,1169	-0,2783	-0,0917	-0,0716	-0,3152	-0,3489	-0,4626	-0,1383
R <sup>2</sup>	0,9868	0,9899	0,9781	0,9873	0,9884	0,9852	0,9929	0,9962	0,9814	0,987	0,9855	0,9863

### 3.Cas des tranches a épaisseur égalé à 5mm

**Tableau. III. 9:** Les valeurs des constantes du modèle A, B et C en fonction de l'épaisseur, le débit massique, et le teneur en sel (cas des tranches d'épaisseur égalé à 5mm)

	Ep= 5mm											
	Q=0.01884 kg/s				Q=0.024 kg/s				Q=0.032 kg/s			
	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=0,75g	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=0,75g	P0=0g	p1=0.25g	p2=0.5g	p3=0,75g
a	1,426	1,809	1,431	1,173	1,499	1,387	1,354	1,167	1,205	1,852	1,464	1,282
b	33,19	25,29	44,05	86,22	30,35	35,33	40,92	62,94	34,61	14,75	25,15	37,35
c	-0,4227	-0,7508	-0,3887	-0,129	-0,3918	-0,3251	-0,3268	-0,1509	-0,1486	-0,8229	-0,3955	-0,2489
R <sup>2</sup>	0,9964	0,9813	0,9865	0,9861	0,9728	0,9881	0,9886	0,9972	0,9897	0,9937	0,9828	0,9889

### III.8. Conclusion

Ce chapitre a détaillé les étapes expérimentales réalisées entre 2020 et 2022. Grâce à l'utilisation de matériaux appropriés et d'instruments de mesure spécialisés, les expériences ont été menées dans des conditions optimales, ce qui a permis d'obtenir des résultats positifs concernant le séchage d'échantillons d'orange et de pomme de terre de différentes épaisseurs.

Nous avons employé divers modèles mathématiques pour analyser le comportement de séchage (MR) des tranches d'orange. Par ailleurs, l'application de la théorie des réseaux de neurones, issue de l'intelligence artificielle, a permis de modéliser le comportement de séchage (MR) des tranches de pomme de terre. Les résultats obtenus ont été comparés aux données expérimentales, confirmant la pertinence et l'efficacité des méthodes utilisées.

Ainsi, les approches méthodologiques adoptées ont non seulement validé nos hypothèses mais ont également démontré la capacité des techniques modernes de modélisation à améliorer la compréhension des processus de séchage des fruits et légumes.

# **CHAPITRE IV**

## **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

### **IV.1.Introduction**

Dans ce chapitre, nous présenterons une série de figures illustrant les courbes des résultats expérimentaux obtenus pendant le processus de séchage. Ces figures permettent de visualiser et d'interpréter les principaux facteurs qui influencent l'efficacité de l'opération de séchage.

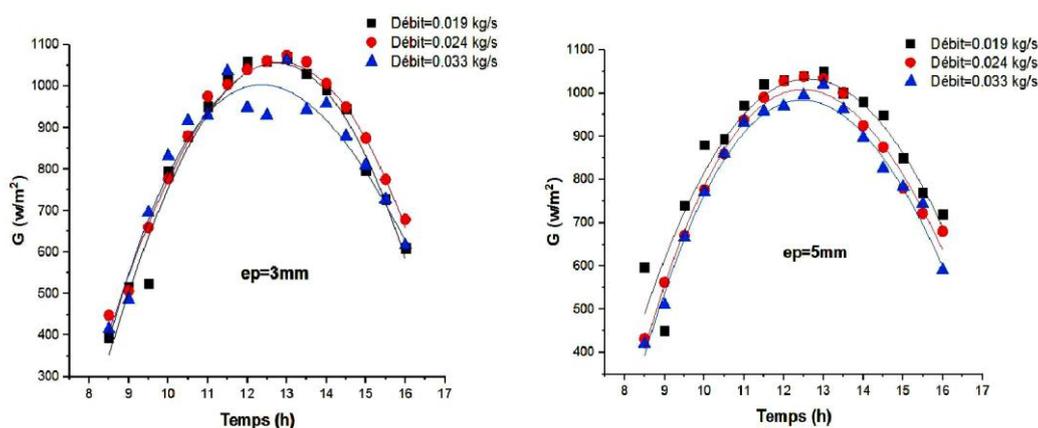
On doit diviser ce chapitre en trois parties. La première partie porte sur l'étude de cas du séchage des tranches d'orange avant et après l'ajout de chicanes dans le capteur solaire, conçu pour améliorer le rendement de celui-ci. Dans la deuxième partie, nous introduisons d'autres améliorations au capteur et étudions l'effet de ces modifications sur le séchage solaire des tranches de pomme de terre. Cette section inclut également des techniques de prétraitement visant à accélérer le processus et la cinétique de séchage. La troisième partie est consacrée à la modélisation mathématique avec différentes théories, comparant ces modèles aux résultats expérimentaux.

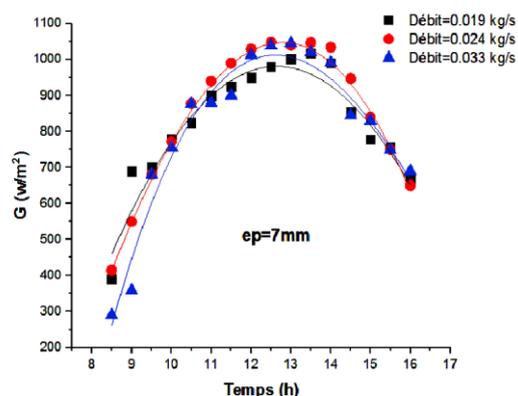
### **IV.2.Séchage solaire des fruits (cas tranches d'oranges)**

Cette partie est consacrée pour présentée les résultats de l'étude de cas du séchage des tranches d'orange avant et après l'adjonction des chicanes dans le capteur solaire.

#### **IV.2.1 Intensité des rayonnements solaires on fonction de l'épaisseur des tranches et les débits de l'air**

##### **IV.2.1.1 Cas d'un séchoir solaire à capteur simple (sans chicanes)**





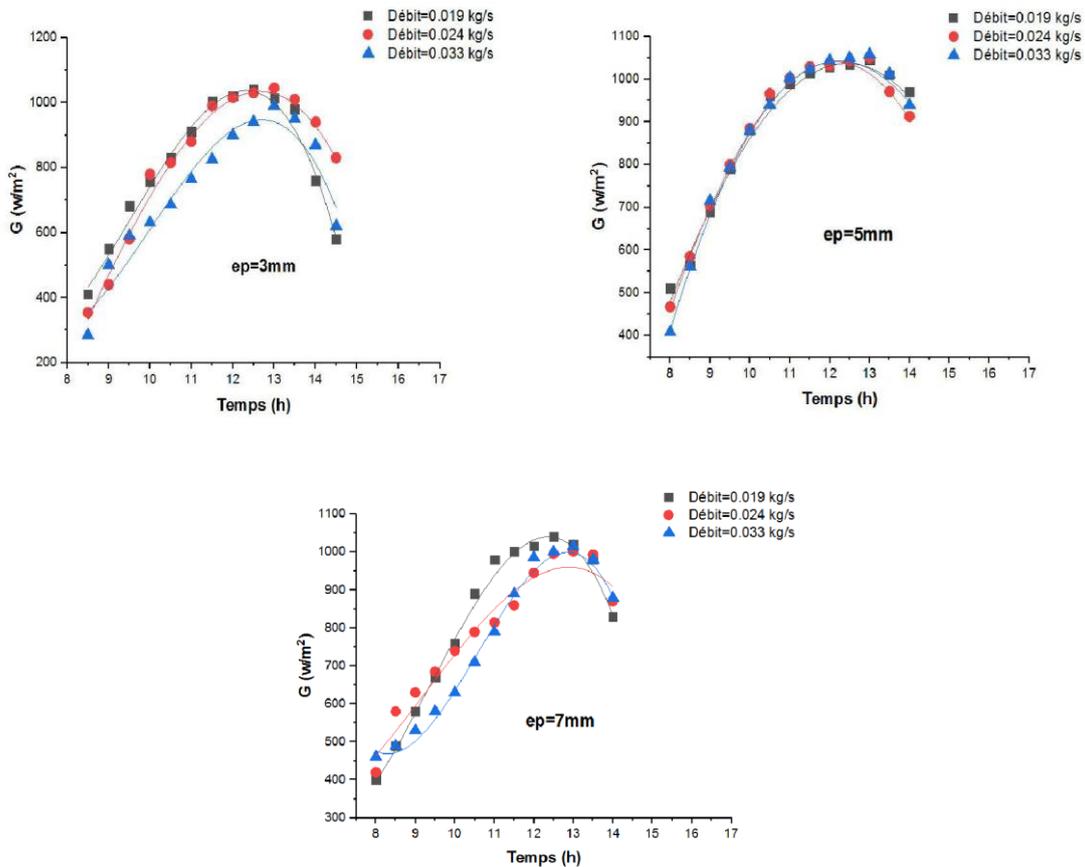
**Figure IV. 1:** Intensité des rayonnements solaires en cours des journées de séchage solaire des tranches d'orange.

La figure IV.1 représente l'intensité des rayonnements solaires au cours d'une journée de séchage solaire de tranches d'orange, en fonction de l'épaisseur des tranches et des débits d'air.

Chaque série de données montre comment l'intensité du rayonnement solaire varie en fonction du temps pour chaque débit d'air. On observe que l'intensité du rayonnement solaire atteint son pic autour de midi, entre 12h et 14h, ce qui correspond au moment où le soleil est au zénith. Cette période est critique pour le séchage solaire, car l'intensité maximale du rayonnement fournit la chaleur nécessaire pour un séchage plus efficace.

Les courbes montrent des variations dans l'intensité reçue selon le débit d'air, ce qui pourrait suggérer l'impact du flux d'air sur l'efficacité du séchage. Par exemple, un débit d'air plus élevé pourrait favoriser l'évacuation de l'humidité, bien que cela dépende aussi de la stabilité et de la constance de l'intensité solaire.

Cette courbe permet donc d'analyser et d'optimiser le processus de séchage solaire en fonction du débit d'air, aidant à déterminer le meilleur compromis entre le temps de séchage et la consommation d'énergie pour différents débits d'air. Une telle optimisation est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique et la qualité du séchage dans les procédés de déshydratation des produits alimentaires.



**Figure IV. 2:** Rayonnement solaire dans le cas d'un séchoir solaire à capteur modifié avec des chicanes

La figure IV.2 fournis montre l'impact de l'épaisseur des tranches d'orange et du débit d'air sur l'intensité du rayonnement solaire reçu dans un séchoir solaire modifié avec des chicanes. Voici une analyse plus détaillée de chaque facteur et de leurs interactions pour optimiser le séchage solaire.

- **Épaisseur de 3 mm :**

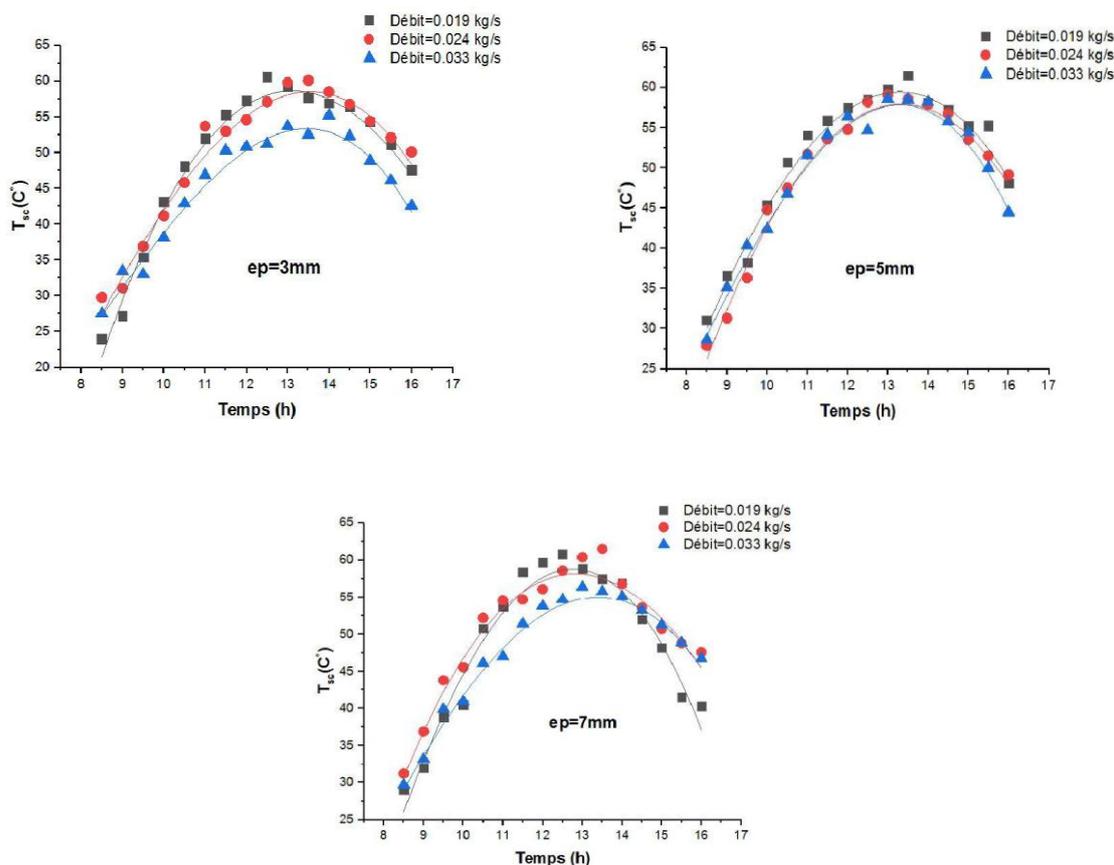
- Pour une épaisseur de tranche de 3 mm, on observe que l'intensité du rayonnement solaire monte rapidement dès les premières heures de la journée (à partir de 9h) et atteint un pic élevé d'environ 1000  $W/m^2$  autour de 13h.
- Après 13h, l'intensité commence à diminuer progressivement. Ce profil indique que les tranches fines (3 mm) réagissent rapidement à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire, ce qui permet un séchage rapide mais potentiellement moins homogène, car les tranches peuvent se déshydrater rapidement.

- **Épaisseur de 5 mm :**
  - Pour une épaisseur de tranche de 5 mm, la courbe d'intensité montre une montée similaire, mais avec un pic plus stable et légèrement en dessous de 1000 W/m<sup>2</sup>.
  - Le pic est également atteint autour de midi et reste plus constant dans la plage de 12h à 14h, avant de redescendre lentement. Cette épaisseur intermédiaire semble permettre une distribution plus homogène de l'énergie, ce qui pourrait améliorer l'uniformité du séchage et éviter un dessèchement excessif ou une surchauffe localisée.
- **Épaisseur de 7 mm :**
  - Pour une épaisseur de 7 mm, la courbe atteint un pic moins élevé (autour de 900 W/m<sup>2</sup>, qui s'étale davantage dans le temps (de 12h à 15h).
  - L'augmentation et la diminution de l'intensité sont plus progressives, ce qui pourrait permettre un séchage plus lent mais uniforme pour les tranches épaisses. Cette épaisseur peut être bénéfique pour maintenir la qualité du produit, car elle limite les risques de dessèchement excessif.

### **IV.2.2 Température de l'air à la sortie du capteur solaire**

La température de l'air à la sortie du capteur solaire est cruciale pour l'efficacité des systèmes de séchage solaire. Elle influence la vitesse de séchage et la qualité du produit final. Cette température dépend du rayonnement solaire, de la conception du capteur, du débit d'air et des conditions environnementales. En l'optimisant, on améliore l'efficacité énergétique et la qualité du séchage, ce qui est particulièrement avantageux dans les régions ensoleillées.

**IV.2.2.1 Cas d'un capteur simple CS (sans chicanes)**



**Figure IV. 3:** Température de sortie de capteur dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes)

Les courbes de figure IV. 3 montrent une interaction entre l'épaisseur des tranches d'orange et le débit massique d'air dans un capteur solaire simple (sans chicanes) qui influence la température de sortie, impactant ainsi l'efficacité du séchage :

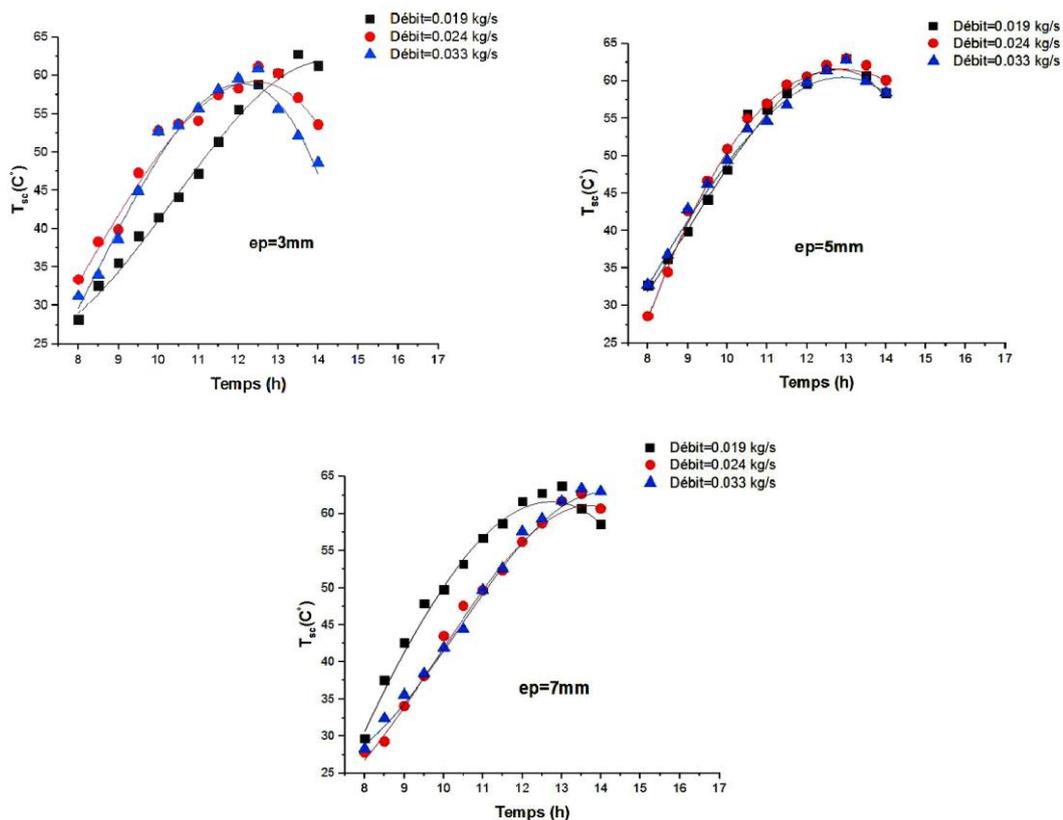
- **Épaisseur et débit massique faible (0,019 kg/s) :** avec des tranches fines (3 mm), le débit faible permet d'atteindre des températures de sortie plus élevées (jusqu'à 65°C), favorisant un séchage rapide. Cependant, avec des tranches épaisses (7 mm), bien que la température reste élevée, le temps de séchage est plus long car la chaleur doit pénétrer davantage.
- **Épaisseur et débit massique intermédiaire (0,024 kg/s) :** pour des tranches de 5 mm, un débit intermédiaire atteint une température de sortie stable (55-60°C), offrant

un bon équilibre entre la vitesse de séchage et l'homogénéité thermique. Ce réglage est optimal pour un séchage uniforme sans surchauffe.

- **Épaisseur et débit massique élevé (0,033 kg/s) :** avec des tranches épaisses (7 mm), un débit plus élevé aide à évacuer rapidement l'humidité, mais la température de sortie est plus basse (50-55°C), ce qui allonge la durée de séchage. Cela peut être moins efficace pour les tranches fines, car l'air frais se renouvelle trop rapidement pour un transfert thermique optimal.

Les tranches de 5 mm combinées avec un débit d'air intermédiaire (0,024 kg/s) semblent offrir le meilleur compromis : une température de sortie stable et suffisamment élevée pour un séchage rapide et homogène.

**IV.2.2.2 Séchage dans un capteur modifié avec chicanes**



**Figure IV. 4:** Température de sortie de capteur dans le cas d'un capteur solaire avec chicanes

Les courbes traçantes dans la figure. IV.4 montrent que l'épaisseur des tranches d'orange et le débit massique d'air interagissent pour influencer la température de sortie du capteur solaire avec chicanes, impactant ainsi l'efficacité du séchage :

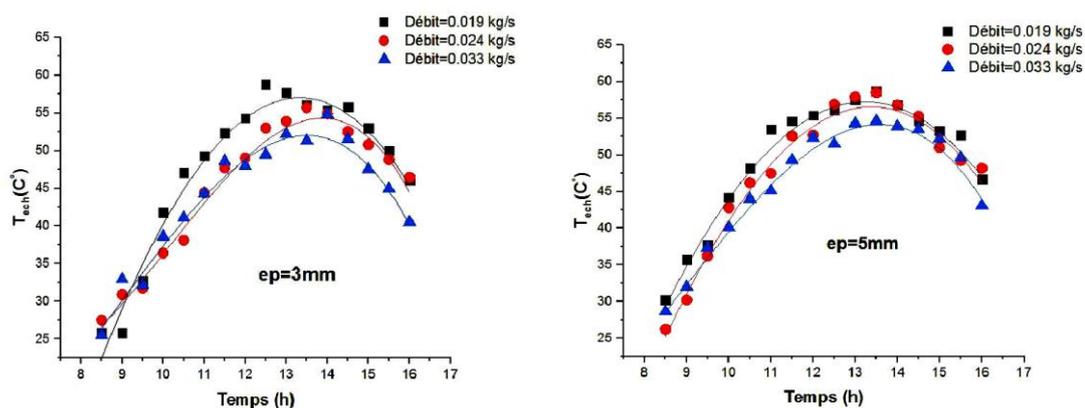
## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

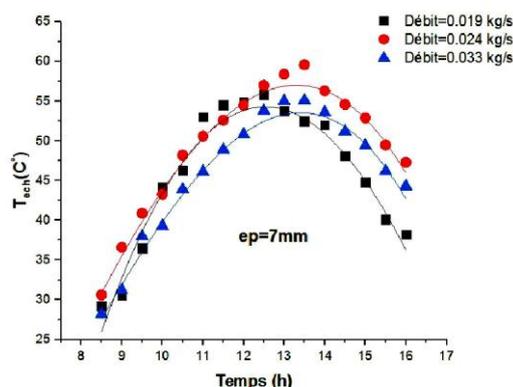
- **Tranches fines (3 mm)** : Un débit d'air intermédiaire (0,024 kg/s) maintient une température de sortie élevée et stable autour de 60°C, idéale pour un séchage rapide sans risque de surchauffe. Un débit trop faible augmente le risque de dessèchement excessif, tandis qu'un débit trop élevé ne permet pas un transfert thermique suffisant.
- **Tranches moyennes (5 mm)** : Le débit intermédiaire (0,024 kg/s) est également optimal pour cette épaisseur, permettant de maintenir une température stable autour de 60-65°C. Ce débit favorise une déshydratation homogène et un bon équilibre entre chaleur et évacuation d'humidité, ce qui est idéal pour des tranches de taille moyenne.
- **Tranches épaisses (7 mm)** : Un débit élevé (0,033 kg/s) est préférable pour cette épaisseur. Ce débit plus rapide aide à évacuer l'humidité accumulée et à maintenir une température adéquate (environ 55-60°C) pour un séchage en profondeur, évitant les risques de condensation et permettant une déshydratation progressive.

En conclusion, les tranches plus épaisses nécessitent un débit d'air plus élevé pour éviter l'accumulation d'humidité et assurer un séchage uniforme en profondeur, tandis que les tranches plus fines bénéficient d'un débit intermédiaire pour maintenir une température stable sans risquer un dessèchement rapide en surface.

### IV.2.3 Température d'entrée de la chambre de séchage

#### IV.2.3.1 Température d'entrée de la chambre de séchage : cas CS (sans chicanes)





**Figure IV. 5:** Evolution de la température d'entrée de la chambre de séchage dans le cas d'un capteur solaire simple (sans chicanes)

Les graphiques de la figure. IV.5 montrent l'influence de l'épaisseur des tranches d'orange et du débit massique de l'air sur la température d'entrée dans la chambre de séchage d'un capteur solaire simple (sans chicanes). Voici une analyse scientifique détaillée :

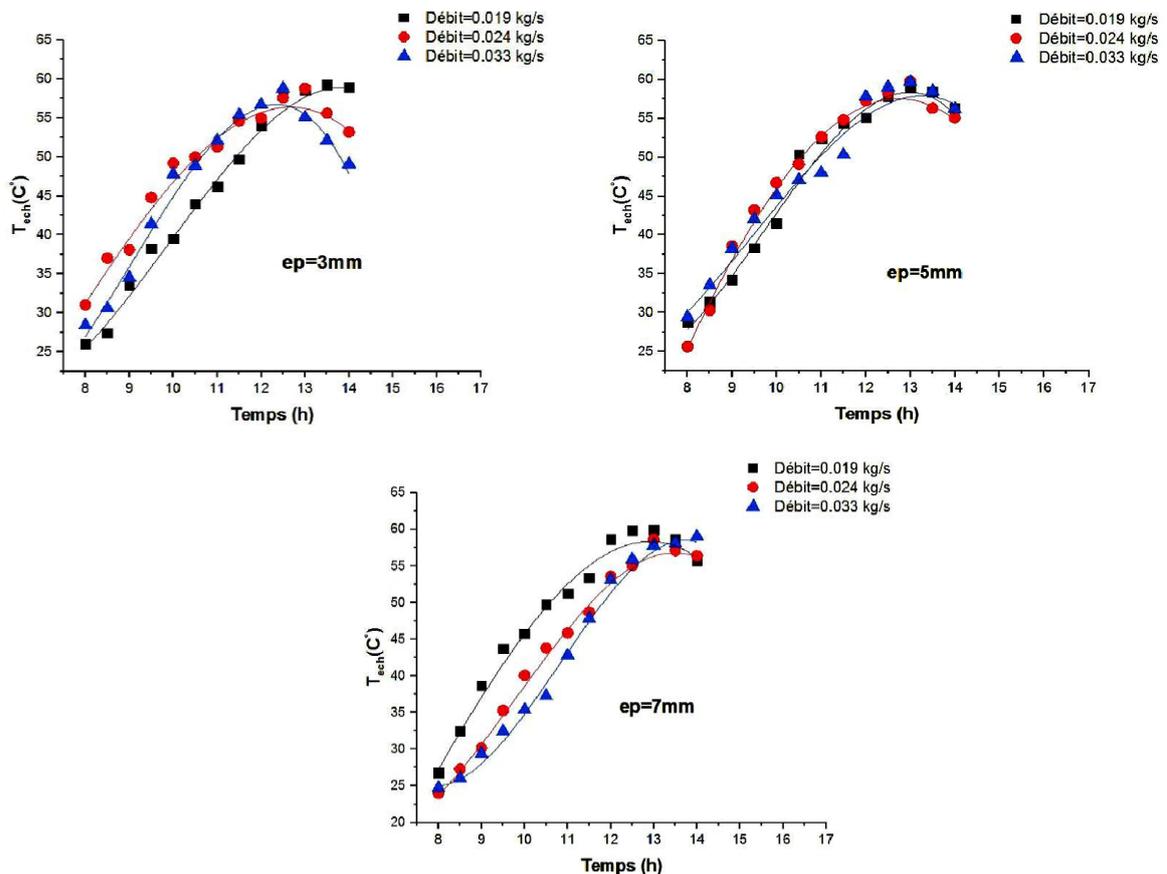
- **Tranches fines (3 mm) :** Avec un débit massique faible (0,019 kg/s), l'air reste plus longtemps en contact avec la surface du capteur, permettant une absorption maximale de chaleur et une température d'entrée élevée, jusqu'à 65°C, favorable pour un séchage rapide. Cependant, cela peut entraîner un dessèchement excessif en raison de l'exposition intense. Un débit intermédiaire (0,024 kg/s) stabilise la température d'entrée autour de 55-60°C, réduisant ainsi le risque de surchauffe et permettant une diffusion thermique plus homogène.
- **Tranches moyennes (5 mm) :** Cette épaisseur modérée montre une réponse optimale avec un débit massique intermédiaire (0,024 kg/s), qui équilibre l'absorption thermique et le renouvellement de l'air. La température d'entrée reste stable autour de 55-60°C, ce qui favorise un séchage uniforme et réduit le risque de formation de gradients de température à travers les tranches. Ce débit favorise un bon compromis entre la vitesse de séchage et la préservation des qualités des tranches.
- **Tranches épaisses (7 mm) :** Pour cette épaisseur, un débit d'air élevé (0,033 kg/s) est plus efficace car il limite la température d'entrée entre 50-55°C, permettant un renouvellement rapide de l'air pour évacuer l'humidité sans provoquer de surchauffe. La chaleur pénètre plus lentement en profondeur, permettant un séchage progressif,

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

nécessaire pour éviter les phénomènes de condensation et le développement de gradients d'humidité internes.

Dans un capteur solaire sans chicanes, le contrôle de la température d'entrée via le débit d'air et l'épaisseur des tranches est crucial pour optimiser le séchage. Les tranches plus fines bénéficient d'un débit intermédiaire pour éviter une montée trop rapide de température, tandis que les tranches épaisses nécessitent un débit plus élevé pour permettre un séchage en profondeur sans accumulation excessive d'humidité. En ajustant ces paramètres, on peut améliorer l'efficacité énergétique et la qualité du produit final en minimisant les risques de dessèchement superficiel ou de condensation.

### IV.1.1.1 Température d'entrée de la chambre de séchage : cas CS (avec chicanes)



**Figure IV. 6:** Evolution de la température d'entrée de la chambre de séchage pour différentes épaisseurs et différents débits dans le cas d'un capteur solaire modifié (avec chicanes)

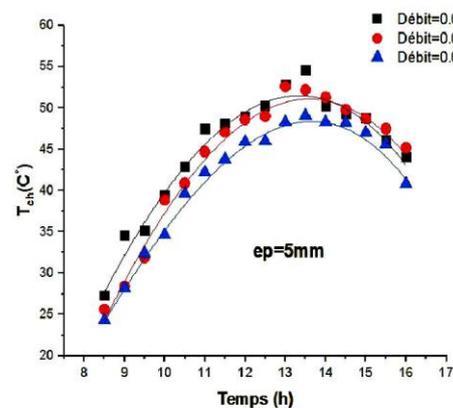
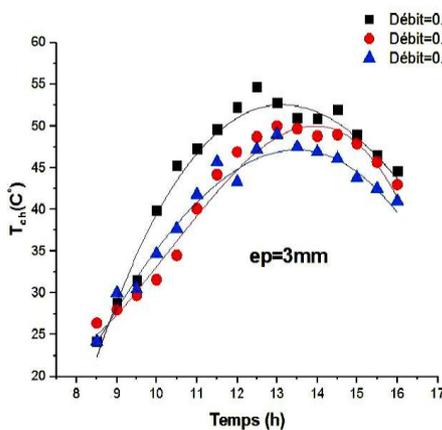
La figure IV.6 illustre que le cas d'un débit massique de 0,019 kg/s, le capteur solaire avec chicanes atteint une température d'entrée élevée, autour de 60-65°C, favorisant un

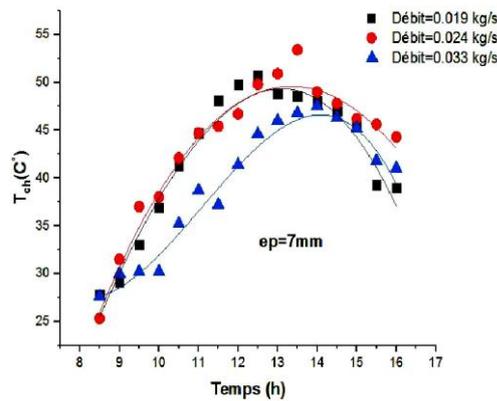
## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

séchage rapide. Pour les tranches fines (3 mm), ce débit est efficace mais peut causer un dessèchement excessif. Pour les tranches moyennes (5 mm), il assure un bon séchage uniforme, bien que l'évacuation de l'humidité soit limitée. Pour les tranches épaisses (7 mm), ce débit n'est pas idéal car il manque de renouvellement d'air, ce qui peut entraîner une accumulation d'humidité interne. Les chicanes améliorent la répartition de la chaleur, mais un débit plus élevé serait préférable pour les tranches épaisses.

Les courbes montrent que l'épaisseur des tranches d'orange et le débit massique de l'air influencent la température d'entrée dans un capteur solaire équipé de chicanes, impactant le processus de séchage. Pour des tranches fines (3 mm), un débit intermédiaire (0,024 kg/s) stabilise la température entre 55 et 60°C, assurant un séchage rapide sans dessèchement excessif. Les tranches moyennes (5 mm) bénéficient également de ce débit, favorisant un séchage homogène. Pour les tranches épaisses (7 mm), un débit élevé (0,033 kg/s) maintient une température modérée de 50-55°C, permettant un séchage en profondeur sans condensation. Les chicanes améliorent la répartition de la chaleur, optimisant le séchage pour chaque configuration d'épaisseur et de débit.

### IV.2.3.2 Température de chambre de séchage : cas CS (sans chicanes)

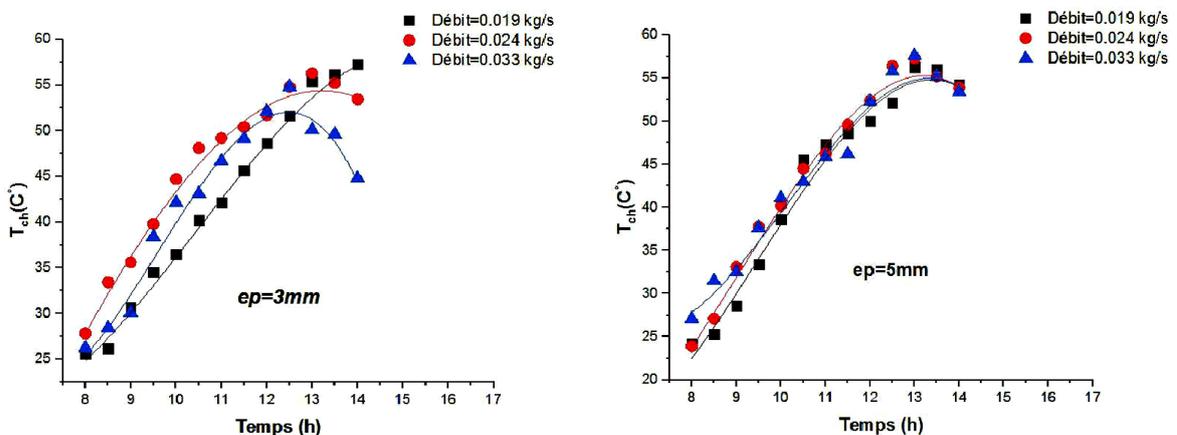


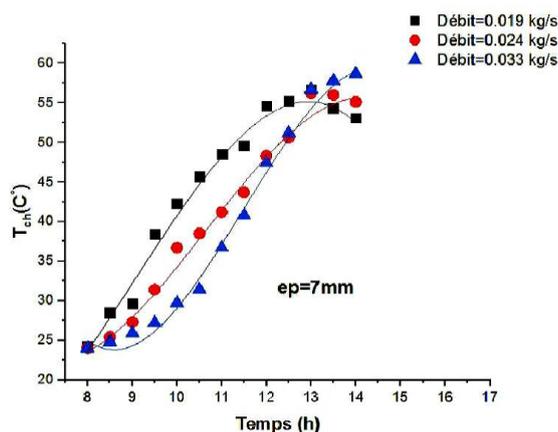


**Figure IV. 7:** Température dans la chambre de séchage en fonction de l'épaisseur et le débit massique de l'air (cas d'un capteur solaire sans chicanes)

Les résultats présentés dans les courbes de la figure IV.7 montrent que, dans un capteur solaire sans chicanes, la température de la chambre de séchage est influencée par l'épaisseur des tranches d'orange et le débit massique d'air, impactant ainsi le séchage. Pour des tranches fines (3 mm), un débit intermédiaire de 0,024 kg/s est optimal, atteignant une température de 50°C, ce qui permet un séchage uniforme sans risque de surchauffe. Les tranches moyennes (5 mm) bénéficient également de ce débit intermédiaire, stabilisant la température à environ 50°C pour un séchage homogène. Les tranches épaisses (7 mm), en revanche, nécessitent un débit élevé de 0,033 kg/s, maintenant une température modérée de 45°C qui favorise un bon renouvellement de l'air et évite la condensation interne. L'absence de chicanes limite la répartition de la chaleur, rendant le choix du débit d'air essentiel pour un séchage efficace en fonction de l'épaisseur des tranches.

**IV.2.3.3 Température de chambre de séchage : cas CS (avec chicanes)**





**Figure IV. 8:** Evolution de la température de la chambre de séchage cas capteur solaire (avec chicanes)

Dans la figure IV.8, les courbes montrent que dans un capteur solaire avec chicanes, la température de la chambre de séchage dépend de l'épaisseur des tranches d'orange et du débit d'air, permettant d'adapter le processus de séchage pour chaque configuration :

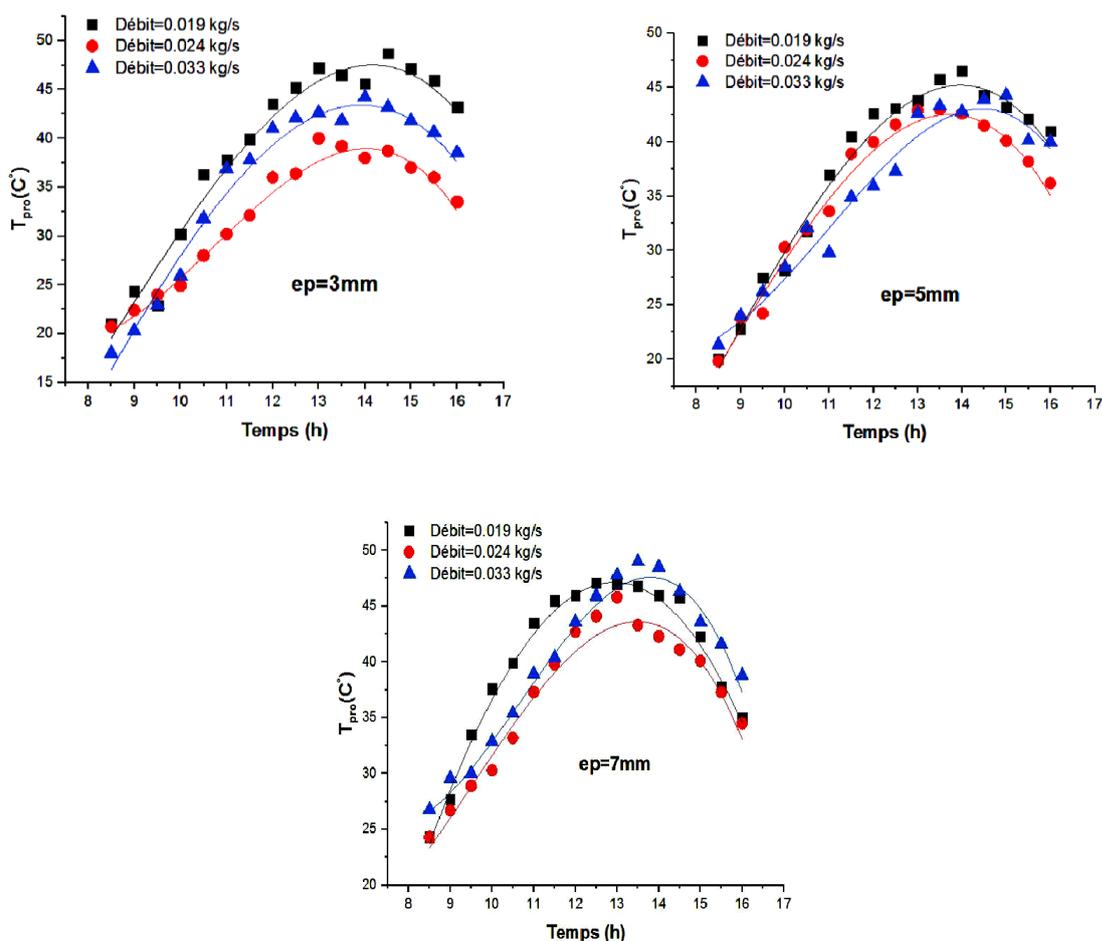
- **Tranches fines (3 mm) :** Un débit intermédiaire de 0,024 kg/s est optimal, stabilisant la température autour de 55°C. Ce niveau de température est idéal pour un séchage rapide et uniforme des tranches fines, évitant un dessèchement excessif grâce à une répartition homogène de la chaleur. À ce débit, les chicanes favorisent une meilleure diffusion thermique.
- **Tranches moyennes (5 mm) :** Le même débit intermédiaire (0,024 kg/s) maintient une température légèrement plus élevée, autour de 55-57°C, offrant un bon équilibre entre absorption thermique et évacuation d'humidité. Cette configuration assure un séchage homogène sans risque de surchauffe, avec une distribution de chaleur uniforme grâce aux chicanes.
- **Tranches épaisses (7 mm) :** Un débit plus élevé de 0,033 kg/s est recommandé pour les tranches épaisses, maintenant une température modérée entre 50 et 52°C. Ce débit favorise un bon renouvellement d'air, essentiel pour évacuer l'humidité interne sans provoquer de condensation. Les chicanes aident à répartir la chaleur uniformément, permettant un séchage en profondeur et évitant les zones d'humidité stagnante.

En résumé, les chicanes améliorent la distribution de la chaleur, optimisant le séchage selon l'épaisseur des tranches et le débit d'air. Les tranches fines et moyennes bénéficient

d'un débit intermédiaire pour maintenir une température stable et efficace, tandis que les tranches épaisses nécessitent un débit élevé pour garantir un séchage progressif et en profondeur.

### IV.2.4 Température de produit à séché

#### IV.2.4.1 Température de produit dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes)



**Figure IV. 9:** Variation de la température de produit en fonction des différentes épaisseurs et différents débits dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes)

Les graphiques dans la figure IV.9 analysent comment l'épaisseur des tranches d'orange et le débit d'air influencent la température de séchage dans une chambre équipée d'un capteur solaire sans chicanes. L'absence de chicanes signifie que la répartition de la chaleur est moins uniforme, rendant le choix du débit d'air crucial pour un séchage efficace selon l'épaisseur des tranches.

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

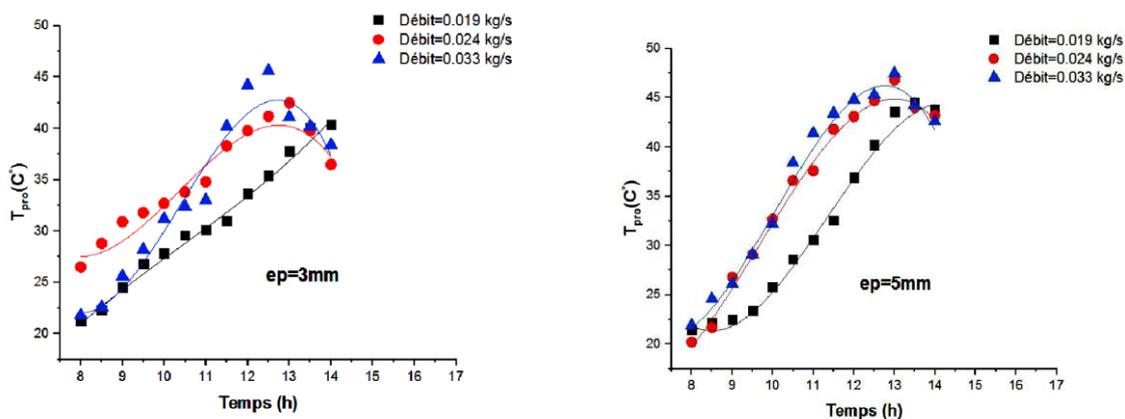
Pour les **tranches fines de 3 mm**, un débit intermédiaire de 0,024 kg/s est le plus adapté, car il permet de maintenir une température stable autour de 43°C. Ce niveau de chaleur favorise un séchage rapide et uniforme sans dessèchement excessif, ce qui est essentiel pour éviter que les tranches fines ne se dessèchent trop en surface.

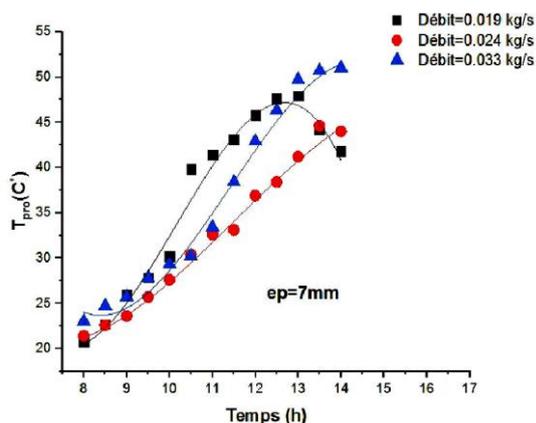
Pour les **tranches moyennes de 5 mm**, le même débit intermédiaire (0,024 kg/s) maintient une température optimale de 42°C, ce qui crée un bon équilibre entre l'absorption de chaleur et le renouvellement de l'air. Cela permet un séchage homogène sans risque de surchauffe ou de dessèchement en surface, rendant ce débit idéal pour des tranches moyennes.

Pour les **tranches épaisses de 7 mm**, un débit élevé de 0,033 kg/s est recommandé. Ce débit assure une température modérée de 40°C, favorisant un bon renouvellement de l'air, ce qui permet de sécher en profondeur sans accumulation d'humidité. Cette configuration empêche la condensation dans les couches internes des tranches épaisses et assure un séchage progressif et efficace.

En conclusion, dans un capteur solaire sans chicanes, le débit d'air doit être ajusté en fonction de l'épaisseur des tranches pour optimiser le séchage. Un débit intermédiaire de 0,024 kg/s est idéal pour les tranches fines et moyennes, permettant une température stable et uniforme pour un séchage rapide et homogène. Pour les tranches épaisses, un débit plus élevé de 0,033 kg/s est préférable, maintenant une température modérée qui assure un séchage en profondeur tout en évitant les problèmes de condensation.

### IV.2.4.2 Température de produit dans le cas d'un capteur (avec chicanes)





**Figure IV. 10:** Variation de la température de produit en fonction des différentes épaisseurs et différents débits dans le cas d'un capteur solaire (avec chicanes)

Les graphiques de la figure. IV.10 montrent que dans un capteur solaire avec chicanes, la température des tranches d'orange varie en fonction de l'épaisseur et du débit d'air, ce qui affecte le processus de séchage.

Pour les **tranches fines (3 mm)**, un débit intermédiaire de 0,024 kg/s est idéal, maintenant une température de 38-40°C qui permet un séchage uniforme sans dessèchement excessif.

Pour les **tranches moyennes (5 mm)**, le même débit intermédiaire maintient une température optimale de 42°C, assurant un séchage homogène sans surchauffe.

Pour les **tranches épaisses (7 mm)**, un débit élevé de 0,033 kg/s maintient une température modérée de 42-43°C, favorisant un bon renouvellement de l'air et un séchage en profondeur sans accumulation d'humidité.

En résumé, la présence de chicanes aide à répartir la chaleur, rendant le débit intermédiaire optimal pour les tranches fines et moyennes, tandis qu'un débit élevé est préférable pour les tranches épaisses.

IV.2.5 Teneur en eau (MR)

IV.2.5.1 Teneur en eau dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes)

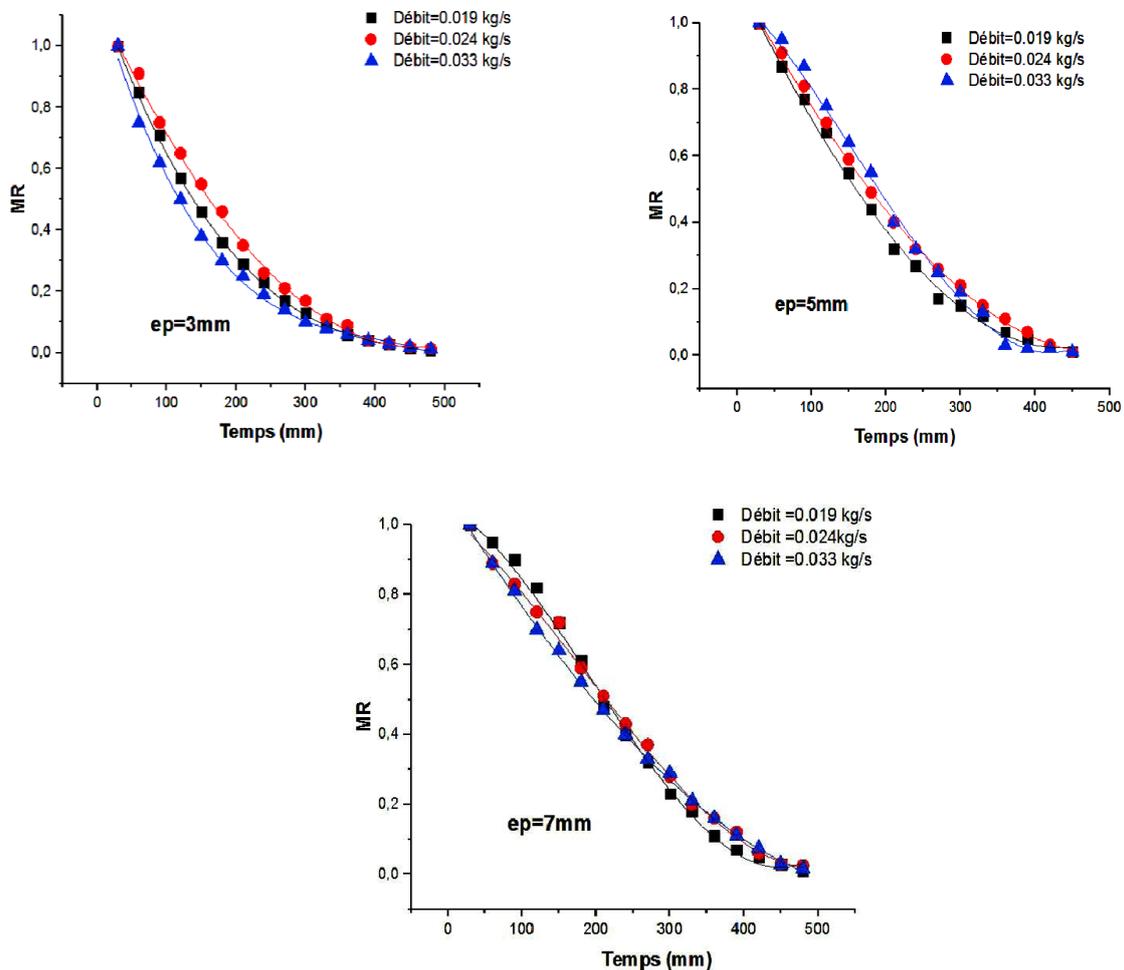


Figure IV. 11: Teneur en eau dans le cas d'un capteur simple (sans chicanes)

Les résultats représentés dans la figure IV.11 montrent que dans un capteur solaire sans chicanes, la réduction de la teneur en eau des tranches d'orange dépend de l'épaisseur des tranches et du débit d'air.

Pour les tranches fines (3 mm), un débit élevé de 0,033 kg/s est le plus efficace pour un séchage rapide en réduisant rapidement la teneur en eau.

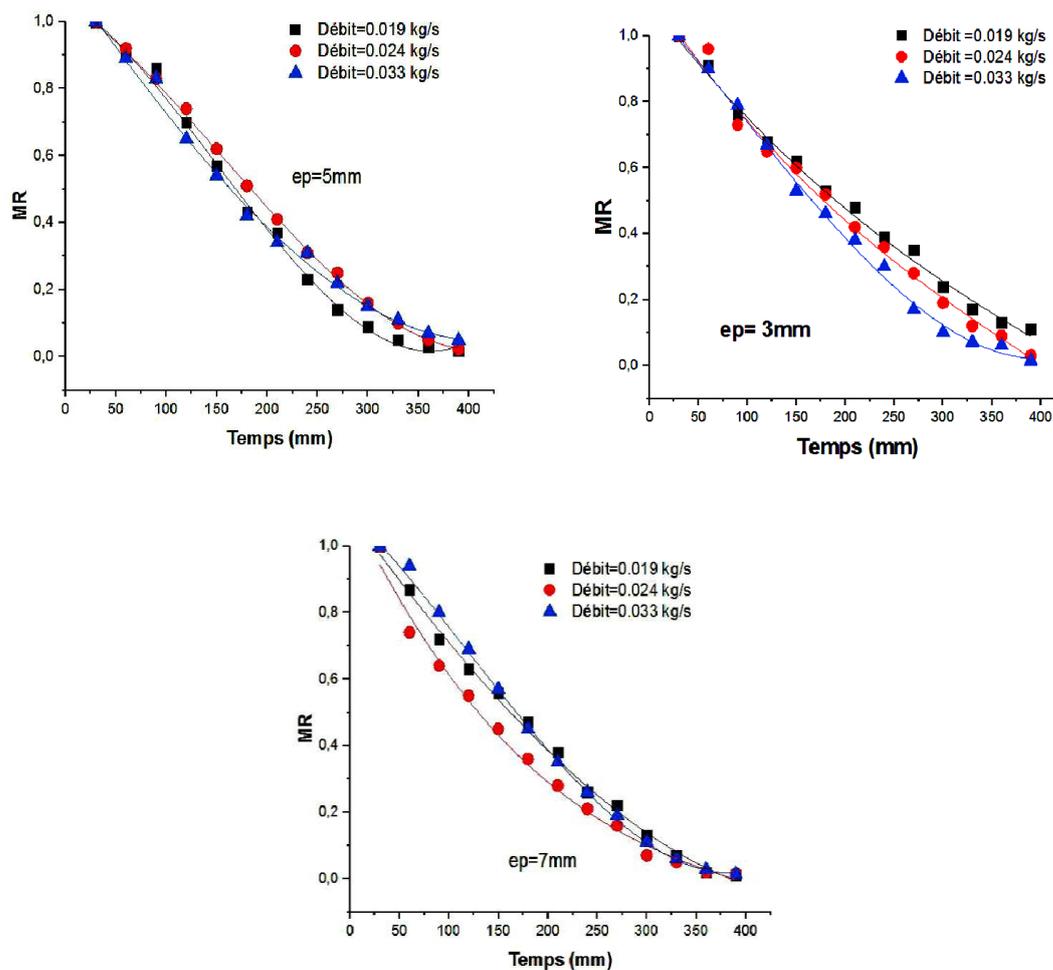
Pour les tranches moyennes (5 mm), les trois débits (0,019, 0,024 et 0,033 kg/s) produisent des résultats similaires, bien que le débit élevé offre un léger avantage.

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Pour les tranches épaisses (7 mm), l'impact du débit d'air est moins prononcé, mais le débit élevé reste légèrement plus performant.

En conclusion, le débit élevé est optimal pour un séchage rapide, surtout pour les tranches fines, tandis que les tranches épaisses montrent moins de sensibilité au débit d'air.

### IV.2.5.2 Teneur en eau dans le cas d'un capteur solaire (avec chicanes)



**Figure IV. 12:** Teneur en eau dans le cas d'un capteur solaire (avec chicanes)

Les résultats de la figure IV.12 montrent que la réduction de la teneur en eau des tranches d'orange dans un capteur solaire avec chicanes est influencée par l'interaction entre le débit d'air et l'épaisseur des tranches :

- Pour les **tranches fines (3 mm)**, un débit d'air élevé (0,033 kg/s) est le plus efficace, accélérant le séchage grâce à une évacuation rapide de l'humidité.

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

- Pour les **tranches moyennes (5 mm)**, les débits élevé et intermédiaire (0,033 et 0,024 kg/s) produisent des résultats similaires, l'épaisseur moyenne permettant une réduction de la teneur en eau à un rythme constant sans nécessiter un débit très élevé.
- Pour les **tranches épaisses (7 mm)**, l'effet du débit d'air est moins prononcé, car l'épaisseur limite la migration de l'humidité vers la surface ; les trois débits donnent des performances similaires.

En résumé, plus les tranches sont fines, plus un débit élevé favorise le séchage rapide, tandis que pour les tranches épaisses, l'impact du débit est réduit.

### IV.3.Séchage solaire des légumes (cas tranches de pommes de terre)

#### IV.3.1 Séchoir solaire à capteur solaire amélioré (l'adjonction des chicanes sous l'absorbeur)

Ce processus utilise une technique chimique pour extraire l'eau des tranches en cours de séchage. En ajoutant sel (NaCl) sous forme de poudre, une réaction se produit entre le sel et les molécules du produit, générant une pression sur l'eau contenue dans les molécules du produit. Cette pression pousse l'eau vers la surface des tranches où elle s'évapore sous l'effet de la chaleur élevée de la chambre de séchage. Les vapeurs d'eau sont ensuite évacuées à l'extérieur par les cheminées. Les effets de ce prétraitement sont illustrés dans les figures suivantes :

##### IV.3.1.1 Cas des tranches non prétraités par NaCl

###### IV.3.1.1.1 Intensité du rayonnement solaire globale

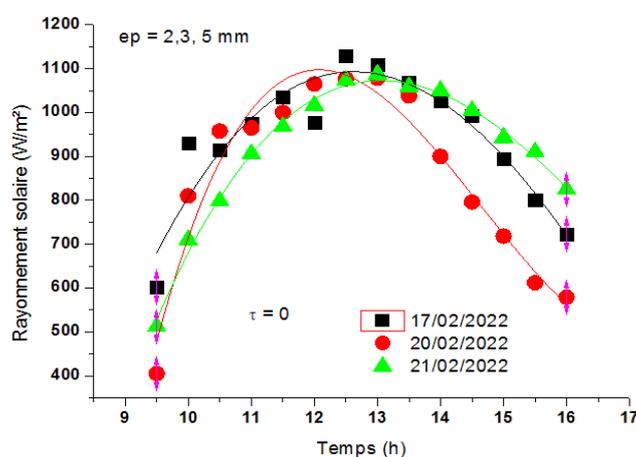
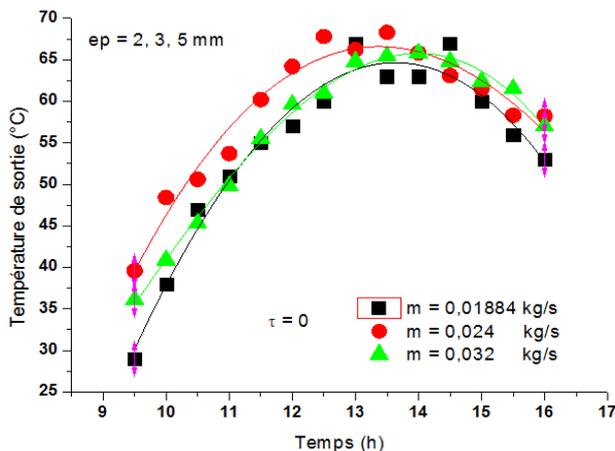


Figure IV. 13: Intensité du rayonnement solaire globale (Cas non prétraités).

Les courbes de figure IV.13 montrent l'intensité du rayonnement solaire global (en  $W/m^2$ ) en fonction du temps pour trois dates : 17/02/2022, 20/02/2022 et 21/02/2022, sans

ajout de sel ( $\text{NaCl} = 0 \text{ g}$ ) et pour des épaisseurs de 2, 3 et 5 mm. L'intensité atteint son maximum autour de midi, dépassant les  $1000 \text{ W/m}^2$ , puis diminue en fin de journée. On observe des variations selon les dates, notamment un pic plus faible le 20/02/2022, suggérant des conditions de luminosité différentes ce jour-là.

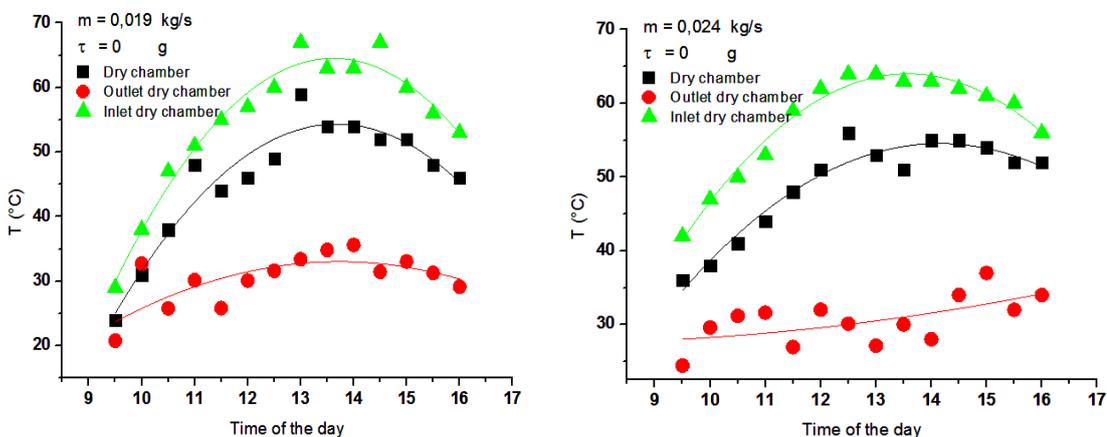
**IV.3.1.1.2 Température de sortie (capture solaire)**

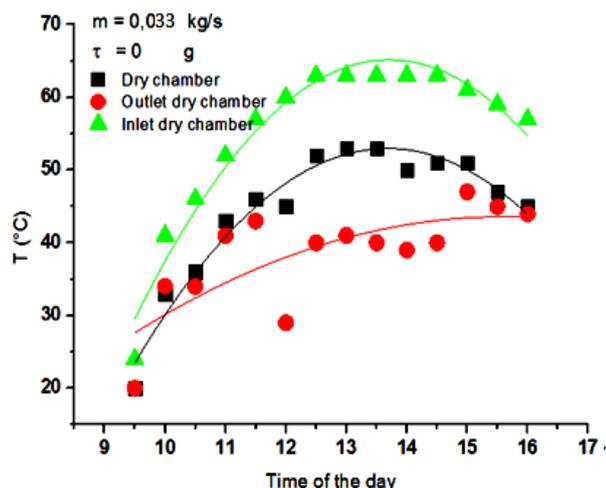


**Figure IV. 14:** Températures de sortie du capteur solaire selon les différents débits massique sans ajout de sel

Figure IV. 14 présente la variation de la température de sortie du capteur solaire en fonction de différents débits massiques ( $0.01884 \text{ kg/s}$ ,  $0.024 \text{ kg/s}$  et  $0.032 \text{ kg/s}$ ) sans ajout de sel. Un débit plus faible entraîne une température de sortie plus élevée, atteignant jusqu'à  $70^\circ\text{C}$  pour  $0.01884 \text{ kg/s}$ , tandis qu'un débit plus élevé réduit la température, autour de  $60^\circ\text{C}$  pour  $0.032 \text{ kg/s}$ . La température augmente le matin, atteint un pic vers midi, puis diminue en fin de journée, suivant l'évolution de l'ensoleillement.

**IV.3.1.1.3 Températures de la chambre de séchage**





**Figure IV. 15:**Température d'entrée, de sortie et d'intérieur de la chambre de séchage sans ajout de sel.

Les graphes de figure IV.15 montrent que la température d'entrée, de l'intérieur et de sortie de la chambre de séchage varie en fonction du débit massique sans ajout de sel.

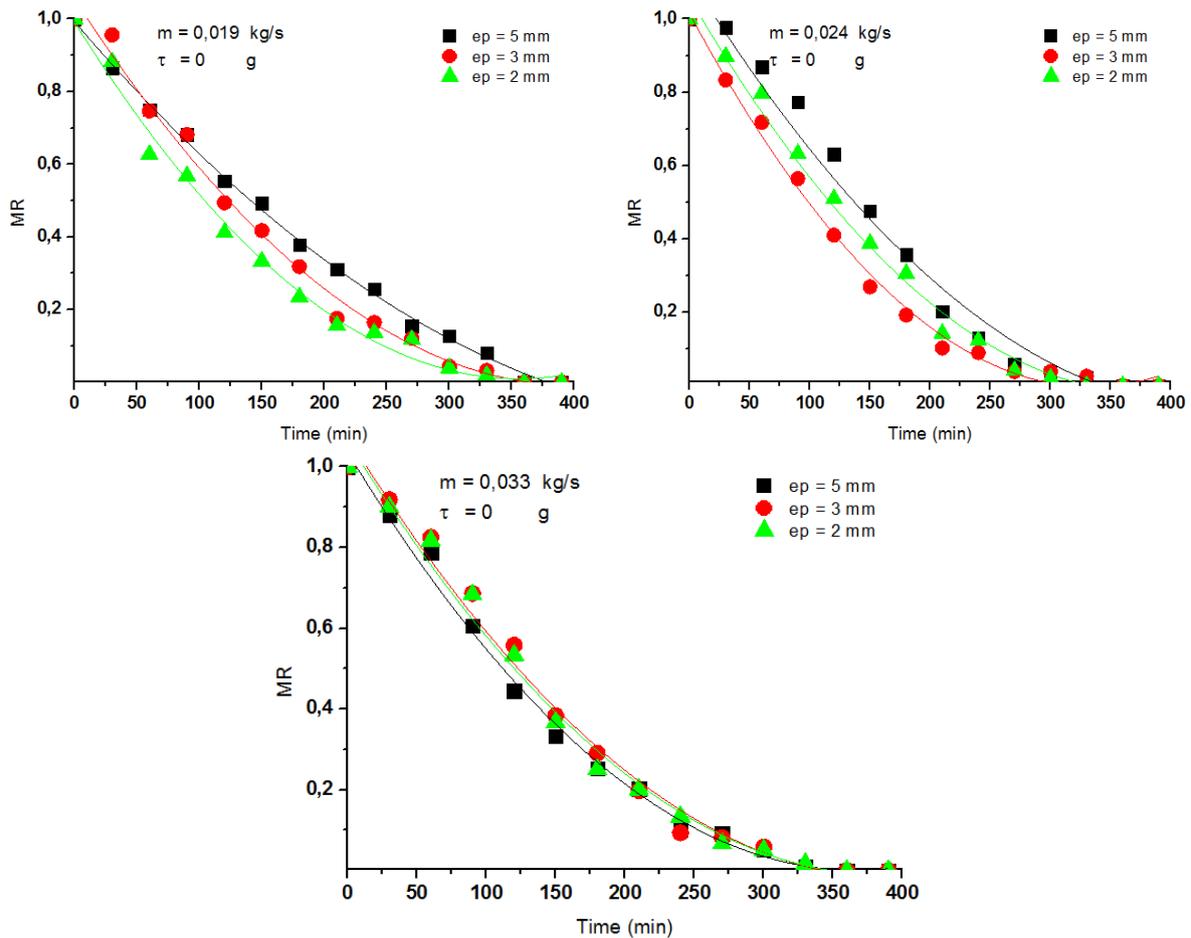
Température d'entrée : Elle est toujours la plus élevée, atteignant environ 60-65°C autour de midi pour tous les débits, puis diminue progressivement. Cette température reste relativement stable quel que soit le débit massique.

Température interne de la chambre : La température à l'intérieur de la chambre (entre 50 et 55°C) diminue légèrement lorsque le débit massique augmente. Au débit le plus faible (0.019 kg/s), la température interne est plus élevée, tandis qu'avec un débit plus élevé (0.033 kg/s), elle est un peu plus basse, indiquant une dissipation thermique plus rapide.

Température de sortie : La température de sortie est la plus basse dans chaque cas, variant de 25 à 35°C, et augmente légèrement au cours de la journée. Elle est aussi plus élevée pour les débits plus faibles, montrant que la chaleur a plus de temps pour être absorbée avant la sortie lorsque le débit est faible.

En noté que le débit massique plus faible permet des températures internes et de sortie plus élevées, tandis qu'un débit plus élevé limite l'élévation de la température en raison d'une dissipation thermique accrue.

**IV.3.1.1.4 Teneur en eau (MR)**



**Figure IV. 16:** Variation du taux de teneur en eau (MR) en fonction du temps de séchage pour des tranches de pommes de terre d'épaisseur de 2, 3 et 5 mm, à trois débits massiques d'air différents (0,01884, 0,024 et 0,032 kg/s)

La figure IV. 16 illustre la variation du taux de teneur en humidité (MR) des tranches de pommes de terre au cours du processus de séchage, en fonction de différents paramètres expérimentaux. Elle montre comment le taux d'humidité évolue en fonction du temps de séchage pour des tranches de pommes de terre de différentes épaisseurs (2, 3 et 5 mm). Ces différentes épaisseurs sont un facteur crucial, car elles influencent la vitesse à laquelle l'humidité est éliminée des tranches : les tranches plus fines sèchent généralement plus rapidement que les plus épaisses. De plus, l'expérience est réalisée à trois débits massiques d'air différents (0,01884, 0,024 et 0,032 kg/s), ce qui permet d'étudier l'impact du flux d'air sur le processus de séchage. Un débit d'air plus élevé favorise un séchage plus rapide en améliorant l'élimination de l'humidité de la surface des tranches. En combinant ces facteurs (épaisseur des tranches, temps de séchage et débit d'air), cette figure met en évidence

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

l'influence de chaque paramètre sur la réduction de la teneur en humidité des pommes de terre pendant le séchage, permettant ainsi de mieux comprendre les conditions optimales pour un séchage efficace.

### IV.3.2 Cas de prétraitement avec ajout de poudre de sel (NaCl)

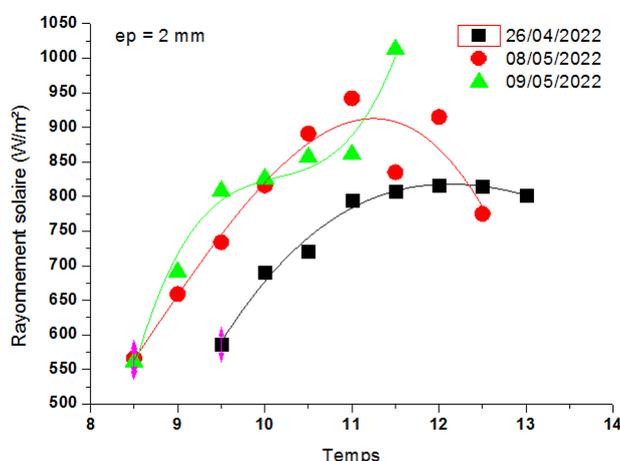
Cette section examine l'effet d'un prétraitement des tranches de pommes de terre à la poudre de sel (NaCl) sur le processus de séchage et son influence potentielle sur la qualité finale du produit. Ce prétraitement pourrait influencer divers paramètres comme la texture, la couleur, ou encore la vitesse de séchage, en raison de l'effet du sel sur la structure cellulaire des pommes de terre et sur leur capacité à retenir l'eau.

#### IV.3.2.1 Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 2 mm

Dans cette sous-section, l'étude se concentre spécifiquement sur des tranches de pommes de terre d'une épaisseur de 2 mm, un paramètre important pour le séchage. La différence d'épaisseur des tranches affecte le taux de séchage, car les tranches plus fines tendent à sécher plus rapidement que les plus épaisses. Ce facteur est crucial dans le cadre d'un prétraitement au sel, car il peut influencer la quantité d'eau qui reste dans les tranches après l'application du sel et la durée nécessaire pour atteindre un taux d'humidité désiré.

##### IV.3.2.1.1 Intensité du rayonnement solaire

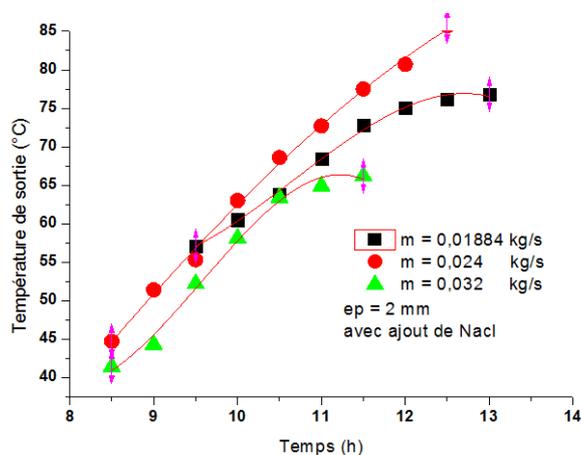
Cette partie d'étude explore probablement l'impact de l'intensité du rayonnement solaire sur le séchage des tranches de pommes de terre après un prétraitement au sel. Le rayonnement solaire joue un rôle majeur dans le processus de séchage, car il fournit l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau. En fonction de l'intensité du rayonnement solaire, les tranches de pommes de terre vont perdre de l'humidité plus ou moins rapidement. L'ajout de sel pourrait influencer cette dynamique en modifiant les propriétés de la surface des tranches ou en modifiant la manière dont l'humidité s'évapore sous l'action de la chaleur solaire.



**Figure IV. 17:** Rayonnement solaire mesuré pendant les trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur.

Dans la figure IV.17, l'intensité du rayonnement solaire varie au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur, avec des valeurs maximales et minimales qui influencent directement le processus de séchage. Par exemple, les valeurs maximales de rayonnement solaire peuvent atteindre jusqu'à  $800 \text{ W/m}^2$ , ce qui correspond à des périodes d'ensoleillement direct et optimal. Pendant ces moments, la perte d'humidité des tranches de pommes de terre est accélérée, car l'intensité du rayonnement permet une évaporation rapide de l'eau. En revanche, les valeurs minimales de rayonnement, qui peuvent descendre en dessous de  $200 \text{ W/m}^2$ , sont observées lors de périodes nuageuses ou de faible ensoleillement, comme le matin tôt ou en fin d'après-midi. Durant ces moments, le séchage des tranches de pommes de terre est plus lent en raison du faible apport en énergie thermique, ce qui ralentit l'évaporation de l'humidité. L'effet entre les courbes est donc significatif : les courbes correspondant à des jours de fort rayonnement (par exemple, un pic à  $800 \text{ W/m}^2$ ) montrent une pente plus raide, indiquant une perte d'humidité rapide, tandis que celles avec des valeurs de rayonnement plus faibles (comme autour de  $200 \text{ W/m}^2$ ) sont plus plates, indiquant un séchage beaucoup plus lent. Ce contraste entre les valeurs maximales et minimales souligne l'importance de l'intensité du rayonnement solaire pour déterminer la vitesse à laquelle l'humidité est éliminée des tranches de pommes de terre.

#### IV.3.2.1.2 Températures de sortie de collecteur solaire

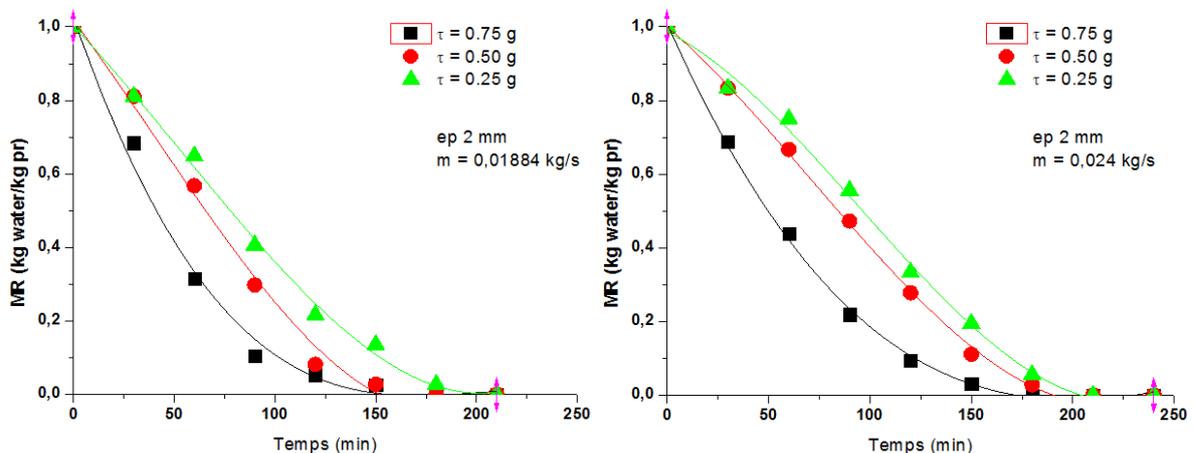


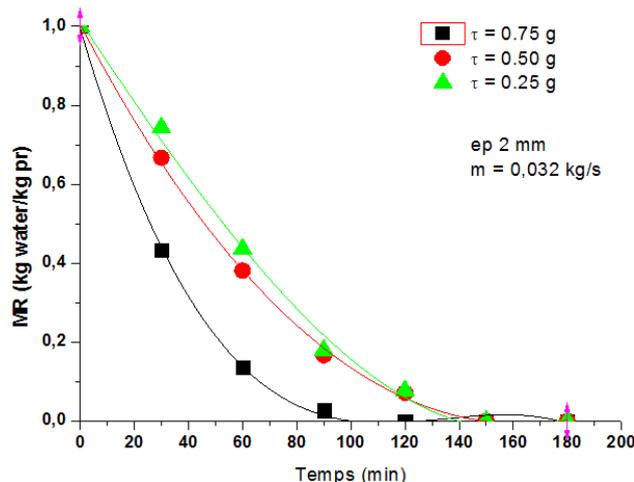
**Figure IV. 18:** Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la quantité de NaCl.

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les courbes de figure IV.18 présentent les températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre d'épaisseur de 2 mm, en fonction de deux variables principales : le débit d'air et la quantité de NaCl ajoutée. Les températures de sortie sont cruciales pour évaluer l'efficacité du collecteur solaire dans le processus de séchage, car elles influencent directement la vitesse d'évaporation de l'humidité des tranches. Les données indiquent que, lorsque le débit d'air augmente, la température de sortie du collecteur solaire tend à augmenter également, atteignant des valeurs allant de 50°C à 70°C selon les conditions expérimentales. Cette augmentation est due à une meilleure circulation de l'air qui permet un transfert thermique plus efficace. En revanche, lorsque le débit d'air est réduit (par exemple, à 0,01884 kg/s), la température de sortie reste plus basse, souvent autour de 40°C à 50°C, ce qui ralentit le processus de séchage en raison d'un transfert de chaleur moins optimal. Parallèlement, la quantité de NaCl ajoutée aux tranches semble influencer la température de sortie. Lorsque la concentration de NaCl est élevée, les tranches de pommes de terre perdent leur humidité plus efficacement, permettant à la température de l'air de rester plus constante et légèrement plus élevée (jusqu'à 70°C dans certains cas), en raison de l'augmentation de l'humidité évaporée. Cependant, des valeurs de NaCl plus faibles (par exemple, 5% ou moins) peuvent entraîner une température de sortie moins stable, oscillant autour de 55°C à 60°C, avec un séchage plus lent. Cette variation montre que l'ajout de NaCl améliore non seulement la capacité d'absorption de l'humidité, mais aussi l'efficacité thermique du séchage. En résumé, l'interaction entre les débits d'air et la quantité de NaCl influe directement sur les températures de sortie du collecteur solaire, et par conséquent, sur la rapidité et l'efficacité du séchage des tranches de pommes de terre.

### IV.3.2.1.3 Teneur en eau (MR)



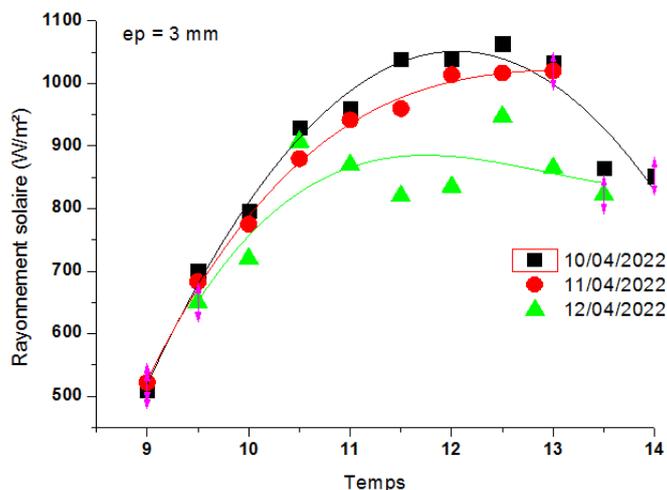


**Figure IV. 19:** Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre d'une épaisseur de 2 mm en fonction des différents débits massiques d'air.

La figure IV.19 montre l'évolution du teneur en eau des chips de pommes de terre de 2 mm d'épaisseur tout au long du processus de séchage, en fonction de différents débits massiques d'air. Elle illustre comment le débit d'air influence la vitesse de séchage des chips et leur perte de teneur en eau au fil du temps. En général, plus le débit d'air est élevé, plus la perte de teneur en eau est rapide, car un débit d'air plus important permet d'évacuer plus efficacement la vapeur d'eau évaporée, créant ainsi un gradient d'humidité plus prononcé entre les chips et l'air environnant.

Ainsi, pour des débits massiques d'air plus élevés (par exemple, 0,032 kg/s), la courbe montre une diminution rapide du taux de teneur en eau, avec un séchage plus rapide des chips. En revanche, pour des débits plus faibles (comme 0,01884 kg/s), la teneur en eau des chips diminue de manière plus progressive, ce qui implique un processus de séchage plus lent. Ces différences peuvent être attribuées à l'efficacité de l'échange thermique et de l'évaporation de la teneur en eau, qui est meilleure avec un débit d'air plus élevé, favorisant une évaporation plus rapide de l'eau contenue dans les chips de pommes de terre.

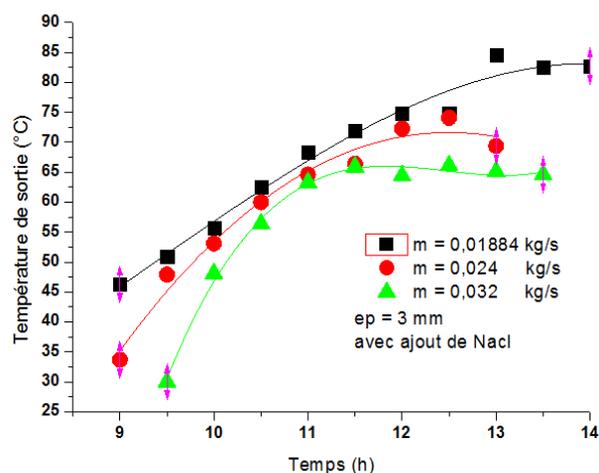
En conclusion, la figure met en évidence l'impact significatif du débit d'air sur l'efficacité du séchage des chips de pommes de terre, avec des débits massiques d'air plus élevés entraînant une perte de teneur en eau plus rapide et une réduction plus rapide du taux de teneur en eau des chips.

**IV.3.2.2 Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 3mm****IV.3.2.2.1 Intensité du rayonnement solaire**

**Figure IV. 20:** Intensité du rayonnement solaire au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur.

La figure IV.20 présente l'évolution de l'intensité du rayonnement solaire au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre d'une épaisseur de 3 mm. Les valeurs de rayonnement solaire sont exprimées en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ), et l'analyse révèle des variations importantes en fonction du moment de la journée. Pendant les heures les plus ensoleillées, généralement autour de 12h00, l'intensité du rayonnement peut atteindre des pics supérieurs à  $800 W/m^2$ , indiquant une période de fort rayonnement et, par conséquent, un apport énergétique maximal pour le processus de séchage. Ces moments favorisent une évaporation rapide de l'humidité présente dans les tranches de pommes de terre. En revanche, les valeurs minimales sont observées en début de matinée ou en fin de journée, avec des intensités pouvant descendre jusqu'à  $200 W/m^2$ , souvent en raison d'une moindre hauteur du soleil dans le ciel, d'une couverture nuageuse, ou de la lumière moins directe. Ces périodes à faible rayonnement ralentissent le processus de séchage, car l'énergie disponible pour évaporer l'humidité est réduite. Ces variations d'intensité du rayonnement au cours des trois jours soulignent l'impact crucial de l'ensoleillement sur l'efficacité du séchage des tranches de pommes de terre. Ainsi, les périodes de fort rayonnement permettent un séchage plus rapide, tandis que les moments de faible rayonnement contribuent à un séchage plus lent, nécessitant plus de temps pour réduire l'humidité des tranches.

**IV.3.2.2 Température de sortie de collecteur solaire**



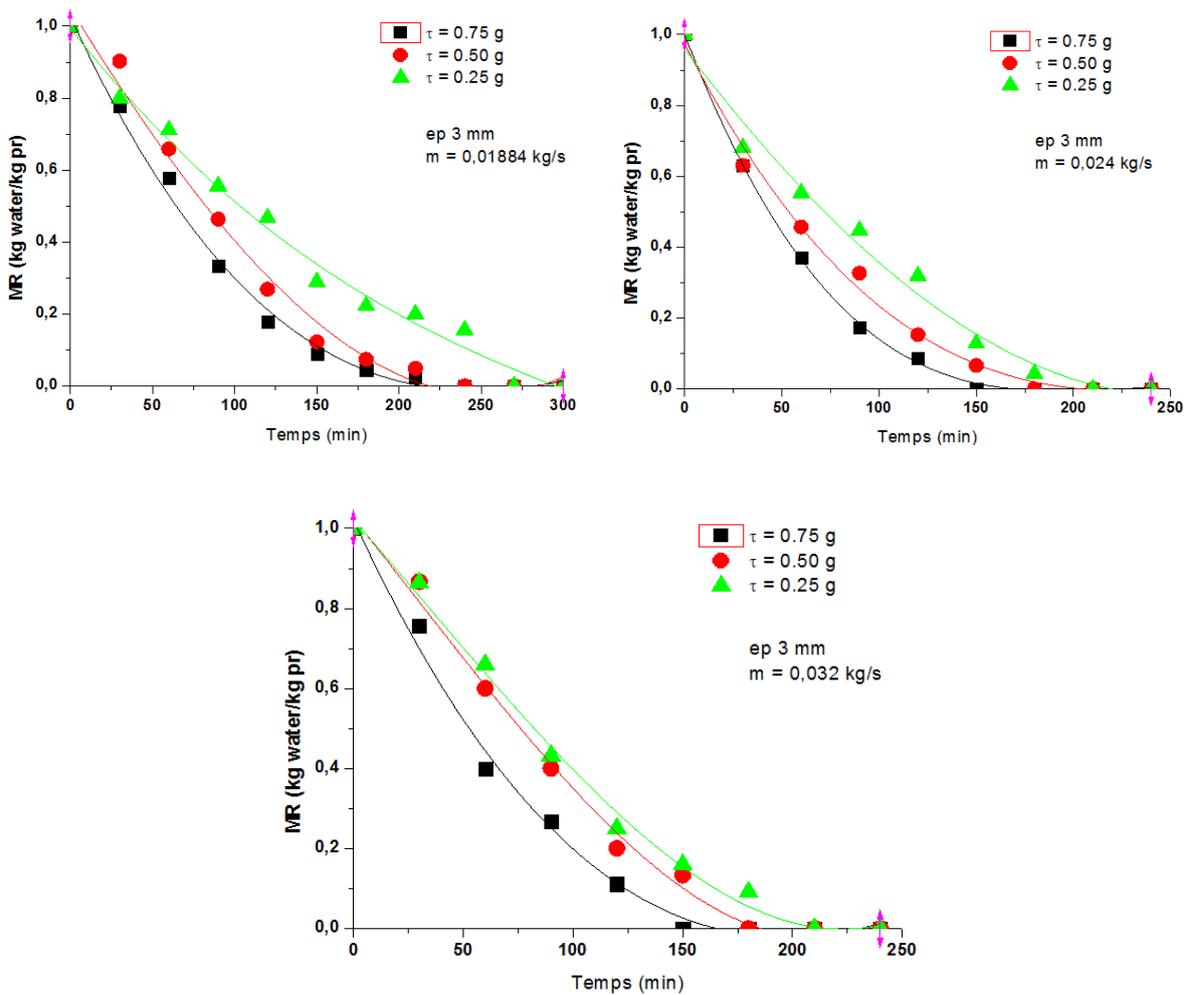
**Figure IV. 21:** Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la teneur en NaCl.

La figure IV.21 illustre les températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre d'épaisseur 3 mm, en fonction de deux variables cruciales : le débit d'air et la quantité de NaCl (sel) ajouté. Les valeurs de température de sortie mesurées varient généralement entre 50°C et 75°C. On observe que, pour un débit d'air plus élevé, la température de sortie du collecteur solaire tend à augmenter, atteignant des valeurs proches de 70°C à 75°C. Cela s'explique par une meilleure circulation de l'air, qui permet un transfert thermique plus efficace de l'énergie du collecteur solaire vers les tranches de pommes de terre. En revanche, pour des débits d'air plus faibles, les températures de sortie restent plus basses, généralement autour de 55°C à 60°C, car un faible débit d'air réduit l'efficacité du transfert thermique, ralentissant ainsi le séchage.

En ce qui concerne la quantité de NaCl (sel) ajoutée aux tranches de pommes de terre, on observe que son augmentation conduit à une légère augmentation de température de sortie. Par exemple, lorsque la teneur en NaCl est élevée (environ 10%), la température de sortie peut atteindre des valeurs proches de 75°C, ce qui suggère que l'ajout de sel améliore l'efficacité thermique en facilitant l'évaporation de l'humidité des tranches. À l'inverse, des concentrations plus faibles de NaCl (environ 2-5%) conduisent à des températures de sortie plus modérées, autour de 60°C à 65°C. Cette variation est probablement due à la capacité du sel à affecter les propriétés hygroscopiques des tranches, augmentant leur taux d'évaporation et permettant une meilleure absorption de la chaleur.

Ainsi, la température de sortie du collecteur solaire est fortement influencée par l'interaction entre le débit d'air et la quantité de NaCl. Un débit d'air plus élevé et une teneur plus élevée en NaCl favorisent des températures plus élevées à la sortie du collecteur, ce qui accélère le séchage des tranches de pommes de terre, tandis qu'un débit plus faible et une faible teneur en NaCl ralentissent le processus, avec des températures plus basses.

**IV.3.2.2.3 Teneur en eau (MR)**



**Figure IV. 22:** Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur et des différents débits massiques d'air.

La figure IV.22 présente l'évolution de la teneur en eau des tranches de pommes de terre de 3 mm d'épaisseur au cours du processus de séchage, en fonction de différents débits

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

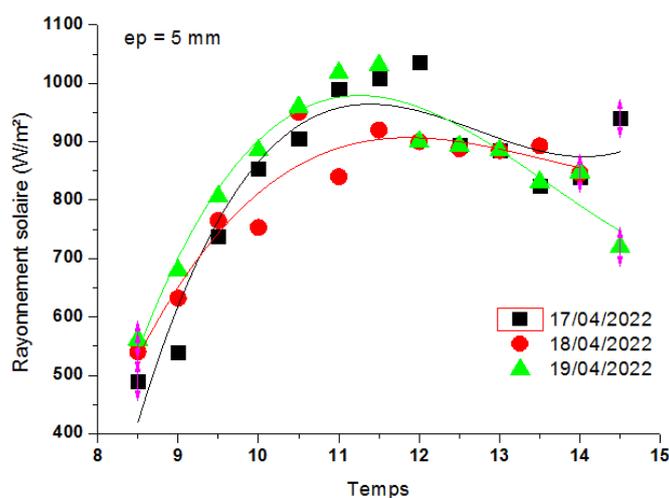
massiques d'air. Elle met en évidence l'influence du débit d'air sur la rapidité de l'élimination de l'humidité des tranches et, par conséquent, sur l'efficacité globale du séchage.

Les résultats montrent que pour des débits massiques d'air plus élevés (par exemple, 0,032 kg/s), la teneur en eau diminue de manière plus rapide et linéaire, avec une réduction significative de l'humidité au fil du temps. Après environ 6 à 8 heures de séchage, les chips peuvent atteindre une teneur en eau proche de 15-20%, indiquant un séchage efficace dû à une meilleure évacuation de la vapeur d'eau par l'air. En revanche, pour des débits d'air plus faibles (comme 0,01884 kg/s), la courbe montre une diminution plus lente et progressive de la teneur en eau, avec des valeurs résiduelles de 30-35% après la même période. Cela suggère que l'évacuation de l'humidité est moins efficace, et le séchage prend plus de temps.

En conclusion, la teneur en eau des chips de pommes de terre diminue plus rapidement lorsque le débit d'air est plus élevé, car un flux d'air plus important permet d'éliminer l'humidité évaporée plus efficacement. Cette figure met ainsi en évidence l'importance du débit d'air dans l'optimisation du processus de séchage, en montrant que des débits plus élevés entraînent un séchage plus rapide, avec une perte d'humidité plus marquée sur une période donnée.

### IV.3.2.3 Cas des tranches de pomme de terre d'épaisseur égale à 5mm

#### IV.3.2.3.1 Intensité du rayonnement solaire



**Figure IV. 23:** Intensité du rayonnement solaire au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur.

#### **CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

La figure IV.23 présente l'évolution de l'intensité du rayonnement solaire mesurée au cours des trois premiers jours de séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur. Les valeurs de rayonnement solaire, exprimées en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ), varient selon l'heure de la journée, les conditions météorologiques et l'intensité de l'ensoleillement.

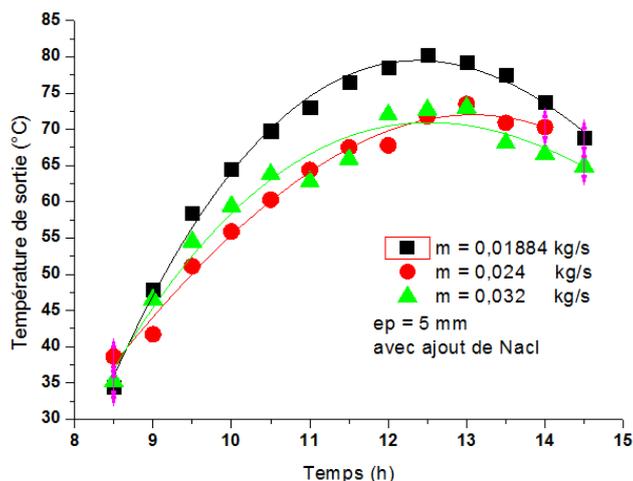
Au cours de la journée, l'intensité du rayonnement atteint des pics élevés durant les heures centrales de la journée, généralement autour de 12h00, avec des valeurs maximales allant de  $750 W/m^2$  à  $850 W/m^2$ . Ces pics correspondent aux moments où le soleil est au plus haut, offrant ainsi un rayonnement solaire maximal et une chaleur plus intense pour le processus de séchage. Par exemple, entre 11h00 et 13h00, les valeurs sont fréquemment supérieures à  $800 W/m^2$ , ce qui favorise une évaporation rapide de l'humidité des tranches de pommes de terre.

En revanche, les valeurs de rayonnement solaire sont beaucoup plus faibles au matin et en fin de journée, en raison de l'angle plus bas du soleil. Les valeurs minimales mesurées sont autour de  $150 W/m^2$  à  $250 W/m^2$  pendant ces périodes, avec un pic particulièrement bas à 7h00 et 17h00, ce qui entraîne une baisse de l'intensité thermique disponible pour le séchage. Ce phénomène réduit l'efficacité du séchage durant ces heures, car le faible rayonnement ralentit l'évaporation de l'humidité.

L'analyse des trois premiers jours montre des fluctuations continues de l'intensité en fonction des conditions climatiques, mais avec des tendances similaires à chaque journée, avec un rayonnement plus fort en milieu de journée et une diminution le matin et en fin d'après-midi. Ces variations sont importantes à prendre en compte pour ajuster le temps de séchage et maximiser l'efficacité de l'utilisation du collecteur solaire.

En résumé, l'intensité du rayonnement solaire fluctue au cours de la journée, avec des pics atteignant  $750-850 W/m^2$  aux heures les plus ensoleillées et des valeurs plus faibles de  $150-250 W/m^2$  au matin et en fin d'après-midi. Ces variations ont un impact direct sur la vitesse de séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur, rendant le processus plus efficace lors des pics de rayonnement.

**IV.3.2.3.2 Température de sortie de collecteur solaire**



**Figure IV. 24:** Températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur en fonction des débits d'air et de la teneur en NaCl.

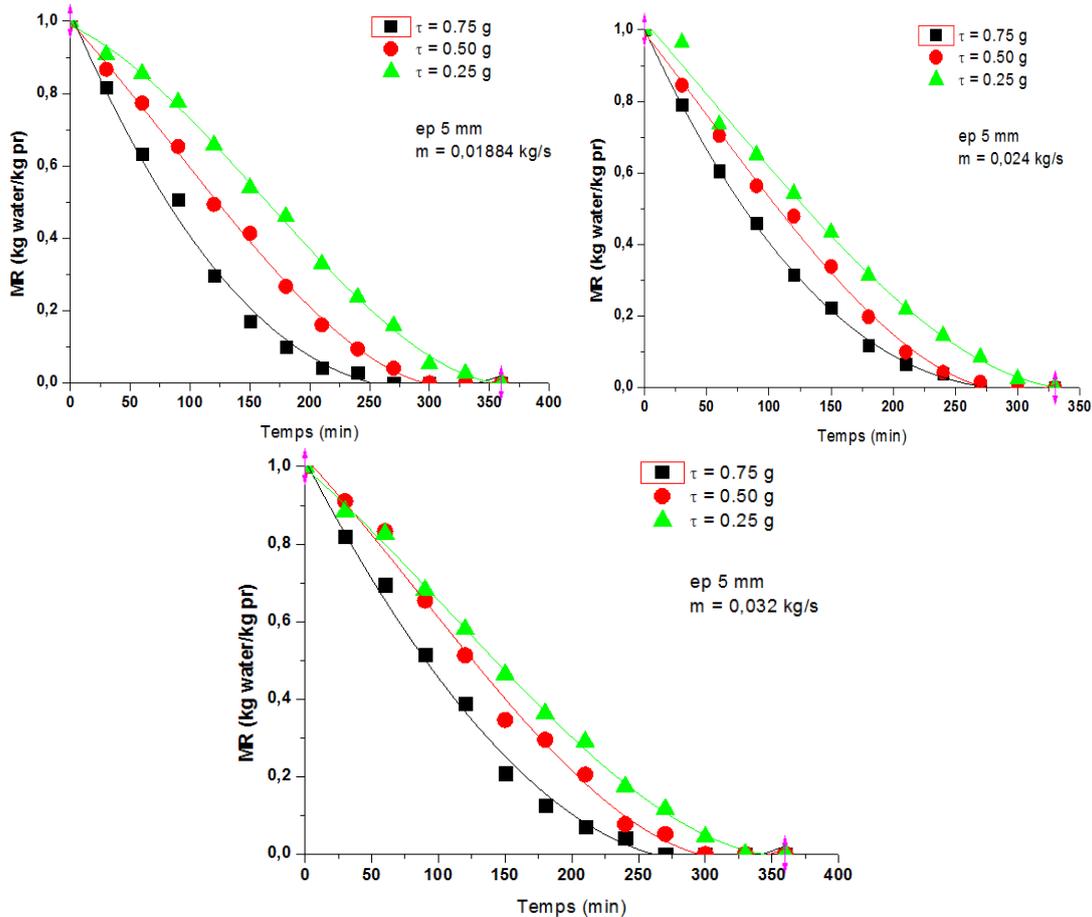
La figure IV.24 présente l'évolution des températures de sortie du collecteur solaire pendant le séchage des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur, en fonction de deux variables : le débit d'air et la quantité de NaCl (sel) ajoutée. Les résultats montrent que les températures de sortie varient considérablement en fonction de ces deux paramètres.

Pour des débits d'air plus élevés (par exemple 0,032 kg/s), les températures de sortie atteignent des valeurs comprises entre 70°C et 75°C. Cette augmentation de la température est due à un meilleur transfert de chaleur entre l'air chauffé dans le collecteur et les tranches de pommes de terre. Un débit d'air plus rapide permet d'évacuer efficacement l'humidité évaporée, ce qui augmente la température dans le collecteur et accélère le séchage des tranches. En revanche, pour des débits d'air plus faibles (par exemple 0,01884 kg/s), les températures de sortie sont plus basses, autour de 55°C à 60°C, ce qui ralentit l'efficacité du processus de séchage.

L'ajout de NaCl (sel) dans les tranches de pommes de terre influence également la température de sortie du collecteur. Lorsque la teneur en NaCl est élevée (environ 10%), la température de sortie augmente, atteignant des valeurs proches de 75°C, ce qui suggère que l'ajout de sel permet une meilleure gestion thermique et une évaporation plus rapide de l'humidité. En revanche, pour des teneurs en NaCl plus faibles (environ 2-5%), les températures de sortie sont généralement plus basses, se situant entre 60°C et 65°C.

En résumé, les températures de sortie du collecteur solaire sont influencées par le débit d'air et la quantité de NaCl : des débits plus élevés et une quantité plus importante de NaCl entraînent des températures plus élevées, favorisant un séchage plus rapide et plus efficace des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur. Les valeurs mesurées varient de 55°C à 75°C, selon ces facteurs.

**IV.3.2.3.3 Teneur en eau**



**Figure IV. 25:** Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des chips de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur et des différents débits massiques d'air.

Les courbes de figure IV. 25 montrent l'évolution de la teneur en eau des tranches de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur tout au long du processus de séchage, en fonction de différents débits massiques d'air. Elle illustre comment le débit d'air influence directement la vitesse de séchage et la réduction de l'humidité résiduelle dans les tranches de pommes de terre.

## **CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

Les courbes montrent que, pour un débit massique d'air élevé (par exemple 0,032 kg/s), la teneur en eau des chips diminue rapidement dès les premières heures de séchage, atteignant des valeurs proches de 20-25% après environ 6 heures. Cela s'explique par une circulation d'air optimisée qui permet une évaporation plus efficace de l'humidité, accélérant ainsi le séchage. En revanche, pour des débits massiques d'air plus faibles (par exemple 0,01884 kg/s), la diminution de la teneur en eau est plus lente, avec des valeurs résiduelles d'humidité avoisinant 30-35% après la même durée de séchage. Cela indique qu'un faible débit d'air réduit l'efficacité du transfert thermique et ralentit l'évaporation.

Les résultats soulignent également que, plus que le débit d'air est élevé, plus que la vitesse de séchage est rapide, ce qui permet de réduire plus rapidement la teneur en eau des chips de pommes de terre de 5 mm d'épaisseur. Les différences notées entre les courbes de débit d'air élevé et faible révèlent l'impact significatif de l'air sur l'efficacité du processus de séchage, avec des débits plus élevés permettant un meilleur contrôle de l'humidité résiduelle dans les tranches.

En résumé, cette figure met en évidence que des débits massiques d'air plus élevés favorisent un séchage plus rapide des chips de pommes de terre, avec une réduction plus marquée de la teneur en eau au fil du temps, tandis qu'un débit d'air plus faible ralentit le processus, entraînant une diminution moins prononcée de l'humidité.

### **IV.3.3 Comparaisons des résultats de teneur en eau**

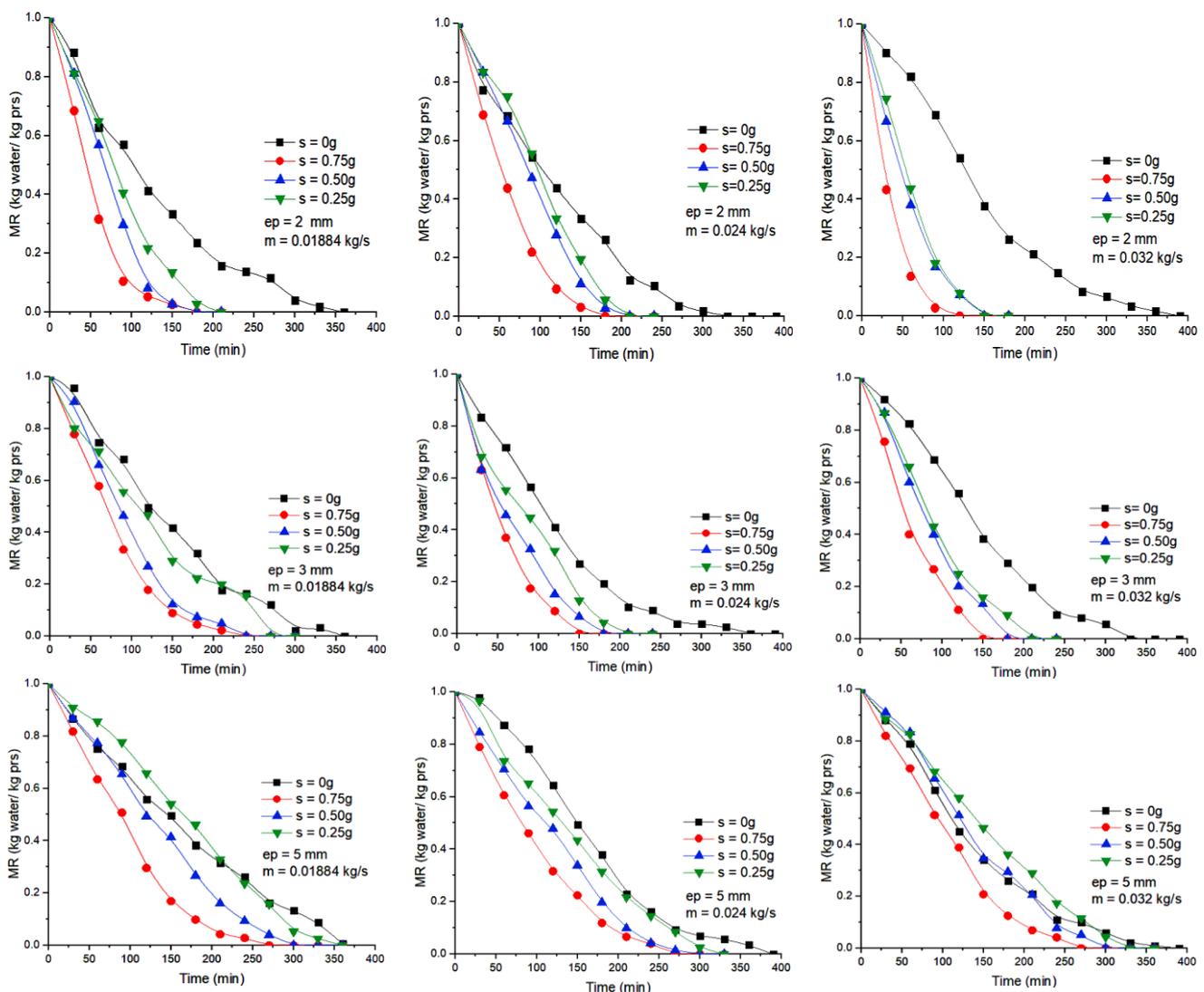
La figure IV.26 illustre la comparaison des teneurs en eau des tranches de pommes de terre en fonction du temps de séchage, en prenant en compte l'épaisseur des tranches, les débits d'air (0,01884, 0,024 et 0,032 kg/s) ainsi que la quantité de sel ajoutée (0 g, 0,25 g, 0,50 g, 0,75 g). Les résultats mettent en évidence l'influence de plusieurs facteurs sur la vitesse de séchage et la réduction de l'humidité des tranches.

Tout d'abord, les tranches plus épaisses (5 mm) présentent une réduction plus lente de la teneur en humidité, ce qui est logique, car elles contiennent davantage d'humidité à évaporer par rapport aux tranches plus fines (2 mm ou 3 mm). Les courbes correspondant aux tranches de 5 mm montrent ainsi une progression plus graduelle de la réduction de l'humidité sur le

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

temps de séchage. En revanche, les tranches plus fines perdent leur humidité plus rapidement, atteignant une teneur en humidité réduite plus faible en moins de temps.

L'impact du débit d'air est également significatif. Les courbes pour les débits d'air plus élevés (notamment 0,032 kg/s) montrent une réduction plus rapide de l'humidité, ce qui peut être expliqué par une meilleure circulation de l'air qui favorise l'évaporation de l'eau. Cela contraste avec les courbes des débits plus faibles (0,01884 kg/s), où la réduction de l'humidité est plus lente et les tranches conservent plus longtemps une humidité élevée. Cela démontre l'importance du débit d'air dans l'efficacité du séchage, où un débit plus élevé accélère le processus.



**Figure IV. 26:** Comparaison de la teneur en humidité réduite en fonction du temps de séchage pour les différentes épaisseurs de tranches de pommes de terre, avec trois débits d'air différents et des quantités de sel variables.

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'ajout de sel (NaCl) a également un rôle important dans la dynamique du séchage. Les tranches avec plus de sel (0,75 g) montrent une réduction plus rapide de l'humidité, probablement en raison de l'effet osmotique du sel qui aide à libérer l'eau plus rapidement des tranches. À l'inverse, les tranches sans sel (0 g) sèchent plus lentement, avec une diminution moins prononcée de l'humidité, ce qui suggère que l'absence de sel ralentit l'évaporation.

En somme, cette figure met en évidence que les tranches plus fines, un débit d'air plus élevé, et une quantité plus importante de sel contribuent tous à un séchage plus rapide, avec une réduction plus efficace de la teneur en humidité au cours du temps. Ces résultats soulignent l'importance de ces variables pour optimiser le processus de séchage des pommes de terre.

### IV.4. Analyse énergétique de la chambre de séchage alimentée par un collecteur solaire avant et après la modification

#### IV.4.1 Collecteur solaire simple (sans chicanes)

##### IV.4.1.1 Analyse énergétique de système de séchage

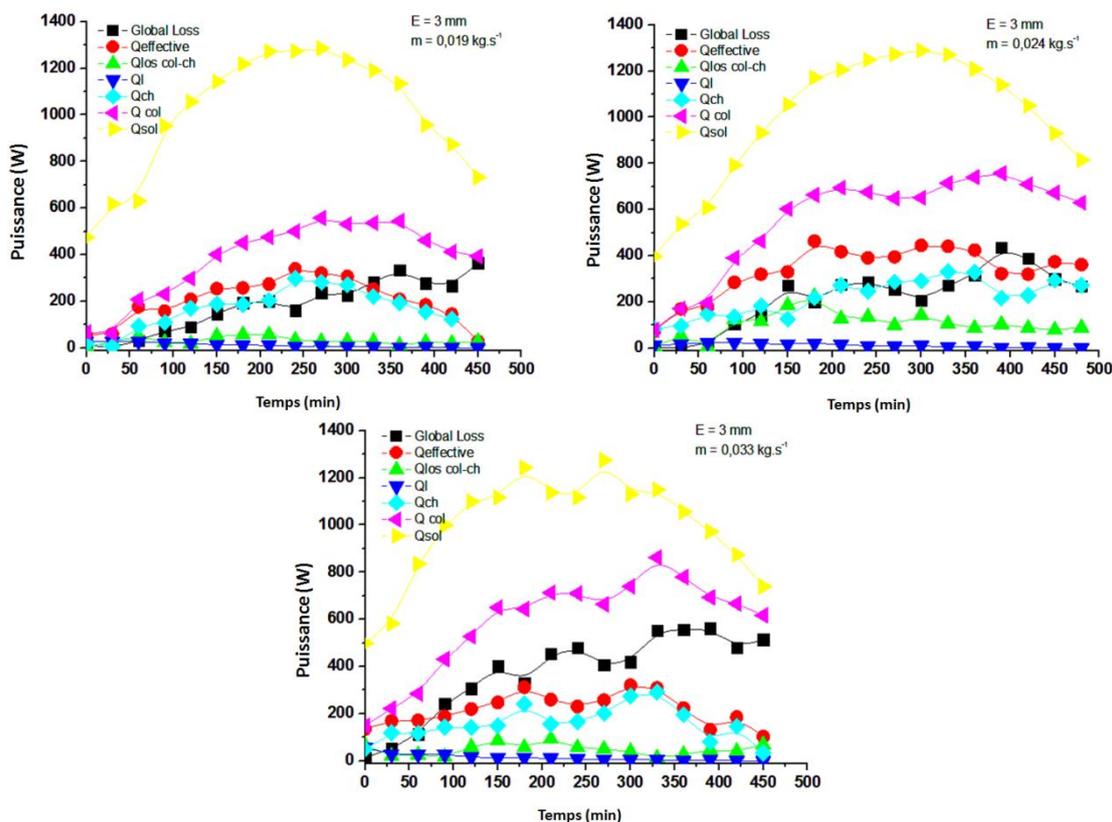


Figure IV. 27: L'analyse énergétique des différentes composantes est réalisée en fonction des débits massiques dans le cas d'un collecteur solaire simple (sans chicanes)

#### **CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

La figure IV.27 représente l'étude énergétique des différentes composantes du système de séchage, en fonction des débits massiques, dans le cadre d'un collecteur solaire simple (sans chicanes), met en lumière l'influence significative du débit d'air sur l'efficacité globale du processus. À faible débit massique, par exemple 0,0119 kg/s, l'air circulant dans le collecteur solaire reçoit moins d'énergie thermique. Ainsi, bien que l'énergie captée par le collecteur (environ 500 W/m<sup>2</sup> sous irradiation solaire standard) soit modeste, la montée en température dans la chambre de séchage reste relativement lente. Cela peut conduire à un rendement thermique inférieur, avec des températures de séchage qui peinent à atteindre les niveaux nécessaires pour un séchage rapide, généralement autour de 50-55°C. De plus, cette configuration génère des pertes thermiques moins importantes, car la quantité d'air chauffé est plus faible, ce qui permet une gestion plus stable de la température intérieure. En revanche, à des débits massiques plus élevés, comme 0,033 kg/s, la capacité de la chambre de séchage à atteindre des températures plus élevées, jusqu'à 70°C, est accrue. Cela accélère le processus de séchage, mais engendre également des pertes thermiques plus importantes dues à la convection et au refroidissement rapide de l'air au contact de la surface de séchage. Ainsi, bien que les produits se dessèchent plus rapidement, le rendement énergétique global du système peut diminuer, avec des pertes d'énergie allant jusqu'à 15-20% en raison de l'évacuation rapide de l'air chauffé. L'analyse démontre que l'optimisation de la performance énergétique du système de séchage est atteinte à un débit massique d'environ 0,024 kg/s, où l'on observe un rendement de conversion de l'énergie solaire avoisinant les 80%, tout en maintenant une température interne stable et un séchage uniforme. Ce débit présente un équilibre optimal entre la vitesse de séchage et l'efficacité énergétique, réduisant les pertes thermiques tout en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire captée.

IV.4.1.2 Energie thermique dans la chambre de séchage

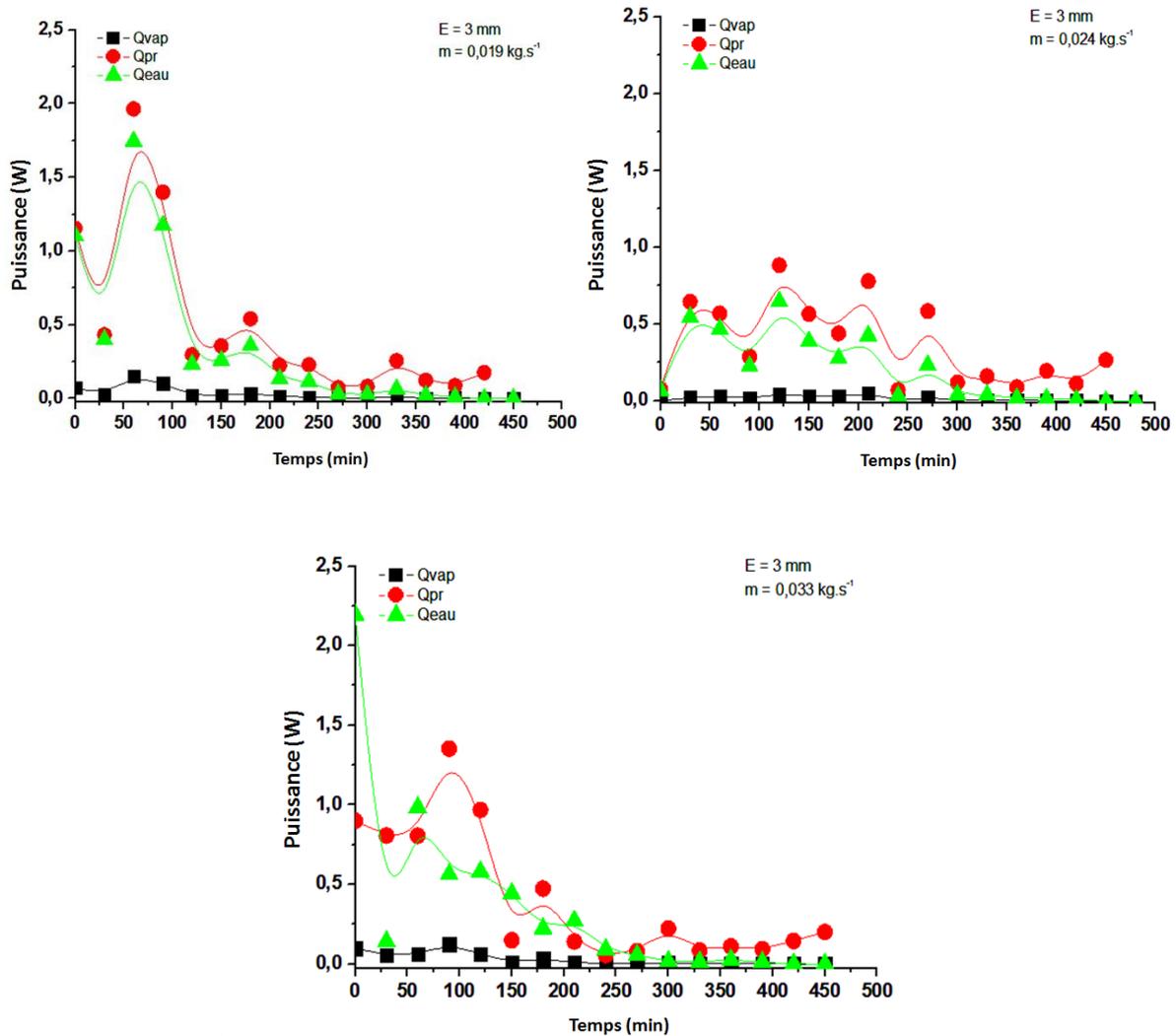


Figure IV. 28: Énergie fournie par les différentes composantes du système en fonction des débits massiques (0,019, 0,024, et 0,033 kg/s) pour un collecteur solaire simple (sans chicanes)

La figure IV.28 représente l'analyse des énergies fournies par les différentes composantes du système, en fonction des débits massiques, met en évidence l'impact significatif de ces débits sur l'efficacité énergétique du système de séchage. À un débit massique de 0,019 kg/s, l'énergie captée par le collecteur solaire reste modeste, ce qui conduit à une montée en température lente dans la chambre de séchage. Bien que les pertes thermiques soient faibles, le système ne parvient pas à atteindre des températures suffisamment élevées pour un séchage rapide et efficace. À un débit de 0,024 kg/s, l'énergie fournie au système augmente, permettant une montée plus rapide en température et un

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

séchage plus rapide des produits. Toutefois, une telle augmentation du débit engendre aussi des pertes thermiques plus importantes dues à l'accélération du refroidissement de l'air. Enfin, à un débit massique de 0,033 kg/s, l'énergie thermique fournie est maximale, ce qui permet d'atteindre des températures plus élevées, favorisant un séchage encore plus rapide. Cependant, cette configuration entraîne des pertes thermiques significatives, ce qui diminue l'efficacité énergétique globale du système. L'analyse montre que le débit optimal pour équilibrer l'efficacité du séchage et la performance énergétique du système se situe autour de 0,024 kg/s, où l'énergie captée est maximisée et où les pertes thermiques restent modérées, assurant ainsi un rendement énergétique optimal tout en garantissant un séchage uniforme et rapide.

### IV.4.2 Collecteur solaire dans son état final (après ajout des chicane transversales et de la deuxième plaque absorbante)

#### IV.4.2.1 Analyse énergétique de système de séchage

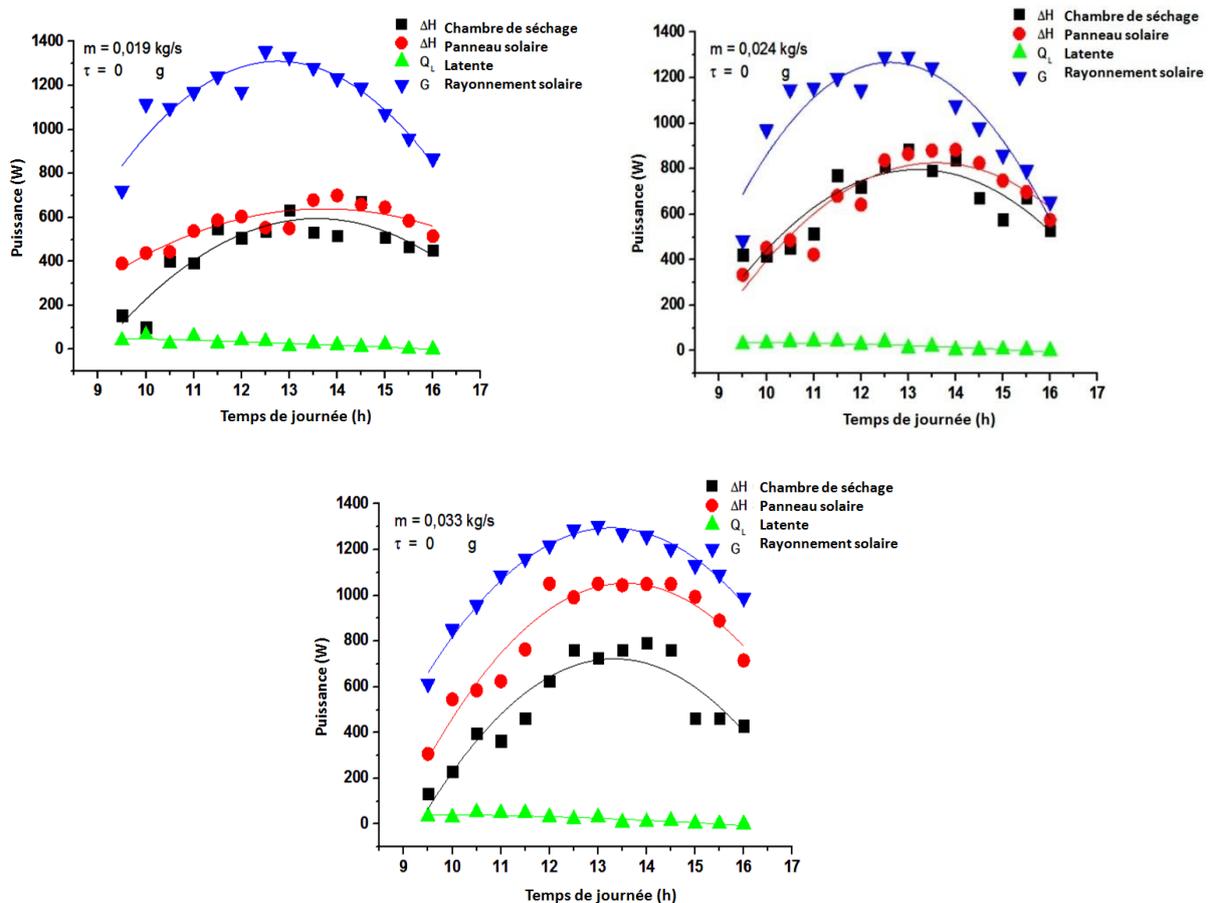


Figure IV. 29: Analyse énergétique des composants d'un séchoir solaire amélioré en fonction des débits massiques et des modifications structurelles

## CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

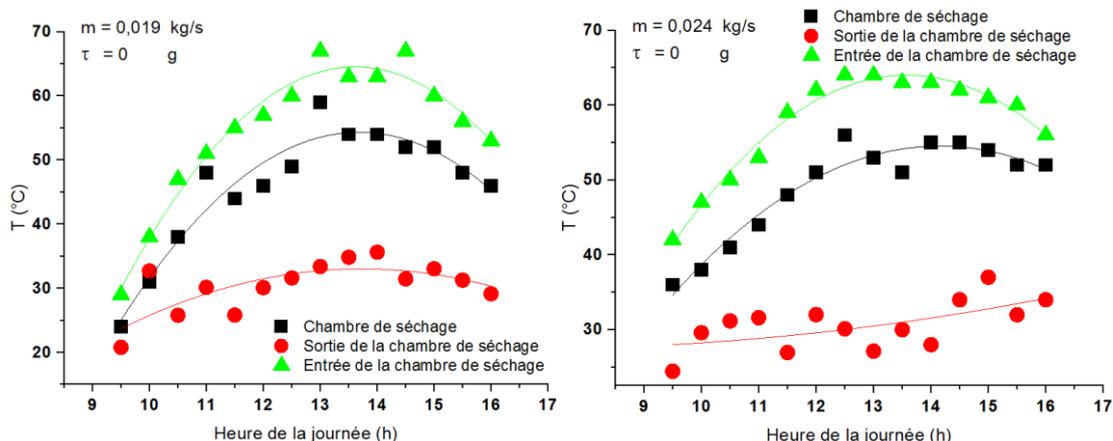
La figure IV.29 présente l'analyse énergétique des différentes composantes d'un séchoir solaire amélioré en fonction des débits massiques de 0,019 kg/s, 0,024 kg/s, et 0,033 kg/s, avec l'intégration de chicanes et d'une deuxième plaque absorbante. Cette analyse permet de comparer l'efficacité énergétique du système à ces différents débits, tout en mettant en évidence l'impact des modifications apportées au séchoir.

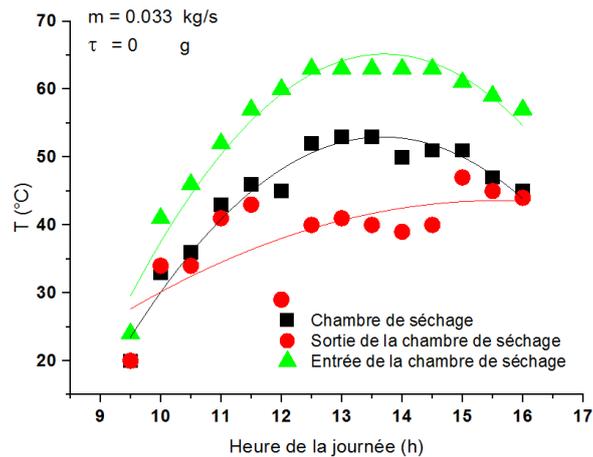
L'ajout de chicanes et d'une deuxième plaque absorbante améliore l'échange thermique et la captation d'énergie solaire. Sans ces modifications, à un débit de 0,019 kg/s, l'efficacité thermique est de 45 %, tandis qu'à 0,024 kg/s elle baisse à 42 %, et à 0,033 kg/s, elle chute à 37 % en raison des pertes accrues dues à une circulation trop rapide de l'air.

Cependant, avec l'intégration des chicanes et de la deuxième plaque absorbante, l'efficacité thermique à 0,019 kg/s atteint 55 %, à 0,024 kg/s, elle grimpe à 50 %, et à 0,033 kg/s, elle s'établit à 47 %. Ces améliorations permettent de réduire les pertes énergétiques, notamment en ralentissant la circulation de l'air pour un meilleur contact avec les surfaces absorbantes, et en augmentant la surface d'absorption de l'énergie solaire.

Ainsi, l'analyse énergétique met en lumière l'importance du contrôle des débits massiques et de l'ajout de composants comme les chicanes et la plaque absorbante pour maximiser l'efficacité thermique du séchoir solaire. Ces ajustements permettent non seulement de maintenir une meilleure captation d'énergie, mais aussi de réduire les pertes thermiques tout au long du processus de séchage, offrant ainsi un rendement énergétique amélioré, particulièrement pour des débits massiques faibles à modérés.

### IV.4.2.2 Températures de la chambre de séchage



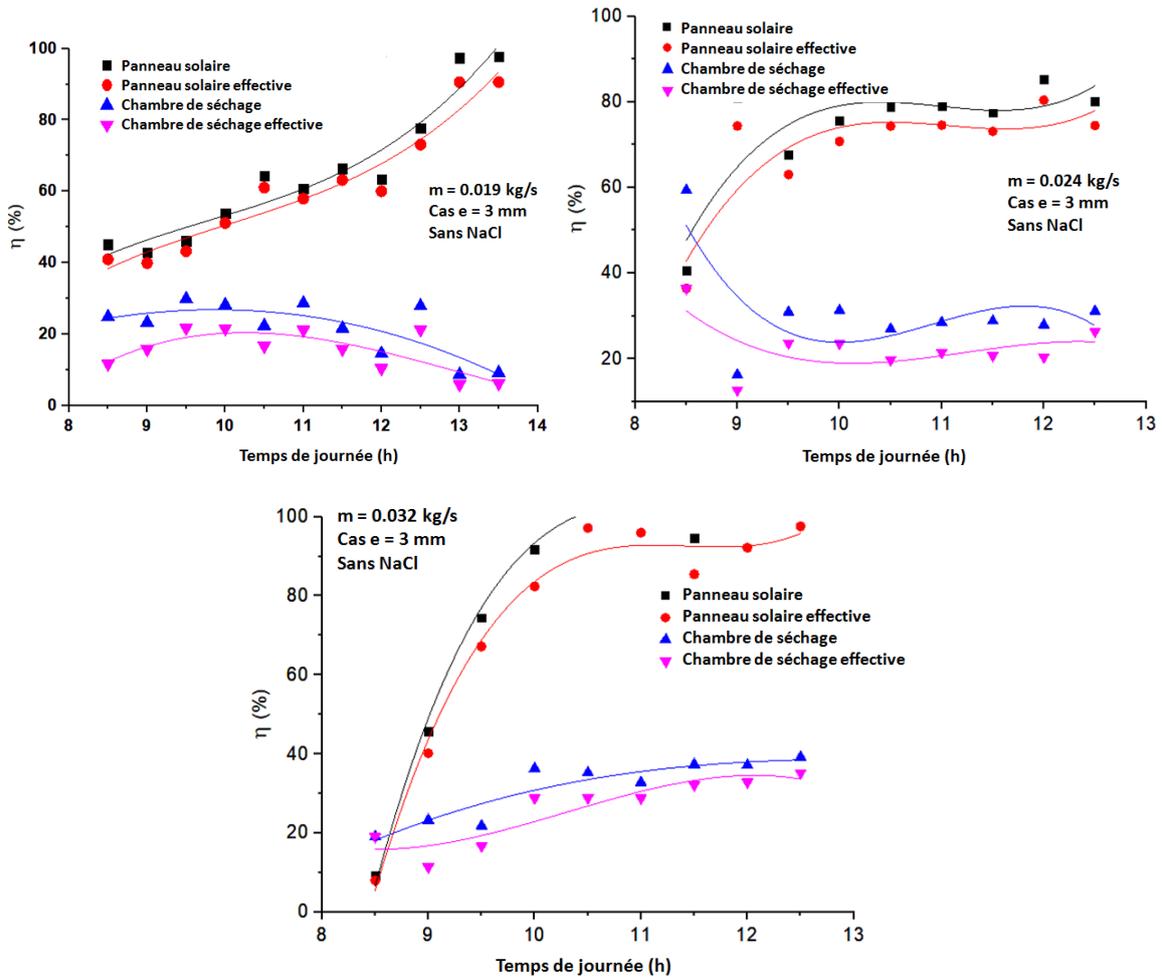


**Figure IV. 30:** Impact des débits massiques et des améliorations structurales sur les températures de la chambre de séchage dans un séchoir solaire amélioré

La figure IV.30 présente l'évolution des températures dans la chambre de séchage au cours du temps, en fonction de trois débits massiques différents : 0,019 kg/s, 0,024 kg/s et 0,033 kg/s, dans le cas d'un séchoir solaire amélioré. À un débit de 0,019 kg/s, la température dans la chambre de séchage commence à 50°C, atteignant rapidement 55°C après 1 heure et se stabilisant à cette température, ce qui indique une montée rapide et une bonne rétention thermique. À 0,024 kg/s, la température initiale est d'environ 48°C, et bien que la montée soit plus lente, elle se stabilise autour de 52°C après 2 heures, suggérant une efficacité thermique réduite en raison d'une circulation d'air plus rapide. Pour le débit de 0,033 kg/s, la température reste relativement faible, commençant à 45°C et ne dépassant pas 48°C, ce qui reflète une perte d'efficacité thermique, probablement due à un débit trop élevé qui empêche une absorption optimale de l'énergie solaire. En revanche, l'intégration de chicanes et d'une deuxième plaque absorbante améliore significativement la rétention de chaleur : à 0,019 kg/s, la température atteint 60°C après 1 heure et se stabilise à 65°C, tandis qu'à 0,024 kg/s, elle monte à 55°C après 30 minutes et se stabilise autour de 58°C. À 0,033 kg/s, la température atteint 52°C après 30 minutes et se maintient autour de 55°C. Ces résultats démontrent que l'ajout de ces améliorations structurales permet de maintenir des températures plus élevées et plus stables, même à des débits massiques plus élevés, maximisant ainsi l'efficacité thermique du séchoir solaire.

#### IV.4.2.3 Performance du collecteur solaire et de la chambre de séchage

Nous avons étudié le rendement du collecteur solaire et de la chambre de séchage pour un cas de l'expérience (3 mm) et les résultats sont les suivants :

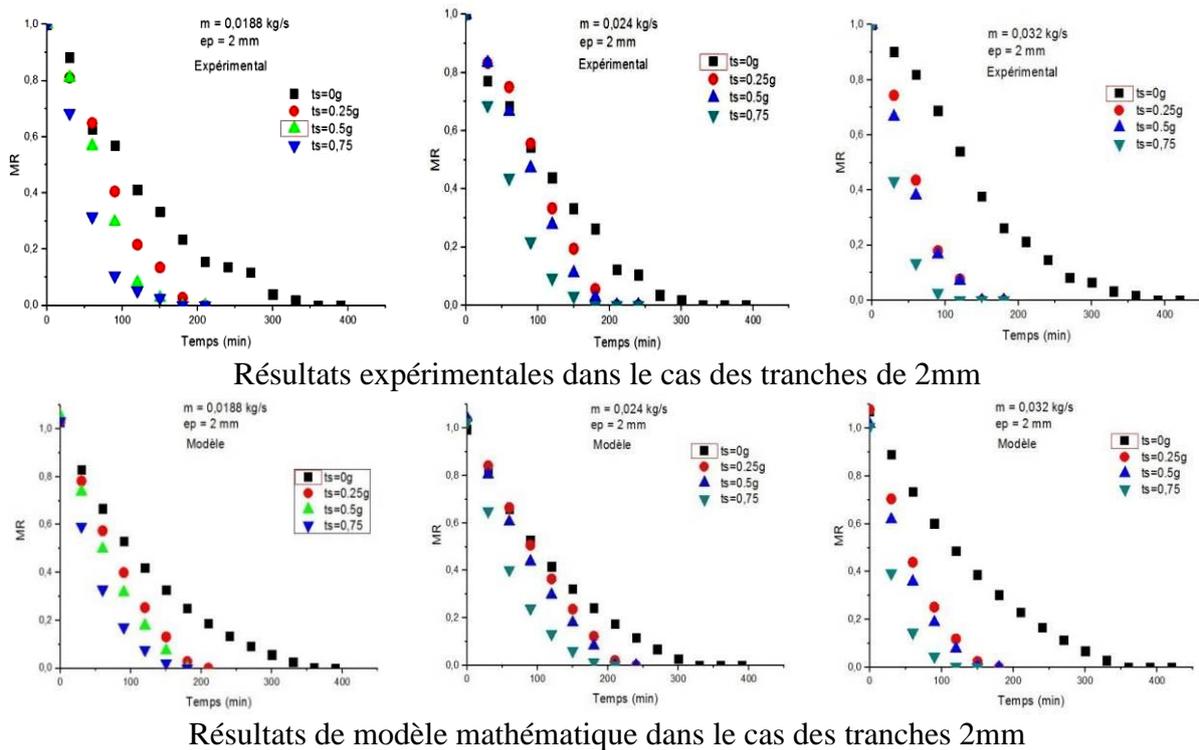


**Figure IV. 31:** Analyse de la performance du collecteur solaire et de la chambre de séchage en fonction des débits massiques et des améliorations structurales

La figure IV.31 présente la performance du collecteur solaire et de la chambre de séchage, mettant en lumière l'efficacité thermique du système dans son ensemble. Les résultats montrent que la performance du collecteur solaire varie en fonction des conditions d'ensoleillement et des caractéristiques du séchoir. À 1 heure de fonctionnement, le collecteur solaire parvient à capter environ 450 W à un débit massique de 0,019 kg/s, et à transférer cette énergie dans la chambre de séchage, permettant une température de 60°C. À 0,024 kg/s, le collecteur capte environ 420 W, ce qui se traduit par une température stable de 55°C dans la chambre de séchage après 1 heure. À un débit de 0,033 kg/s, la captation d'énergie est réduite à 400 W, et la température dans la chambre de séchage ne dépasse pas 50°C après le même laps de temps, indiquant que le débit trop élevé empêche une rétention thermique optimale. L'ajout de chicanes et d'une deuxième plaque absorbante dans le séchoir permet d'améliorer ces performances. À 0,019 kg/s, la captation d'énergie passe à 480 W, et la température dans

la chambre de séchage atteint 65°C après 1 heure. À 0,024 kg/s, la performance atteint 460 W, et la température grimpe à 58°C, tandis qu'à 0,033 kg/s, la captation atteint 440 W, et la température monte à 53°C. Ces résultats démontrent que l'optimisation de la captation solaire et l'amélioration de la structure du séchoir augmentent la température et la performance globale du système, tout en réduisant les pertes thermiques.

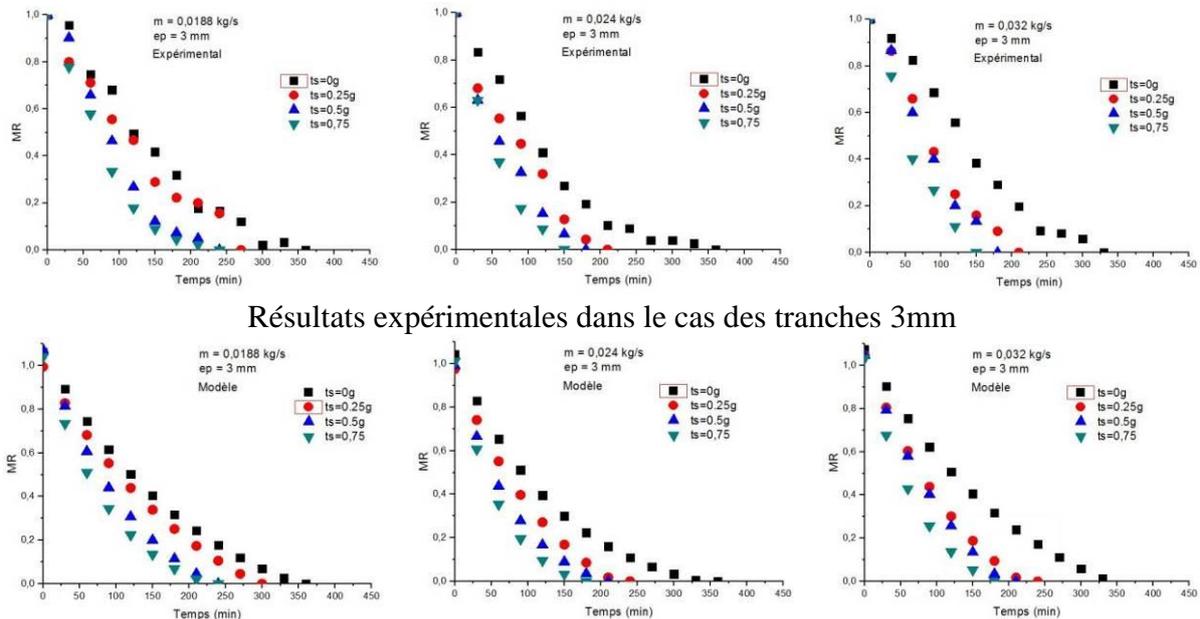
**IV.5. Modélisation mathématique de teneur en eau (MR) A l'aide les modèles semi empirique**



**Figure IV. 32:** Analyse des courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 2 mm: Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique

Les courbes représentées dans la figure IV.32 présentent de la teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 2 mm, obtenues expérimentalement et à partir du modèle mathématique, montrent une évolution similaire au cours du processus de séchage. Initialement, la MR chute rapidement, puis le taux de séchage ralentit au fur et à mesure que l'humidité restante devient plus difficile à éliminer. Les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle suivent une tendance comparable, bien que des écarts puissent apparaître, notamment dans la phase intermédiaire, où le modèle peut sous-estimer ou surestimer le ralentissement du séchage. En phase finale, les courbes se stabilisent, et la MR atteint une valeur résiduelle faible, comme 0.05 ou 0.1. Ces courbes expérimentales et

théoriques sont cruciales pour optimiser les conditions de séchage et ajuster les paramètres du processus afin d'améliorer l'efficacité du séchage des matériaux fins.

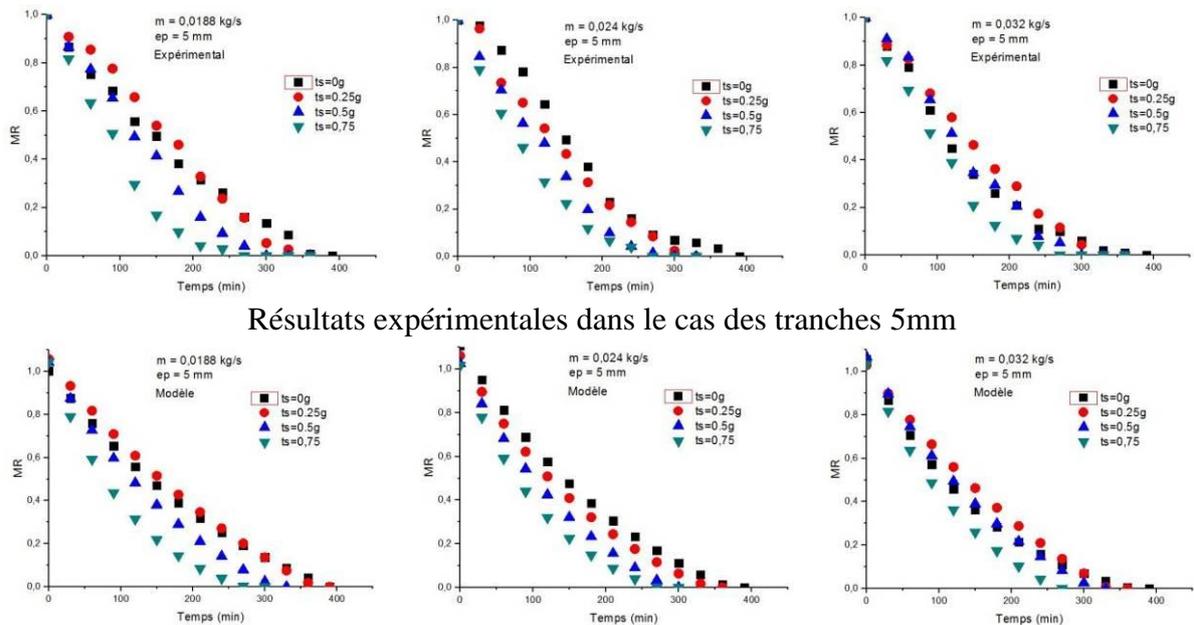


Résultats expérimentales dans le cas des tranches 3mm

Résultats de modèle mathématique dans le cas des tranches 3mm

**Figure IV. 33:** Analyse des courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 3 mm: Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique

La figure IV.33 illustre les courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 3 mm, tant expérimentales que théoriques, montrent une diminution rapide de la MR au début du séchage, suivie d'un ralentissement progressif. Au début, la MR chute de 1 à environ 0.4-0.5, indiquant une évaporation rapide de l'humidité superficielle. En phase intermédiaire, la courbe expérimentale montre une réduction plus lente de la MR, de 0.4 à environ 0.2, tandis que le modèle théorique suit une fonction exponentielle et peut légèrement sous-estimer ou surestimer cette phase en fonction des paramètres choisis. En phase finale, la MR atteint une valeur résiduelle proche de 0.05 ou 0.1, avec un plateau indiquant une difficulté croissante à éliminer l'humidité restante. Ces résultats, bien que similaires aux tranches de 2 mm, révèlent des différences dues à l'épaisseur accrue du matériau, rendant la phase de séchage plus lente. Les courbes expérimentales et théoriques sont cruciales pour ajuster les conditions et optimiser le processus de séchage pour des matériaux plus épais.



**Figure IV. 34:** Analyse des Courbes de Teneur en Eau Relative (MR) pour les Tranches de 5 mm : Résultats Expérimentaux vs Modèle Mathématique

Dans la figure IV.34, on représente les courbes de teneur en eau relative (MR) pour les tranches de 5 mm, obtenues à partir des résultats expérimentaux et du modèle mathématique, suivent une dynamique similaire à celle des tranches de 2 mm et 3 mm, mais avec des différences notables dues à l'épaisseur du matériau. Au début du processus de séchage, les deux courbes, expérimentale et théorique, montrent une diminution rapide de la MR, indiquant une évaporation rapide de l'humidité superficielle. Toutefois, en raison de l'épaisseur plus importante des tranches de 5 mm, cette phase initiale est généralement plus longue, car l'humidité superficielle met plus de temps à s'évaporer complètement.

En phase intermédiaire, la courbe expérimentale commence à se stabiliser, ce qui suggère que l'humidité résiduelle, plus profondément ancrée dans le matériau, devient plus difficile à éliminer. La MR peut diminuer lentement de 0.4 à environ 0.2 ou 0.1 dans cette phase, selon les conditions expérimentales. Le modèle mathématique, qui repose sur des hypothèses théoriques, peut légèrement sous-estimer ou surestimer cette phase de séchage, car il suppose souvent une homogénéité dans le matériau et un processus de séchage idéal, sans tenir compte de certains facteurs externes comme les fluctuations de température ou l'humidité relative.

#### **CHAPITRE IV: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

En phase finale, la MR atteint un plateau, ce qui indique que l'humidité restante est très difficile à éliminer. Les courbes expérimentales montrent souvent une valeur finale de MR d'environ 0.05 ou 0.1, indiquant que l'humidité résiduelle est présente mais qu'elle n'est plus éliminée efficacement par le séchage. Le modèle mathématique prédit également un comportement similaire, bien qu'il puisse y avoir des écarts par rapport aux résultats expérimentaux, en raison des approximations utilisées dans les équations de séchage.

En résumé, les courbes de MR pour les tranches de 5 mm, obtenues à la fois expérimentalement et par modélisation mathématique, suivent une tendance similaire à celle des tranches plus fines. Cependant, l'épaisseur accrue du matériau entraîne des différences dans la durée des différentes phases de séchage, avec un processus globalement plus lent. Les courbes théoriques et expérimentales sont essentielles pour optimiser les paramètres de séchage en tenant compte de l'épaisseur du matériau et des conditions spécifiques de chaque expérimentation.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le séchage solaire est un processus de conservation écologique qui permet de prolonger la durée de conservation, de stockage et de conditionnement des produits agroalimentaires, renforçant ainsi son utilisation dans l'industrie agroalimentaire. Le séchage est une étape cruciale pour assurer la qualité du produit final. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à suivre le comportement des produits séchés par cette technique, influencé par de multiples paramètres.

Afin de comprendre ce phénomène et de contribuer à l'amélioration de sa capacité et de son rendement, nous avons étudié la sensibilité de la cinétique de séchage des couches minces de tranches d'orange sous différentes conditions environnementales (épaisseurs, distances entre la source de chaleur et débit massique d'air). De plus, le prétraitement de salage à sec des tranches de pommes de terre, sous diverses conditions (épaisseurs, teneurs en sel et débits d'air), a également été examiné.

Ces études visent à améliorer un séchoir solaire à convection forcée, destiné au séchage des produits agroalimentaires tels que les fruits et les légumes. Ce séchoir a été conçu dans les ateliers de hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra. L'amélioration consiste à augmenter le rendement du capteur solaire en ajoutant des obstacles sous forme de chicanes transversales espacées de 24 cm sur toute la longueur du capteur. Suite à cette amélioration, l'effet de la distance entre la source de chaleur, l'épaisseur des tranches et le débit massique d'air sur le comportement de séchage des tranches d'orange a été étudié.

Dans la deuxième partie de l'étude, une modification structurelle supplémentaire a été appliquée au capteur solaire du séchoir, consistant à ajouter une deuxième plaque absorbante pour augmenter la température à la sortie du capteur solaire. Cette modification permet au fluide caloporteur de circuler entre les deux plaques (inférieure et supérieure), suivie par une autre étude de séchage solaire des tranches de pommes de terre. Cette partie a étudié l'influence de ces modifications en intégrant plusieurs paramètres expérimentaux tels que l'épaisseur des tranches, le prétraitement avec différentes teneurs en sel et le débit d'air sur la vitesse de séchage des tranches de pommes de terre.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

L'application de salaison à sec comme prétraitement avec différentes teneurs en chlorure de sodium a été appliquée au séchage des tranches de pommes de terre de différentes épaisseurs, et leurs effets ont été étudiés. La combinaison de multiples conditions expérimentales a été analysée pour observer leurs effets sur l'amélioration de la cinétique du séchage.

Après avoir mené toutes les expériences décrites précédemment, les résultats obtenus de ce travail sont les suivants :

Après avoir mené des expériences de séchage solaire des tranches d'orange, au cours desquelles le taux d'humidité a été mesuré et l'effet de l'épaisseur des échantillons ainsi que la vitesse d'évacuation de l'air humide (ou le débit d'air sortant de la chambre de séchage) sur le temps de séchage des tranches d'orange a été étudié en utilisant un séchoir solaire indirect forcé, les résultats ont montré que l'augmentation de l'épaisseur des tranches prolongeait le temps de séchage. En revanche, plus l'air humide était évacué rapidement de la chambre de séchage, plus le temps de séchage diminuait. Il a également été déterminé que le choix des moments et des jours de séchage revêt une grande importance. Les journées de tests doivent être choisies en fonction de conditions naturelles favorables : un ciel clair et sans nuages, des vents modérés et surtout une intensité solaire et une luminosité maximales.

La deuxième partie de l'étude consiste en des études expérimentales et théoriques. Ces études ont été menées avec l'objectif principal d'améliorer les performances de séchage à l'aide d'un séchoir solaire indirect et forcé, tant expérimentalement que par simulation numérique. Les données expérimentales ont été adaptées à un modèle mathématique de l'humidité et comparées au modèle extrait.

La partie expérimentale s'appuie sur le séchage par énergie solaire thermique indirecte d'un produit agricole (pommes de terre), visant à suivre le processus de séchage au cours de la journée et les courbes de température et de changement de teneur en eau de ces produits. Les expériences montrent que la vitesse de séchage est fortement influencée par l'épaisseur de l'échantillon, le débit d'air et la disposition du produit par rapport à la source de chaleur dans la chambre de séchage. Les échantillons de pommes de terre d'une épaisseur de 2 mm, avec un débit de 0,018 kg/s ont séché plus rapidement.

La faible épaisseur facilite le transfert de l'air chaud à travers les échantillons, permettant au produit d'absorber rapidement une grande quantité de chaleur, augmentant ainsi sa température et améliorant l'évaporation de l'eau. En revanche, dans les bandes épaisses (3

## CONCLUSION GÉNÉRALE

mm), l'air chaud traverse difficilement les échantillons, réduisant le gradient d'humidité et la diffusion de l'humidité, même en convection forcée.

La disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage est également cruciale. Lorsque le produit est trop éloigné de l'entrée de la chambre, l'air chaud perd une partie de sa chaleur en chemin. En revanche, lorsqu'il est placé loin de la trappe de soufflage d'air chaud, la température du produit diminue en conséquence, entraînant un faible transfert de chaleur et donc une faible vitesse de séchage.

L'utilisation de différents débits d'air chaud, modulés par un variateur de vitesse, permet d'ajuster la température de l'air chaud, affectant ainsi le transfert de masse et l'humidité de l'air sec. Cependant, dans les capteurs solaires à air plat, lorsque le débit d'air augmente au-delà d'un certain niveau, la température de l'air à la sortie du capteur diminue, réduisant l'énergie transférée par le fluide caloporteur et, par conséquent, la vitesse de séchage.

De plus, l'intensité du rayonnement solaire est un facteur principal pour accomplir le processus de séchage, visant à chauffer la plaque absorbante. Les tests ont montré de bons résultats avec des valeurs maximales de  $1063 \text{ W/m}^2$  pour le rayonnement solaire et de  $101,2 \text{ }^\circ\text{C}$  pour la température. Quant à la température du produit, elle est directement affectée par la température à l'entrée et à l'intérieur de la chambre de séchage, contribuant à l'évaporation de l'humidité. L'humidité relative du produit à sécher est élevée au début des expériences en raison de la forte teneur en eau des échantillons, puis diminue progressivement jusqu'à la fin du test.

Enfin, un modèle mathématique a été utilisé pour déterminer la teneur en humidité réduite. Le modèle a été validé à l'aide de plusieurs données expérimentales extraites de la littérature. Le modèle proposé a montré qu'il était le mieux adapté aux données expérimentales, avec les valeurs moyennes les plus élevées pour  $R^2$  et les valeurs moyennes les plus basses pour  $\chi^2$  et RMSE. Les résultats ont montré que le modèle proposé est le meilleur. Ce modèle peut être utile pour l'industrie alimentaire afin d'analyser la cinétique de séchage des pommes de terre, permettant ainsi de préserver la qualité de ces produits.

## RÉFÉRENCES

1. Tiwari A, (2016), A Review on Solar Drying of Agricultural Produce, J Food Process Technol 7: 623, [Doi: 10.4172/2157-7110.1000623](https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000623).
2. Lisete Fernandes, Pedro B. Tavares, (2024), A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers. Solar 2024, 4, 15–42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>.
3. Foued Chabane, Ali Arif, Said Benramache, (2020), Prediction of the Solar Radiation Map on Algeria by Latitude and Longitude Coordinates, Tecnica Italiana-Italian Journal Of Engineering Science , 64, 2-4, June. 2020, 213-215. <https://doi.org/10.18280/ti-ijes.642-413>
4. Uwem Inyang, Innocent Oboh, Benjamin Etuk (2017), Drying and the different techniques, International Journal of Food Nutrition and Safety, 8(1), 45-72.
5. A. Boudghene Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, Y. Kitamura (2012), A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 4445–4460
6. Patchimaporn Udomkun, Sebastian Romuli, Steffen Schock, Busarakorn Mahayotha, Murat Sartas, Tesfamichael Wossen, Emmanuel Njukwe, Bernard Vanlauwe, Joachim Müller, (2020), Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach, Journal of Environmental Management 268 (2020) 110730, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>.
7. L. Bennamoun, (2011), Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3371– 3379.
8. Custodio Matavel, Harry Hoffmann, Constance Rybak, Stefan Sieber, Klaus Müller, Michael Brüntrup, Joao Salavessa, Passive solar dryers as sustainable alternatives for drying agricultural produce in sub-Saharan Africa: advances and challenges, Discover Sustainability (2021) 2:40, <https://doi.org/10.1007/s43621-021-00049-4>.
9. Pushpendra Singh, Manoj Kumar Gaur (2020), Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers, Energy Sources, Part A:

## RÉFÉRENCES

Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 14 Aug 2020.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1806951>

**10.** Pierre Schuck, (2011), Modifications des propriétés fonctionnelles des poudres de protéines laitières: Impact de la concentration et du séchage. *Innovations Agronomiques*, 13, (2011), 71-99. Hal-01454219.

**11.** Rasaiah Naveenkumar, Manickam Ravichandran, Ravikumar Harish, Jegan Joywin Ruskin, Nagarajan Pozhingiyarasan, Annadurai Kolanjinathan, (2023), Comprehensive review on ideas, designs and current techniques in solar dryer for food applications, *Environmental Science and Pollution Research* (2023) 30:93435–93461  
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-28951-6>.

**12.** Anand Chavan, Vivek Vitankar, Arun Mujumdar , Bhaskar Thorat (2021), Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review, *Drying Technology*, 39:13, 1969-1990, <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1753065>

**13.** Azza Masmoudi, Ahlem Ben Sik Ali, Hatem Dhaouadi, Hatem Mhiri (2021), Comparison between Two Solar Drying Techniques of Sewage Sludge: Draining Solar Drying and Drying Bed, *Waste and Biomass Valorization* (2021) 12:4089–4102, <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01293-x>

**14.** R. Khama, A. Belhamri, (2009), Description mathématique du transfert de chaleur et de masse à travers un lit profond de séchage ; effet du rétrécissement sur la porosité du lit, *Revue des Energies Renouvelables*, 12 ,4 (2009) 597 – 605

**15.** Benseddik Abdellouahab, (2018), amélioration de la qualité et de la performance du séchage solaire des produits agro-alimentaires par insertion d'un traitement de détente instantanée contrôlée (DIC) ; analyse expérimentale, modélisation empirique et phénoménologique, thèse de doctorat en génie mécanique de l'université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen soutenue le 02/07/2018.

**16.** Nadir Nadia, (2020) Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires, Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Département de Physique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année Universitaire: 2020/2021.

**17.** Kauji. A.M, Shittu. S.K, Bawu. B.M, (2019), A Review of Mathematical Modelling of Thin-Layer Sun Drying of Agricultural Products, *Network for Research and Development in Africa, International Journal of Pure and Applied Science Research*, ISSN: 2384-5918. 11, 5, 52-68 (September, 2019).

## RÉFÉRENCES

18. Abbasi, Habib. Layeghinia, Narges.Mohammadi, Solayman. Karimi, Safoora.(2023). Effect of Fruit Thickness on Microwave Drying Characteristics of *Myrtus communis* L. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 42, 1, 2023.
19. Zenaba Kadir Abdissa. Yetenayet B, Tola. Addisalem Hailu Taye. Hayat Hassen Mohammed. (2023).Harmonizing Drying Time, Layer Thickness, and Drier Zones for Drying Kinetics: Quality and Safety of Solar Tunnel-Dried Wet-Processed Parchment Coffee (*Coffea arabica* L.), International Journal of Food Science, 2023, Article ID 6677592, 16 pages, <https://doi.org/10.1155/2023/6677592>.
20. Can Ertekin, M. Ziya Firat (2015): A Comprehensive Review of Thin Layer Drying Models Used in Agricultural Products, Critical Reviews in Food Science and Nutrition. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2014.910493> .
21. R. Khama, A. Belhamri, L. Bennamoun, Transferts Couplés De Chaleur Et De Masse Dans Un Milieu Poreux: Application Au Séchage Des Figes Mises En Couches Epaissees, 14èmes Journées Internationales de Thermique JITH2009 27-29 Mars, 2009, Djerba, Tunisie.
22. Ningning Jiang, Jiyang Ma, Rongge Ma, Yang Zhang, Panyu Chen, Manni Ren, Cuntang Wang, Effect of slice thickness and hot-air temperature on the kinetics of hot-air drying of Crabapple slices, Food Sci. Technol, Campinas, 43, e100422, 2023, doi: <https://doi.org/10.1590/fst.100422>
23. Briki Samia (2021), Effet des techniques de conservation sur la qualité de la grenade, thèse Doctorat (LMD), Université Hadj Lakhdar Batna1,Année Universitaire: 2020-2021
24. P. Salagnac, Patrick Glouannec, Nadine Allanic. Etude expérimentale du séchage par convection et par infrarouge d'un sulfate de fer hydrique. Congrès Société Française de Thermique, Jun 2008, Toulouse, France. pp 679-684. (hal-00401514).
25. Sébastien Curet (Dir.). Procédés de chauffage par micro-ondes: approches expérimentales et numériques des interactions avec les produits alimentaires. 2019. hal-02331934. <https://hal.science/hal-02331934> .
26. P. S. Sunjka, T. J. Rennie, C. Beaudry, G. S. V. Raghavan,Microwave-Convective and Microwave-Vacuum Drying of Cranberries: A Comparative Study, Drying Technology, 22, 5, 1217–1231, 2004. DOI: [10.1081/DRT-120038588](https://doi.org/10.1081/DRT-120038588) 0737-3937.
27. Ibourahema Coulibaly, Robin Dubois-Dauphin, Sabine Danthine, Lamia Majad, Thami Mejoub, Jacqueline Destain, François Béra, Jean-Paul Wathelet, Philippe Thonart, (2011),

## RÉFÉRENCES

Techniques de séchage des starters lactiques et mécanismes affectant la viabilité cellulaire suite à la lyophilisation, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 15(2), 287-299.

28. M A S M Tarminzi, A.A. Razak, M A A Azmi, and Y.H Ming, MRM Akramin, NM Mokhtar, A.F. Sharol, *International Journal of Engineering Technology and Sciences.* 8, 1, 1 – 13, DOI: <https://doi.org/10.15282/ijets.8.1.2021.1001>.

29. Smith, A.B, (2018), *Advances in solar food drying systems.* *Renewable Energy*, 42(1), 15-25. <https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1478921>

30. Shiva Gorjian, Behnam Hosseingholilou, Laxmikant D Jathar, Haniyeh Samadi, Samiran Samanta, Atul A Sagade, Karunesh Kant, Ravishankar Sathyamurthy. *Recent Advancements in Technical Design and Thermal Performance Enhancement of Solar Greenhouse Dryers.* *Sustainability*, 2021, 13.10.3390/su13137025. (hal-03268850).

31. Laouini Abdeldjalil (2021), *Conception et réalisation d'un séchoir cylindro-parabolique pour les produits agro-alimentaire de la région d'Eloued*, thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue le 27/02/2023

32. Tomar, V, Tiwari, G, Norton, B. (2017). *Solar dryers for tropical food preservation: thermophysics of crops, systems and components.* *Solar Energy*, 154, pp.2-13. [doi:10.1016/j.solener.2017.05.066](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.066).

33. Sunil, Naveen Sharma, Amit Garg, Suresh Kumar, *An Overview Of Optimization Techniques Used In Solar Drying*, *Asian Journal of Science and Appelled Technology (AJSAT)* 11.1 2013 pp 5-11.

34. Tchamye Tcha-Esso Boroze , *Outil d'aide a la conception de sechoirs pour les produits agricoles tropicaux*, thèse Doctorat , Université De Lome , Soutenue le : 01 Juillet 2011.

35. Manaa Saadeddine, (2021), *Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques*, thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue le 15 / 03 / 2017.

36. Fernandes, L.; Tavares, P.B. *A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers.* *Solar* 2024, 4, 15–42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>

37. Qu, Hang, Masud, M. M., Islam, Majedul, Khan, Md Imran Hossen, Ananno, Anan Ashrabi, & Karim, Azharul (2022) *Sustainable food drying technologies based on renewable energy sources.* *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(25), pp. 6872-6886.

## RÉFÉRENCES

38. Akermi Mustapha, Modélisation, simulation et analyse du comportement d'un capteur solaire plan à eau pour différents sites en ALGERIE, Doctorat En Sciences Spécialité: Energies Renouvelables, Faculté Des Sciences, Département De Physique, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, Soutenue le 26 / 09 / 2019.
39. Ramdani Hamza, Modélisation Des Performances D'un Capteur Hybride Photovoltaïque/Thermique A Base D'un Nanofluide  $TiO_2$  , Doctoraten 3ème Cycle, Spécialité : Génie Mécanique Et Matériaux Avancées, Département Génie Mécanique, Faculté Sciences Et Technologies, Université 8 Mai 1945 Guelma, Soutenue le 23 mars 2022.
40. Faris Aissaoui, Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire placé dans un climat aride : cas de la région de Biskra. Thèse Doctorat LMD, Département Génie Mécanique, Faculté Sciences Et Technologies, Université Mohamed Khider – Biskra.
41. Olivier Marc. Étude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment. Autre [cond-mat.other]. Université de la Réunion, 2010. Français. NNT : 2010LARE0020. tel-00867005.
42. [https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2019/02/art185\\_fig6\\_modes\\_concentration.jpg](https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2019/02/art185_fig6_modes_concentration.jpg)
43. Olivier Marc. Étude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment. Autre [cond-mat.other]. Université de la Réunion, 2010. Français. (NNT : 2010LARE0020). (tel-00867005)
44. La solaire thermodynamique à concentration, fiche technique, EDF R&D JUIN 2012 INNOVATION.EDF.COM
45. Mohammed Belhadj, Analyse et Conception d'un Système autonome de captage solaire hybride (photovoltaïque/thermique) à Concentration, Thèse doctorat, Université Tahri Mohammed Béchar, Soutenue le· March 2018
46. N.Chouchane, A.Moummi, N.Moummi, H.Houhou, A. Ferdjani, (2010), Etude Du Sechage Des Produits A Haute Teneur En Eau Application Au Piment Vert, 3ième Séminaire Maghrébin sur les Sciences et Technologies de Séchage, SMSTS-3, 3-5 Novembre 2010 Marrakech, Maroc
47. Boughali Slimane (2010), Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques, Au département de Mécanique faculté des Sciences de l'ingénieur, Université Hadj Lakhdar Batna, Soutenue le : 13/07/2010

## RÉFÉRENCES

48. Thu Ha Nguyen, (2015), Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, 2015. Français. NNT : 2015LORIS370. tel-01297965.
49. Jean-François Daïan (2012), Équilibre et transferts en milieux poreux. Première partie, polycopié de cours (Juin 2012), l'Université Joseph Fourier
50. Djamila Damene (2022), effet de la variation de perméabilité dans un milieu poreux en convection naturelle, thèse doctorat, Université Kasdi Marbeh, département de génie mécanique, soutenue publiquement le 30-06-2022.
51. Walid Mchirgui, Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique- Application aux matériaux cimentaires, thèse doctorat, Université de LA ROCHELLE, U.F.R. Science et Technologie, soutenue le: 10/05/2012.
52. Benkafada Faouzia (2008), Contribution A L'étude De Transfert De Masse Et De Chaleur Dans Un Canal Poreux, Thèse Doctorat, Université Mentouri Constantine, Faculté Des Sciences De L'ingénieur, Département De Génie Mécanique,, soutenue en 2008.
53. Aumporn Orawan, (2017), Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase, Université de Perpignan Via Domitia, Spécialité : Physique, Soutenue le 07/12/ 2017
54. Tchamye Tcha-Esso Boroze (2011), Outil d'aide a la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux, thèse doctorat, Université de LOME, Spécialité : Physique Appliquée, Soutenue le 01/07/ 2011.
55. Lopez-Vidana Erick Cesar, Cesar-Munguía Ana Lilia, García-Valladares Octavio, Pilatowsky Figueroa Isaac, Brito Orosco Rogelio(2020), Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*); *Renewable Energy* 147 (2020) 845-855.
56. Akhilesh Singh, Jahar Sarkar, Rashmi Rekha Sahoo: Experimental energy, exergy, economic and exergo-economic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer; *Renewable Energy* 156 (2020) 1107-1116
57. Nadiya Philip, Sruthi Duraipandi, A. Sreekumar: Techno-economic analysis of greenhouse solar dryer for drying agricultural produce, *Renewable Energy* 199 (2022) 613–627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.148>

## REFERENCES

58. Bilal Lamrani, Yasmine Elmrabet, Ibeh Mathew, Naoual Bekkioui, Promise Etim, Adil Chahboun, Abdeslam Draoui, Macmanus Chinenye Ndukwu (2022): Energy, economic analysis and mathematical modelling of mixed-mode solar drying of potato slices with thermal storage loaded V-groove collector: Application to Maghreb region; *Renewable Energy* 200 (2022) 48–58, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.119>.
59. Ahmad, A.; Prakash, O.; Kumar, A.; Chatterjee, R.; Sharma, S.; Kumar, V.; Kulshreshtha, K.; Li, C.; Eldin, E.M.T.(2022) A Comprehensive State-of-the-Art Review on the Recent Developments in Greenhouse Drying. *Energies* 2022, 15, 9493. <https://doi.org/10.3390/en15249493>
60. Zouhair Aouissi & Foued Chabane (2022) Numerical and experimental study of thermal efficiency of the transversal rectangular baffles with incline angle inside of solar air collector, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44:4, 8921-8942, [DOI:10.1080/15567036.2022.2128474](https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2128474)
61. Z. Aouissi, F. Chabane, M. S. Tegua, N. Belghar, N. Moumami, A. Brima, 2022. Heat Exchange Optimization by Adding Baffles to Streaming Duct of Solar Air Collector, *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment*, 13(4), pp. 349-353. [Doi: 10.5829/ijee.2022.13.04.04](https://doi.org/10.5829/ijee.2022.13.04.04)
62. Malwad, D.S., & Sonawane, D.C. (2024). A review on recent advancements in indirect solar drying of agricultural products. *Journal of Renewable Energy and Environment (JREE)*, 11(1), 174-191. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.361949.1452>.
63. Zouhair Aouissi, Foued Chabane, Mohamed-Salah Tegua, Djamel Bensahal, Noureddine Moumami, Abdelhafid Brima (2023), Numerical and experimental investigations of heat transfer inside a rectangular channel with a new tilt angle of baffles for solar air heater, *Journal of Renewable Energy and Technology*, 1(1): 9-15 (2023)
64. Romdhane Ben Slama , Michel Combarous, (2011), Study of orange peels dryings kinetics and development of a solar dryer by forced convection, *Solar Energy* 85 (2011) 570–578
65. Vishal Gupta, Khushboo Sabharwal Gupta, Ruchi Khare (2021) , Experimental analysis for drying of potato slices on detachable solar greenhouse dryer, *Materials Today: Proceedings* 47 (2021) 6269–6273. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.241>.
66. N. Vigneshkumar, M. Venkatasudhahar, P. Manoj Kumar, A. Ramesh, Ram Subbiah, P. Michael Joseph Stalin, V. Suresh, M. Naresh Kumar, S. Monith, R. Manoj kumar, M.

## REFERENCES

Kriuthikeswaran , Investigation on indirect solar dryer for drying sliced potatoes using phase change materials (PCM), *Materials Today: Proceedings* 47 (2021) 5233–5238, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562>

67. Ángel Calín-Sánchez, Leontina Lipan, Marina Cano-Lamadrid, Abdolreza Kharaghani, Klaudia Masztalerz, Ángel A. Carbonell-Barrachina, Adam Figiel, (2020), Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables, Aromatic Herbs, *Foods* 2020, 9, 1261; [doi:10.3390/foods9091261](https://doi.org/10.3390/foods9091261)

68. Ndukwu Macmanus Chinenye, Doris Ijeoma Onyenwigwe, Fidelis Abam, Bilal Lamrani, Merlin Simo-Tagne, Naoual Bekkioui, Lyes Bennamoun, Zafar Said (2022): Influence of hot water blanching and saline immersion period on the thermal effusivity and the drying kinetics of hybrid solar drying of sweet potato chips, *Solar Energy* 240 (2022) 176–192

69. Macmanus Chinenye Ndukwu, Edet Ben Augustine, Elijah Ugwu, Mathew Imagwuike Ibeh, Inemesit Ekop, Godwin Akpan, Anietie Effiong Udo, Victor E. Ihediwa, Leonard Akuwueke, Jude Mbanasor, Fidelis Abam: Drying kinetics and thermo-economic analysis of drying hot water blanched ginger rhizomes in a hybrid composite solar dryer with heat exchanger, *Heliyon* 9 (2023) e13606; <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13606>

70. Ndukwu Macmanus Chinenye, Doris Ijeoma Onyenwigwe, Fidelis Abam, Bilal Lamrani, Merlin Simo-Tagne, Naoual Bekkioui, Lyes Bennamoun, Zafar Said(2022): Influence of hot water blanching and saline immersion period on the thermal effusivity and the drying kinetics of hybrid solar drying of sweet potato chips; *Solar Energy* 240 (2022) 176–192

71. Shahin Rafiee, Mohammad Sharifi, Alireza Keyhani, Mahmoud Omid, Ali Jafari, Seyed Saeid Mohtasebi, Hossain Mobli,( 2010), Modeling Effective Moisture Diffusivity Of Orange Slice, *International Journal of Food Properties*, ISSN: 1094-2912 print / 1532-2386 online, 13: 32–40, 2010, [Doi: 10.1080/10942910802144345](https://doi.org/10.1080/10942910802144345)

72. Kolawole O. Falade, Oluwakemi J. Solademi, Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices, *International Journal of Food Science and Technology* 2010, 45, 278–288

73. Franco Pedreschi , Pamela Hernández , Clara Figueroa & Pedro Moyano (2005) Modeling Water Loss During Frying of Potato Slices, *International Journal of Food Properties*, 8:2, 289-299

## REFERENCES

74. Shweta Solanke, Shilpa Deshmukh, BN Patil (2018), Development of osmo-convective drying of sweet orange slices by using different osmotic agents, *International Journal of Chemical Studies* 2018; 6(5): 838-842
75. Morteza Sadeghi, Omid Mirzabeigi Kesbi, Seyed Ahmad Mireei, (2012), Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices, 2012 Society of Chemical Industry, Published online in Wiley Online Library: (wileyonlinelibrary.com) [DOI 10.1002/jsfa.5786](https://doi.org/10.1002/jsfa.5786)
76. Siyabonga Gasa, Siphosibanda, Tilahun S. Workneh, Mark Laing, Alaika Kassim (2022), Thin-layer modelling of sweet potato slices drying under naturally-ventilated warm air by solar-venturi dryer, *Heliyon* 8 (2022) e08949, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08949>
77. Awuchi Chinaza Godswill, Emeka Thompson Nwankwere (2018). Residual Calcium Content of Sweet Potato Slices after Osmotic Pre-treatment with Salt (NaCl) Solution. *American Journal of Food, Nutrition and Health*. Vol. 3, No. 1, 2018, pp. 8-15.
78. Mohammad Afzal Hossain, Pappu Dey, Rahman Ishtiaque Joy (2021), Effect of osmotic pretreatment and drying temperature on drying kinetics, antioxidant activity, and overall quality of taikor (*Garcinia pedunculata* Roxb.) slices, *Saudi Journal of Biological Sciences* 28 (2021) 7269–7280
79. Yurong Ma, Hongying Wang, Han Yan, Aman Ullah Malik, Tiantian Dong, Qingguo Wang (2021), Pre-cut NaCl solution treatment effectively inhibited the browning of fresh-cut potato by influencing polyphenol oxidase activity and several free amino acids contents, *Postharvest Biology and Technology* 178 (2021) 111543.
80. Rui Wang, Min Zhang, Arun S. Mujumdar, Hao Jiang, (2011), Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices, *Journal of Food Engineering* 106 (2011) 290–297.
81. Negar Hafezi, Mohammad Javad Sheikhdavoodi, Seyed Majid Sajadiye, (2016), Assessment of some physical properties of dried potatoes, June, 2016 *AgricEngInt: CIGR Journal* Open access at <http://www.cigrjournal.org> Vol. 18, No. 2 267
82. T. S. Workneh A. Zinash, K. Woldetsadik, Blanching, salting and sun drying of different pumpkin fruit slices, *J Food Sci Technol* (November 2014) 51(11):3114–3123 [DOI:10.1007/s13197-012-0835-4](https://doi.org/10.1007/s13197-012-0835-4)

## REFERENCES

- 83.** Wan Mohd Fadli Wan Mokhtar, Sameer Khalil Ghawi & Keshavan Niranjan (2018): Dehydration of potato slices following brief dipping in osmotic solutions: Effect of conditions and understanding the mechanism of water loss, *Drying Technology*, <http://doi:10.1080/07373937.2018.1473418>.
- 84.** Kshirod Kumar Dash, Debashree Sen, Dibyakanta Seth, (2021), Optimization Of Osmotic Dehydration Process Of Carambola (Averrhoacarambola L.) Fruit in Binary Solution of Salt and Sucrose. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2021 : 10 (6) e3307, <https://doi.org/10.15414/jmbfs.3307>
- 85.** Amit Malik, Mahesh Kumar, Computer software applications in solar drying, *Materials Today: Proceedings* 64 (2022) 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.008>.
- 86.** A. Bouselma, D. Abdessemed, H. Tahraoui, A. Amrane. Artificial Intelligence and Mathematical Modelling of the Drying Kinetics of Pre-treated Whole Apricots. *Kemija u industriji, Hrvatsko drutvo kemijskih inenjera i tehnologa*, 2021, 70 (11-12), pp.651-667. <https://doi.org/10.15255/KUI.2020.079>.
- 87.** P.P. Tripathy, Subodh Kumar Neural network approach for food temperature prediction during solar drying, *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 1452–1459. [Doi:10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.014](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.11.014)
- 88.** A. Sadadou, S. Hanini, M. Laidi, A. Rezrazi: Novel Approach for Predicting Direct and Open Solar Drying Using Artificial Neural Network for Medicinal Plant, *Kem. Ind.* 70 (3-4) (2021) 145–152. <https://doi.org/10.15255/KUI.2020.049>
- 89.** Qing Sun, Min Zhang & Arun S. Mujumdar (2019): Recent developments of artificial intelligence in drying of fresh food: A review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59:14, 2258-2275, [DOI: 10.1080/10408398.2018.1446900](https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1446900)
- 90.** Akinola A. A., Okanlawon G.A. (2022), Modelling Moisture Ratio of Dehydrating Yam Slices Using the Levenberg-Marquardt Back-propagation Artificial Neural Network Technique, *FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET)*, 7(4), 480-485. [Doi.org/10.46792/fuoyejet.v7i4.923](https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v7i4.923)
- 91.** Tran, D. A. T, Nguyen, V. T., Le, D. N. H., Ho, T. K. P. (2023). Application of Generalized Regression Neural Network for drying of sliced bitter melon in a halogen dryer. *Brazilian Journal of Food Technology*, 26, e2022142. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.14222>

## RÉFÉRENCES

92. Javad Khazaei , Gholam-Reza Chegini, Maryam Bakhshiani (2008), A Novel Alternative Method for Modeling the Effects of Air Temperature and Slice Thickness on Quality and Drying Kinetics of Tomato Slices: Superposition Technique, *Drying Technology*, 26:6, 759-775,  
[DOI: 10.1080/07373930802046427](https://doi.org/10.1080/07373930802046427)
93. Istvan Farkas, Use of Artificial Intelligence Methods for Modelling of Drying Processes, *E3S Web of Conferences* 484, 01028 (2024) FoITIC 2023,  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448401028>.
94. Le Thi Kim LOAN, Nguyen Minh THUY, Ngo Van TAI, Mathematical and artificial neural network modeling of hot air drying kinetics of instant “Cảm” brown rice, *Food Sci. Technol, Campinas*, 43, e27623, 2023, <https://doi.org/10.5327/fst.27623>
95. <https://www.infoclimat.fr/observationsmeteo/archives/5/mai/2024/biskra/60525.html>
96. Hanafi et D. Alkama, (2019) ‘Vers la meilleure solution d’optimisation du confort thermique des places publiques de la ville de Biskra/Algérie’, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 22 N°2 (2019) 189 – 204
97. Kauji, A.M., Shittu, S.K., Bawu, B.M., (2019). A Review of Mathematical Modelling of Thin-Layer Sun Drying of Agricultural Products, *Network for Research and Development in Africa, International Journal of Pure and Applied Science Research* ISSN: 2384-5918, 11, 5, 52-68 (September, 2019).
98. Can Ertekin, M. Ziya Firat (2015): A Comprehensive Review of Thin Layer Drying Models Used in Agricultural Products, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, [DOI: 10.1080/10408398.2014.910493](https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493).