

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Energies renouvelables en mécanique

**Par** : AMEUR Khadidja  
BENOSMANE Imane

### **Sujet**

# Réalisation d'un séchoir solaire indirect

Soutenu publiquement, le 25/06/2023, devant le jury composé de :

M GUELLIL Hocine	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M BENRAHOU Mohammed		Université de Tlemcen	Examinateur
M MAACHOU Omar		Université de Tlemcen	Examinateur
Mme KHALDI Souheyla	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
M KORTI A.I. Nabil	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2022 /2023

***REMERCIEMENT***

Nous voulons également exprimer notre gratitude envers nos encadreurs, Monsieur **KORTI Abdalilah Nabil** et Madame **KHALDI Souheyla**, pour leur soutien et leur guidance tout au long de la réalisation de notre mémoire. Leurs conseils, leur expertise et leur patience nous ont permis de mener à bien ce projet et de le présenter avec confiance.

Nous remercions, **M GUELLIL Hocine**, **M BENAMARA Abdellatif** et **M BENDERMELOthman** pour leur aide durant la réalisation de ce projet.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à messieurs **GUELLIL Hocine**, **BENRAHOU Mohammed**, **MAACHOU Omar** et madame **BENAHMED Lamia** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous ne pouvons terminer sans toutefois à remercier tous ceux et celles qui de près ou de loin, nous ont apporté aides et encouragements. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude

## **Dédicaces**

*Je dédie cet humble travail à :*

*Mes très chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.*

*A mes chers frères, Oussama, Omar, et Kais pour leur appui et leur encouragement.*

*A mes deux chères sœurs Hafida et Zineb pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*A toute ma famille*

*Et A toutes mes amies,*

*Et surtout Nadjat et Kheira*

*À tous ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu et*

*Encouragé tout au long de ce parcours.*

*Votre confiance et votre soutien ont été ma force motrice. Merci infiniment*

**AMEUR Khadidja**

## **Dédicaces**

**Cher mes parents, mes sœurs, mes amis,**

Je voulais prendre un moment pour vous exprimer toute ma gratitude et mon amour. Vous avez été un pilier essentiel dans ma vie, et je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui sans vous.

**Pour mes parents,** Vous m'avez donné la vie et m'avez guidé tout au long de mon parcours. Votre amour inconditionnel, vos conseils avisés et votre soutien ont été inestimables pour moi et je vous en suis vraiment reconnaissante.

**Pour mes sœur,** Vous avez été mes compagnons de jeu, mes confidents et mes meilleurs amis. Nous avons partagé des moments inoubliables ensemble et je suis fière de voir les personnes merveilleuses que vous êtes devenues.

**Pour mes amis, « CHERIFI Sara », « ABAD Siham », « AMEUR Khadidja »** Vous avez été là pour moi dans les moments difficiles, m'avez fait rire aux éclats et m'avez soutenu dans mes projets. Je suis honorée de vous avoir dans ma vie et de pouvoir compter sur vous.

Je tenais à vous dédier ces quelques mots pour vous dire à quel point vous comptez pour moi. Je vous aime et je suis fière de partager ma vie avec vous.

Avec toute mon affection,

Dédicace à l'âme de mes chers grands-parents

Tout ceci est pour vous, même si cela ne suffira jamais à vous rendre justice.

À vous, qui m'as élevé lorsque j'étais petite, qui m'as pris dans vos bras et qui m'as accompagné lorsque j'étais enfant.

À vous, pour qui les mots et les plumes ont été impuissants à exprimer ce que j'avais dans le cœur.

À vous, pour qui mon cœur a été incapable de décrire la douleur de votre perte.

À vous, qui as tout abandonné dans ce monde pour mon bonheur et ma sécurité.

À vous, qu'il est impossible d'oublier.

Votre départ de ma vie a été une grande perte, comment puis-je l'accepter alors que vous êtes mon air et mon souffle de vie.

Le destin a voulu votre départ de ce monde.

## ملخص

يتمثل التجفيف في تقليل جزء كبير من ماء الطعام عن طريق التبخر من أجل تحسين حفظه ، وهي عملية بسيطة تحتوي على آليات معقدة. في هذا العمل ، تم تصنيع نموذج أولي من المجفف الشمسي المضغوط من النوع غير المباشر باستخدام مواد محلية بتكلفة منخفضة. تتيح الدراسة التجريبية فهم السلوك الحراري للمجفف الشمسي بالحمل القسري ومتابعة حركية التجفيف لبعض المنتجات الغذائية الزراعية. درسنا تأثير دمج حواجز معدنية على مستوى الممتص وتضييق تيار الهواء في المجمع الشمسي على السلوك الحراري للمجفف وحركية تجفيف شرائح رقيقة من الفلفل والطماطم والفاصوليا والتفاح.

**الكلمات المفتاحية:** مجفف شمسي ، حركية مدمجة ، حركية التجفيف ، السلوك الحراري ، الحمل القسري ، الحمل الحراري الطبيعي ، حواجز معدنية.

## **Résumé**

Le séchage consiste à réduire une grande partie de l'eau d'un aliment par évaporation afin d'améliorer sa conservation. C'est une opération simple qui renferme des mécanismes complexes. Dans ce travail, un prototype de séchoir solaire compact type indirect a été fabriqué en utilisant des matériaux locaux à moindre coût. L'étude expérimentale permet de comprendre le comportement thermique du séchoir solaire à convection forcée et de suivre la cinétique de séchage de quelques produits agroalimentaires. On a étudié l'influence des ailettes au niveau de l'absorbeur ainsi que le rétrécissement de la veine d'air dans le capteur solaire sur le comportement thermique du séchoir. Nous avons suivi aussi la cinétique de séchage des tranches minces de poivron, tomate, fraise et pomme.

**Mots clés:** séchoir solaire indirect, cinétique de séchage, comportement thermique, convection forcée, ailettes.

## **Abstract**

Drying consists of reducing a large part of the water of a food by evaporation in order to improve its conservation, it is a simple operation which contains complex mechanisms. In this work, a prototype of indirect type compact solar dryer was fabricated using local materials at low cost. The experimental study makes it possible to understand the thermal behavior of the forced convection solar dryer and to follow the drying kinetics of some agri-food products. We studied the influence of integrating fins at the level of the absorber and the reducing the space of the air stream in the solar collector on the thermal behavior of the dryer and the kinetics of drying of thin slices of pepper, tomato, strawberry and apple.

**Keywords:** indirect solar dryer, drying kinetics, thermal behavior, forced convection, fins.

## Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I: Généralités sur le séchage solaire

I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralités sur le séchage.....	4
I.2.1. Définition du séchage.....	4
I.2.2. Mécanisme de séchage.....	4
I.2.3. Trois phases de séchage.....	5
a) Période de mise en température (AB).....	5
b) Période de vitesse de séchage constante (BC).....	6
c) Phase de ralentissement du séchage (CD).....	6
I.2.4. Caractéristiques de l'air de séchage.....	6
a) Humidité absolue.....	7
b) Teneur en eau à base humide.....	7
I.3. Technologies de séchage.....	7
I.3.1. Séchage au soleil.....	7
I.3.2. Séchage solaire.....	8
I.3.3. Lyophilisation.....	8
I.3.4. Séchage au four.....	8
I.4. Classification des séchoirs.....	8
I.4.1. Système passif.....	9
I.4.1.1. Séchoir tente.....	9
I.4.1.2. Séchoir à caisson.....	10
I.4.1.3. Séchoir à bascule.....	10
I.4.1.4. Séchoir solaire à armoire.....	11
I.4.2. Séchoirs solaires actifs.....	12
I.4.2.1. Séchoirs solaires actifs avec armoire ventilée.....	13

I.4.2.2. Séchoirs avec chauffage d'appoint .....	13
I.4.3. Séchoirs à effet de serre .....	14
I.5. Conclusion.....	15

## **CHAPITRE II: Positionnement du problème**

II.1. Introduction .....	17
II.2. Position du problème.....	17
II.3. Fourniture et les éléments constitutifs du séchoir solaire .....	19
II.3.1. Panneau de contreplaqué multicouche .....	19
II.3.2. Vitre .....	20
II.3.3. Plaque métallique.....	21
II.3.4. Visserie .....	21
II.3.5. Ventilateur.....	22
II.4. Instrumentation.....	22
II.4.1. Mesure des températures.....	22
II.4.2. Mesure du rayonnement solaire .....	23
II.4.3. Mesure du poids .....	24
II.4.4. Cellule solaire .....	25
II.5. Réalisation du séchoir solaire.....	25
II.5.1. Découpage.....	25
II.5.2. Assemblage des différents composants.....	26
II.6. Intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur .....	27
II.7. Rétrécissement de la veine d'air .....	28
II.8. Produits à sécher.....	29
II.8.1. Poivron .....	29
II.8.2. Tomate .....	30
II.8.3. Fraise.....	30
II.8.4. Pomme .....	30
II.9. Protocole expérimentale .....	31
II.10. Rendement du capteur .....	31
II.11. Conclusion.....	32

**CHAPITRE III: Résultats et interprétations**

III.1. Introduction .....	34
III.2. Etude de comportement thermique du séchoir solaire indirect simple.....	34
III.2.1. Conditions climatiques.....	34
III.2.2. Evolution de la température des composants du capteur solaire .....	35
III.2.3. Evolution de la température à travers la chambre de séchage .....	37
III.2.4. Cinétique de séchage.....	38
III.3. Etude de comportement thermique du séchoir solaire indirect avec ailettes.....	40
III.3.1. Conditions climatiques.....	40
III.3.2. Evolution de la température des composants du capteur .....	41
III.3.3. Evolution de la température à travers la chambre.....	41
III.3.4. Cinétique de séchage.....	42
III.4. Comparaison de séchage forcé et naturel de la tomate.....	43
III.4.1. Conditions climatiques.....	44
III.4.2. Evolution de la température des composants du capteur .....	45
III.4.3. Evolution de la température des composants dans la chambre .....	46
III.4.4. Humidité relative de l'air.....	47
III.4.5. Cinétique de séchage.....	48
III.5. Effet du rétrécissement de la veine d'air .....	51
III.5.1. Conditions climatiques.....	51
III.5.2. Evolution de la température des composants du capteur solaire .....	52
III.5.3. Evolution de la température dans la chambre de séchage.....	52
III.5.4. Cinétique de séchage.....	53
III.6. Produits après séchage .....	54
III.7. Conclusion .....	55
Conclusion générale.....	57

Références

Annexe

## Liste des tableaux

### **CHAPITRE II : POSITIONNEMENT DU PROBLEME**

**Tableau II.1** : Dimensions et la quantité des éléments.....19

### **CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

**Tableau III. 1**: Produits après le séchage: à l'air libre et dans le séchoir.....54

## Liste des figures

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SECHAGE SOLAIRE

<b>Figure I.1:</b> Schéma du mécanisme de séchage.....	4
<b>Figure I.2 :</b> Courbe de phases de séchage.....	5
<b>Figure I.3 :</b> Séchoir tente.....	9
<b>Figure I.4 :</b> Séchoir à caissons.....	9
<b>Figure I.5.</b> Séchoir à bascule.....	10
<b>Figure I.6 :</b> Séchoir en armoire (mode indirect).....	11
<b>Figure I.7 :</b> Ventilateur alimenté par un panneau photovoltaïque.....	12
<b>Figure I.8 :</b> Séchoir à convection naturelle avec appoint.....	13
<b>Figure I.9:</b> Séchoir à effet de serre avec cheminée.....	14

### CHAPITRE II : POSITIONNEMENT DU PROBLEME

<b>Figure II.1 :</b> Prototype du séchoir solaire réalisé, (b) Schéma simplifié du prototype (La position des thermocouples).....	18
<b>Figure II.2 :</b> Panneau en contreplaqué multiplié.....	20
<b>Figure II.3 :</b> Verre ordinaire transparent.....	20
<b>Figure II.4 :</b> Plaque métallique.....	21
<b>Figure II.5:</b> Visseries.....	21
<b>Figure II.6:</b> Ventilateur.....	22
<b>Figure II.7:</b> enregistreur de température et sa position sur le séchoir solaire indirect.....	23
<b>Figure II.8:</b> Mesure de température et humidité.....	23
<b>Figure II.9 :</b> Solarimètre.....	24
<b>Figure II.10 :</b> Instrument de mesure du poids.....	24
<b>Figure II.11 :</b> Cellule solaire.....	25
<b>Figure II.12:</b> Découpage du bois.....	26
<b>Figure II.13 :</b> Découpage et peinture d'acier galvanisé.....	26
<b>Figure II.14:</b> Assemblage des pièces coupées.....	27

<b>Figure II. 1:</b> (a) Dimensions de l'ailette, (b) Schéma des positions des ailettes par rapport au vitrage et l'absorbeur.....	27
<b>Figure II.16:</b> (a) Intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur, (b) Isolation de la face inférieure de l'absorbeur.....	28
<b>Figure II.17 :</b> Schéma de rétrécissement de la veine d'air.....	29
<b>Figure II.18:</b> (a) Isolation des parois de la chambre, (b) Vue finale du séchoir solaire.....	29
<b>Figure II.19:</b> Poivron avant séchage.....	29
<b>Figure II.20:</b> Tomate avant séchage.....	30
<b>Figure II.21:</b> Fraise avant séchage.....	30
<b>Figure II.22 :</b> Pomme avant séchage.....	31

### CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

<b>Figure III.1:</b> Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire durant deux journées.....	34
<b>Figure III.2:</b> Evolution de la vitesse de l'air ambiant et l'air à l'entrée du capteur solaire.....	35
<b>Figure III.3:</b> Evolution horaire de la température des différents composants du capteur solaire.....	36
<b>Figure III.4:</b> Evolution horaire des différentes températures au sein de la chambre de séchage.....	37
<b>Figure III.5:</b> Variations (a) de la perte de masse et (b) de la teneur en eau au cours du temps.....	39
<b>Figure III.6:</b> Evolution de la température ambiante, rayonnement solaire, vitesse de l'air ambiant et vitesse à l'entrée capteur solaire 27/04/2023.....	40
<b>Figure III.7:</b> Evolution horaire de la température des différents composants du capteur solaire avec ailettes.....	41
<b>Figure III.8:</b> Evolution horaire des différentes températures au sein de la chambre de séchage (cas du capteur avec ailettes).....	42
<b>Figure III.9:</b> Evolution de (a) la perte de masse et (b) la teneur en eau au cours du temps....	43
<b>Figure III.10:</b> Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire pour les jours 03,04,05/05/2023.....	44
<b>Figure III.11:</b> Variation temporelle de la température de différents composants du capteur (a) convection forcée, (b) convection naturelle.....	45

<b>Figure III.12:</b> Variation temporelle de la température dans la chambre de séchage	
(a) convection forcée, (b) convection naturelle.....	46
<b>Figure III.13:</b> Variation temporelle de l'humidité relative de l'air dans la chambre	
(a) convection forcée, (b) convection naturelle.....	47
<b>Figure III.14:</b> Evolution de la perte de masse des tomates au cours du temps	
(a) convection forcée, (b) convection naturelle.....	49
<b>Figure III.15:</b> Evolution de la réduction de la teneur en eau au cours du temps (a) convection forcée, (b) convection naturelle.....	50
<b>Figure III.16:</b> Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire pour les jours 15 et 16 /05/2023.....	51
<b>Figure III.17:</b> Variation temporelle de la température de différents composants du capteur..	52
<b>Figure III.18:</b> Variation temporelle de la température dans la chambre de séchage.....	52
<b>Figure III.19:</b> Evolution de (a) la perte de masse et (b) la teneur en eau au cours du temps..	53

## Nomenclature

### Lettres latines

		Unité
$A_c$	Surface du capteur	$m^2$
$C_p$	Chaleur spécifique	$J / kg.K$
$I_g$	Rayonnement solaire incident	$W / m^2$
$\dot{m}$	Débit massique	$kg/s$
$M_e$	Masse d'eau	$kg$
$M_h$	Masse du produit humide	$kg$
$M_s$	Masse de la matière sèche	$kg$
$T$	Température	$^{\circ}C$
$t$	Temps	$h$
$V$	Vitesse du vent	$m / s$
$X_s$	Teneur en eau à base sèche	
$X_h$	Teneur en eau à base humide	

### Symboles grecs

$\alpha$	Absorptivité
$\tau$	Transmissivité
$\eta$	Rendement

### Indices

abs	Absorbeur
e	Entrée
v	Vitrage
s	Sortie
sc	Sortie capteur

## Introduction générale

L'énergie solaire est l'énergie émise par la lumière du soleil. Cette énergie est à l'origine de toutes les formes de production d'énergie, et aujourd'hui elle est classée dans la catégorie des énergies renouvelables, de quoi la transformer en d'autres formes, elle est exploitée essentiellement pour produire la chaleur et l'électricité qu'ils sont les plus utilisés dans plusieurs secteurs.

Parmi ces moyens d'exploiter l'énergie solaire figure le séchage solaire, un système qui est l'une des méthodes les plus courantes de séchage solaire des légumes, des fruits, des poissons et de la viande.

Le séchage solaire est l'une des méthodes courante de conservation de la plupart des produits agroalimentaires, par diminution de leur teneur en eau jusqu'à des valeurs résiduelles où le développement de tout micro-organisme est inhibé. Il se fait par des méthodes directes où le produit est exposé au soleil, ou par le séchage indirect où l'air de séchage passe à travers un capteur solaire ; s'échauffe avant l'entrée de la chambre de séchage.

Les séchoirs solaires en mode direct, indirect et hybride permettent de pallier les désagréments liés au séchage à l'air libre au soleil, car dans ces types de séchoirs, le produit est protégé des rayons solaires (en particulier, l'ultra-violet) et conserve une meilleure qualité nutritionnelle. En particulier, le transfert de chaleur se produit dans un capteur solaire. Ce dernier est très important dans ces séchoirs. Il fournit de hautes performances thermiques à l'entrée de la chambre de séchage. Plusieurs chercheurs ont développé des modèles analogiques, mathématiques et expérimentaux concernent principalement l'amélioration de la température et du débit d'air en augmentant l'efficacité thermique de capteur avec de nouvelles formes de surface de l'absorbeur. Il existe généralement des absorbeurs poreux, profilés, zigzags et avec chicanes.

Dans ce contexte, on va réaliser un séchoir solaire indirect avec un absorbeur lisse dans la première partie de l'étude, et avec un absorbeur muni des ailettes dans le reste de l'étude. Les produits agroalimentaires choisis dans la présente étude sont les poivrons, les tomates, les fraises et les pommes.

Ce mémoire se compose de 03 chapitres, chaqu'un est destiné à présenter une partie du travail, ils sont disposés comme suit :

- ❖ **Chapitre 01** : On va fournir des notions générales de base sur le séchage et les séchoirs solaires.
- ❖ **Chapitre 02** : Il comprend les matériels utilisés ainsi que les étapes de conception de séchoir solaire.
- ❖ **Chapitre 03** : Il est consacré pour la présentation des expériences et ses résultats accompagnés avec les courbes des produits agroalimentaires désirés.

## CHAPITRE I

# Généralités sur le séchage solaire

### Sommaire

I.1.	Introduction .....	4
I.2.	Généralités sur le séchage.....	4
I.3.	Technologies de séchage .....	8
I.4.	Classification des séchoirs.....	9
I.5.	Conclusion.....	16

## **I.1. Introduction**

Les applications basées sur la conversion à basses températures de l'énergie solaire en énergie thermique sont nombreuses et diverses. Parmi celles-ci, on peut citer le séchage solaire des produits agricoles. C'est un processus clé de la transformation des produits dans l'industrie agroalimentaire, le séchage est un processus très énergivore. Ceci explique l'utilisation croissante des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire grâce à l'utilisation de séchoirs solaires.

## **I.2. Généralités sur le séchage**

### **I.2.1. Définition du séchage**

Le séchage, qu'il soit traditionnel ou moderne, vise à réduire significativement les différentes réactions qui se produisent lors de la décomposition normale du produit. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire la majeure partie de l'humidité contenue dans le produit. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air ambiant. Cela nécessite de l'énergie thermique (solaire, électricité, gaz). Avec cette énergie, l'eau se déplace à l'intérieur du produit et est évacuée sous forme de vapeur.

Un bon séchage nécessite de maîtriser de nombreux paramètres :

- L'énergie thermique pour l'évaporation ;
- La capacité de l'air à absorber la vapeur d'eau émise par le produit;
- Vitesse idéale de l'air au niveau du produit pour favoriser l'entraînement de la vapeur d'eau : le produit doit sécher rapidement pour éviter l'altération ;
- Caractéristiques du produit cru : Les poissons gras ne sont pas séchés comme les fruits et légumes ;.

### **I.2.2. Mécanisme de séchage**

Une ventilation suffisamment chaude et sèche suffit pour sécher le produit. Un échange de chaleur et d'humidité a lieu entre l'air et le produit humide. L'air chaud transfère une partie de sa chaleur au produit.

Il y a deux facteurs importants dans le contrôle du processus de séchage :

- Le transfert d'énergie thermique ; de l'environnement vers le liquide à évaporer ainsi que fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le transfert de masse ; de l'intérieur du solide vers sa surface, puis le passage en phase gazeuse.

Le taux de séchage est directement lié aux modes transferts décrits précédemment [1].

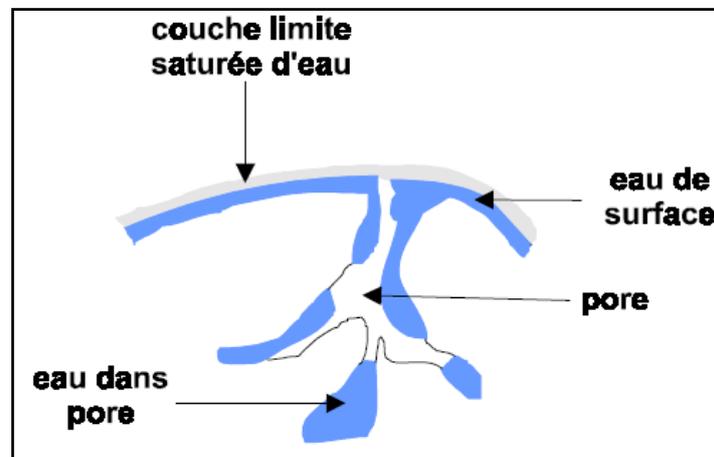


Figure I. 1: Schéma du mécanisme de séchage.

### I.2.3. Trois phases de séchage

#### a) Période de mise en température (AB)

Ce temps de séchage est souvent très court, caractérisé par une vitesse de séchage accrue, correspondant à la montée en température du produit jusqu'à la température d'équilibre.

Lorsque le produit reçoit de l'air autant de chaleur qu'il doit en fournir à l'eau, il est alors en phase de vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte immédiatement car le produit avait au début du séchage une température plus basse, et une inertie thermique. La vitesse de séchage va augmenter car l'échange d'eau entre le produit et l'air sera plus efficace puisque le produit sera chauffé.

#### b) Période de vitesse de séchage constante (BC)

Elle correspond à l'évaporation de l'eau libre à la surface du produit, constamment renouvelée par de l'eau provenant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La température du produit reste constante.

### c) Phase de ralentissement du séchage (CD)

Elle correspond à l'évaporation de l'eau liée. L'eau libre, qui a migré de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour se transformer ensuite en vapeur d'eau, a complètement disparu à la fin de la phase II. Seule l'eau liée reste dans le produit, elle n'est plus attachée au produit. L'eau ne s'évapore pas à la surface du produit mais à l'intérieur. Un front d'évaporation s'enfonce vers le cœur du produit. La vapeur d'eau est alors évacuée en surface par l'air. Plus le front est éloigné de la surface extérieure du produit, plus le transfert de l'eau est difficile. A ce stade, si la température et le débit sont les mêmes qu'auparavant, la température du produit augmentera et se rapprochera de la température de l'air d'admission.

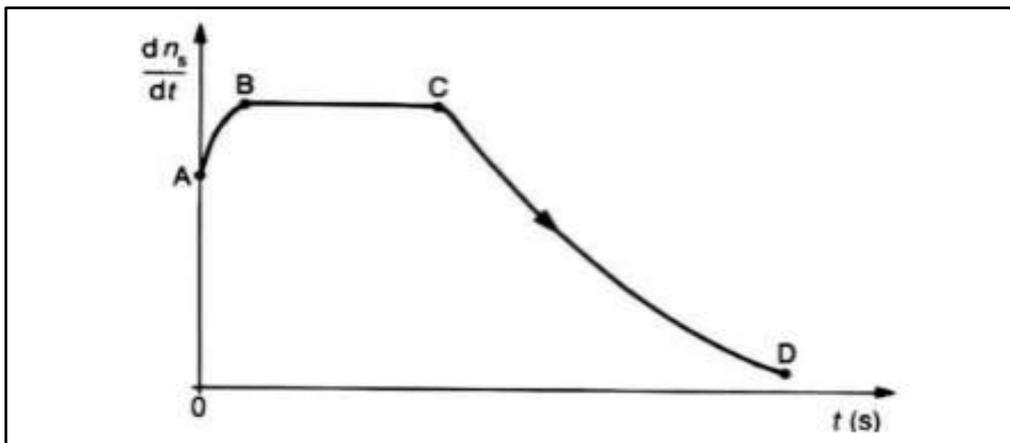


Figure I.2 : Courbe de phases de séchage.

### I.2.4. Teneur en eau

Soit une masse  $M_h$  de matériau humide contenant une masse  $M_e$  d'eau et une masse  $M_s$  de matière sèche [2] :

$$M_h = M_e + M_s \quad (\text{I.1})$$

#### a) Teneur en eau à base sèche

La teneur en eau à base sèche est exprimée par la masse du liquide contenu dans le produit par rapport à sa masse sèche [2] :

$$X_s = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.2})$$

### b) Teneur en eau à base humide

La teneur en eau à base humide est exprimée comme la masse du liquide contenu dans le produit par rapport à sa masse humide [2] :

$$X_h = \frac{M_e}{M_e + M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (I.3)$$

## I.3. Technologies de séchage

### I.3.1. Séchage au soleil

La teneur élevée en sucre et en acide des fruits permet de les sécher au soleil en toute sécurité. Les légumes et les viandes ne sont pas recommandés pour le séchage au soleil. Les légumes sont faibles en sucre et en acide. Cela augmente les risques de détérioration des aliments. Les viandes sont riches en protéines, ce qui les rend idéales pour la croissance microbienne lorsque la chaleur et l'humidité ne peuvent pas être contrôlées. Pour sécher au soleil, les jours chauds, secs et venteux sont les meilleurs. Une température minimale de 30°C est nécessaire, les températures plus élevées étant meilleures. Il faut plusieurs jours pour sécher les aliments à l'extérieur. Le séchage au soleil peut être risqué car le temps est incontrôlable. De plus, un taux d'humidité élevé est un problème. Une humidité inférieure à 60 % est idéale pour le séchage au soleil. Souvent, ces conditions idéales ne sont pas disponibles lorsque les fruits mûrissent. Les fruits séchés au soleil sont placés sur des plateaux faits de grillage en inox ou de chevilles en bois. Ces plateaux sont placés sur des blocs pour permettre une meilleure circulation de l'air autour des aliments [3].

Comme le sol peut être humide, il est préférable de placer les grilles sur une allée en béton ou si possible sur une feuille d'aluminium. La réflexion du soleil sur le métal augmente la température de séchage. Il faut couvrir les plateaux avec une étamine pour aider à protéger les fruits des oiseaux ou des insectes. Les fruits séchés au soleil doivent être couverts ou mis à l'abri la nuit. L'air frais de la nuit se condense et peut redonner de l'humidité aux aliments, ralentissant ainsi le processus de séchage.

### I.3.2. Séchage solaire

Le séchage solaire utilise également le soleil comme source de chaleur. Une surface en aluminium à l'intérieur du déshydrateur aide à augmenter la température. La ventilation

accélère le temps de séchage. Les temps de séchage plus courts réduisent les risques de détérioration des aliments ou de développement de moisissures.

### **I.3.3. Lyophilisation**

La lyophilisation, également connue sous le nom de cryodessiccation, est un processus de déshydratation généralement utilisé pour conserver un matériau périssable ou rendre le matériau plus pratique pour le transport. La lyophilisation fonctionne en congelant le matériau, puis en réduisant la pression environnante pour permettre à l'eau gelée dans le matériau de se sublimer directement de la phase solide à la phase gazeuse.

### **I.3.4. Séchage au four**

En combinant les facteurs de chaleur, de faible humidité et de débit d'air, un four peut être utilisé comme déshydrateur. Le four est nécessaire pour la cuisine quotidienne, donc il ne peut pas être satisfaisant pour conserver les produits. Le séchage au four est plus lent que les déshydrateurs car il n'y a pas de ventilateur intégré pour le mouvement de l'air. (Cependant, certains fours à convection ont un ventilateur). Il faut environ deux fois plus de temps pour sécher les aliments dans un four que dans un déshydrateur. Ainsi, le four n'est pas aussi efficace qu'un déshydrateur et consomme plus d'énergie.

## **I.4. Classification des séchoirs**

Tous les systèmes de séchage peuvent être classés principalement en fonction de leurs plages de température de fonctionnement en deux groupes principaux : séchoirs à haute température et séchoirs à basse température. Cependant, les séchoirs sont plus communément classés en fonction de leurs sources de chauffage en séchoirs à combustible fossile (plus communément appelés séchoirs conventionnels) et séchoirs à énergie solaire. Strictement, toutes les conceptions pratiquement réalisées de séchoirs à haute température sont alimentées par des combustibles fossiles, tandis que les séchoirs à basse température sont des systèmes à combustible fossile ou à énergie solaire.

### **I.4.1. Système passif**

Les séchoirs solaires passifs sont également appelés systèmes à circulation naturelle ou à convection naturelle. Ils sont généralement d'une taille appropriée pour une utilisation à

la ferme. Les séchoirs solaires à circulation naturelle dépendent entièrement de l'énergie solaire pour leur fonctionnement. Dans de tels systèmes, l'air chauffé par le soleil circule à travers le produit par les forces de flottabilité ou à la suite de la pression du vent.

#### I.4.1.1. Séchoir tente

Les séchoirs tentes, comme le montre la figure I.3 sont peu coûteux et simples à construire et consistent en un cadre de poteaux en bois recouvert d'une feuille de plastique. Les aliments à sécher sont placés sur une grille au-dessus du sol. Les temps de séchage ne sont cependant pas toujours très inférieurs à ceux du séchage à l'air libre. Le but principal de ces séchoirs, est de fournir une protection contre la poussière, la saleté, la pluie, le vent ou les prédateurs et ils sont généralement utilisés pour les fruits, les poissons, le café ou d'autres produits. Ces séchoirs peuvent également être démontés et stockés lorsqu'ils ne sont pas utilisés. L'inconvénient majeur de ce type de séchoir est qu'il facilement endommagé par les vents violents.

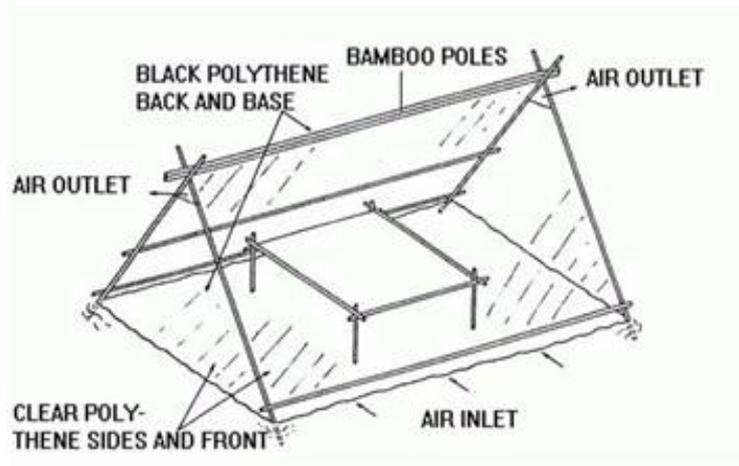


Figure I.3 : Séchoir tente [4].

#### I.4.1.2. Séchoir à caisson

Le séchoir solaire de type boîte a été largement utilisé pour le séchage des aliments à petite échelle. Il se compose d'une boîte en bois avec un couvercle transparent. L'intérieur est peint en noir et les aliments sont supportés sur un plateau en filet. L'air pénètre dans la chambre par des trous à l'avant et sort par des événements en haut de la paroi arrière.

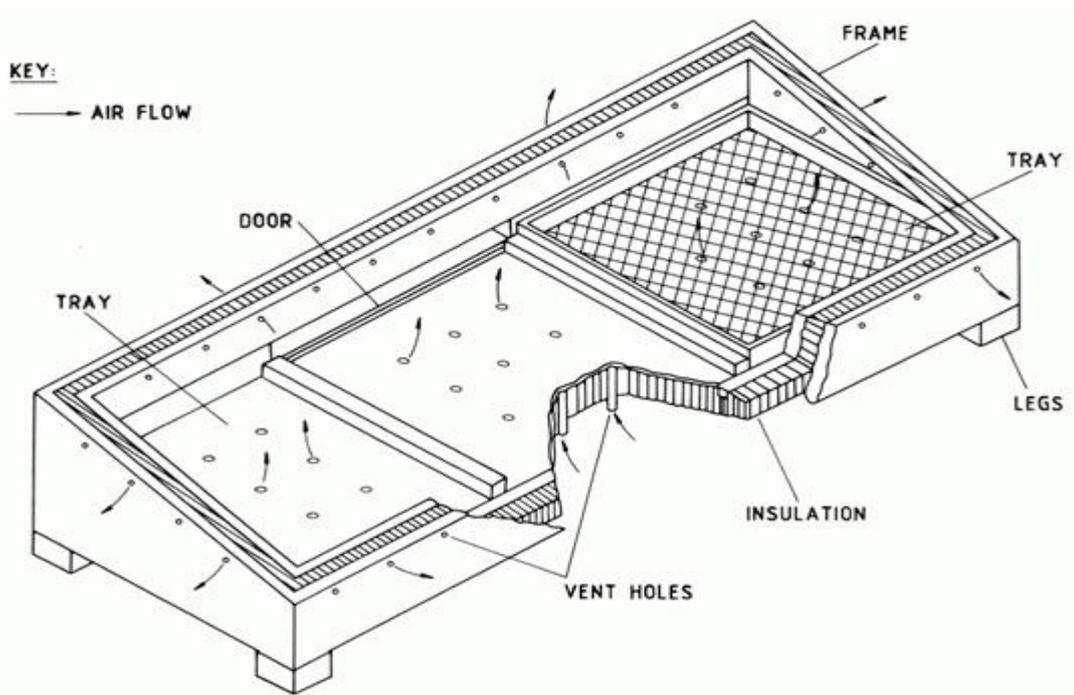
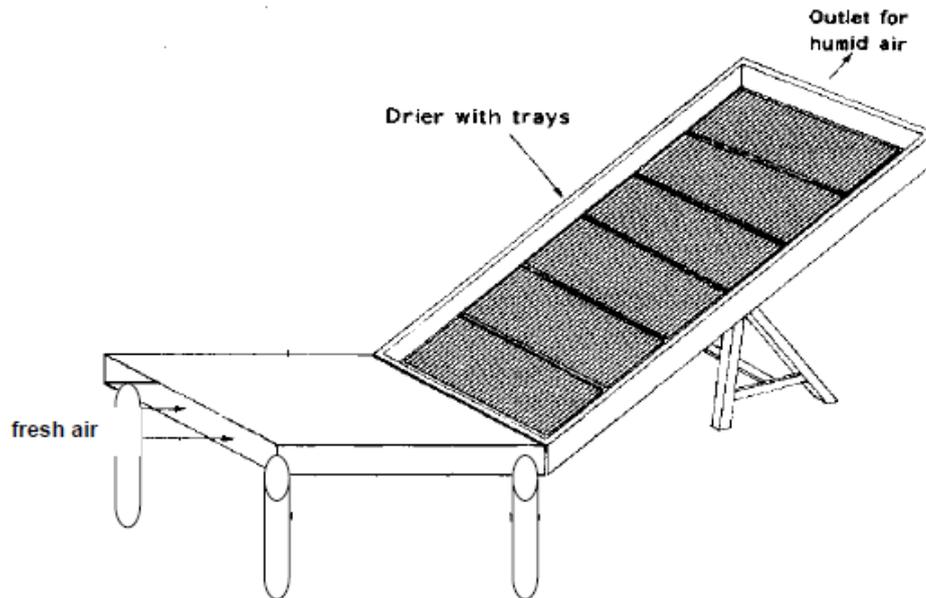


Figure I.4 : Séchoir à caisson [5].

#### I.4.1.3. Séchoir à bascule

Le séchoir à bascule traditionnel [6] a un châssis rectangulaire rigide dont la longueur est 3 fois la largeur' reposant sur un support avec un axe. Ce support est orienté nord-sud et suffisamment haut pour permettre une inclinaison de la charpente de  $30^\circ$  vers l'est le matin et vers l'ouest l'après-midi.

Le produit est placé sur un certain nombre de plateaux, qui ont un cadre en bois de 100 x 50 cm et un fond en maille, qui peut être constitué de divers matériaux, tels que des grillages, de vieux filets de pêche, des treillis en bambou ou tout autre matériau qui permettra une circulation verticale de l'air et une évaporation maximale.



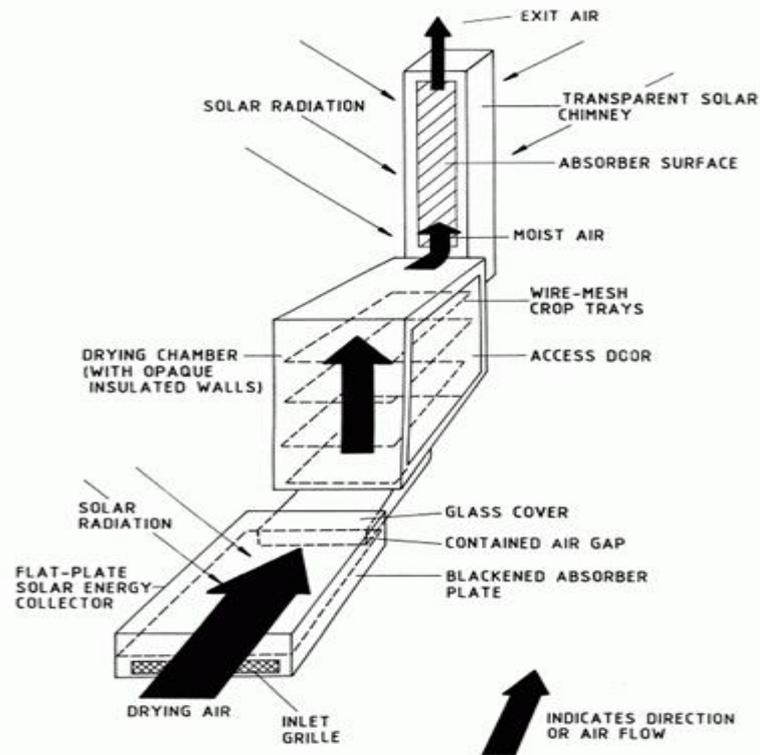
**Figure I.5.** Séchoir à bascule [6].

#### **I.4.1.4. Séchoir solaire à armoire**

La récolte est située dans des plateaux ou des étagères à l'intérieur d'une chambre de séchage. Si la chambre est transparente, le séchoir est appelé séchoir solaire de type intégral ou direct. Si la chambre est opaque, le séchoir est appelé séchoir solaire de type distribué ou indirect. Les séchoirs à mode mixte combinent les caractéristiques du type direct et indirect.

Dans la plupart des cas, l'air est réchauffé lors de son écoulement à travers un capteur solaire et passe à travers des conduites d'air dans la chambre de séchage et sur des plateaux de séchage contenant les récoltes. L'air humide est ensuite évacué par des bouches d'aération ou une cheminée en haut de la chambre.

L'armoire est une grande boîte en bois ou en métal. Il doit être correctement isolé pour minimiser les pertes de chaleur et rendu durable. Construction à partir de tôles ou de revêtements résistants à l'eau est recommandée.



**\*Figure I.6 :** Séchoir à armoire (mode indirect) [5].

#### I.4.2. Séchoirs solaires actifs

Les séchoirs solaires actifs sont également appelés séchoirs solaires à convection forcée ou hybrides. Un flux d'air optimal peut être fourni dans le séchoir tout au long du processus de séchage pour contrôler la température et l'humidité dans de larges plages indépendamment des conditions météorologiques. De plus, la profondeur apparente est moins restreinte et le débit d'air peut être contrôlé. Ainsi, la capacité et la fiabilité des séchoirs sont considérablement augmentées par rapport aux séchoirs à convection naturelle.

Il est généralement admis que les séchoirs solaires à convection forcée bien conçus sont plus efficaces et plus contrôlables que les types à circulation naturelle.

L'utilisation de la convection forcée peut réduire le temps de séchage de trois fois et diminuer la surface de capteur requise de 50 %. Par conséquent, un séchoir utilisant des ventilateurs peut atteindre le même débit qu'un séchoir à convection naturelle avec un collecteur six fois plus grand [7]. Les ventilateurs peuvent être alimentés en électricité si disponible ou avec un panneau solaire photovoltaïque.

Presque tous les types de séchoirs à convection naturelle peuvent également fonctionner par convection forcée.

#### **I.4.2.1. Séchoirs solaires actifs avec armoire ventilée**

Si l'électricité du service public est disponible, il est moins cher de connecter les ventilateurs au réseau, par rapport à une connexion à une installation PV. Outre les ventilateurs, un contrôleur électronique peut également être connecté au réseau, capable de régler la température appropriée en fonction de la vitesse variable du ventilateur.

Dans un système alimenté par un panneau photovoltaïque, le ventilateur est directement couplé au module solaire, fonctionnant sans accumulateur ni régulateur de charge. L'augmentation du rayonnement solaire augmente la puissance du module, accélérant ainsi le ventilateur. Cela présente l'avantage de permettre un contrôle simple de la température, évitant ainsi tout dispositif de contrôle supplémentaire tant que le système est dimensionné de manière appropriée.

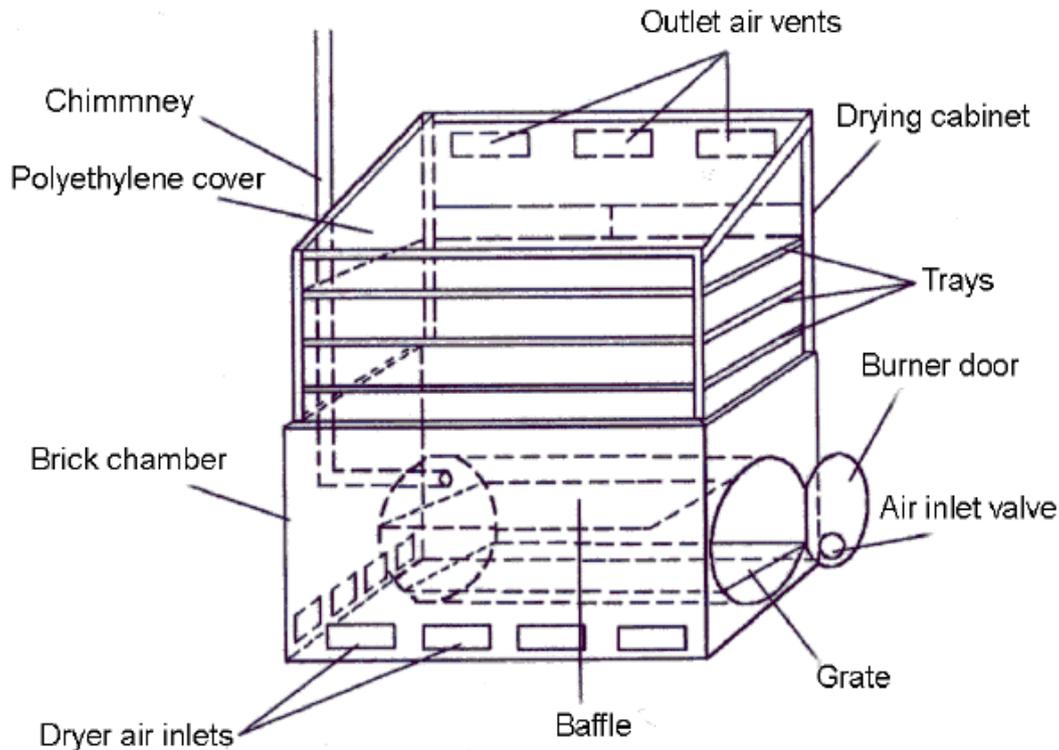


**Figure I.7** : Ventilateur alimenté par un panneau photovoltaïque.

#### **I.4.2.2. Séchoirs avec chauffage d'appoint**

Un inconvénient important des séchoirs solaires est qu'ils ne sont normalement utilisés avec aucune forme de chauffage d'appoint. Pour les producteurs commerciaux, ce facteur limite leur capacité à transformer une récolte lorsque le temps est mauvais. Cela prolonge

également le temps de séchage car le séchage ne peut se produire que pendant la journée lorsque le rayonnement solaire est suffisant. Cela limite non seulement la production, mais peut entraîner un produit de qualité inférieure. Pour les producteurs commerciaux, la capacité de traiter en continu avec fiabilité est importante pour satisfaire leurs marchés [8]. Donc, il est nécessaire d'ajouter un système d'appoint pour remédier ce problème.

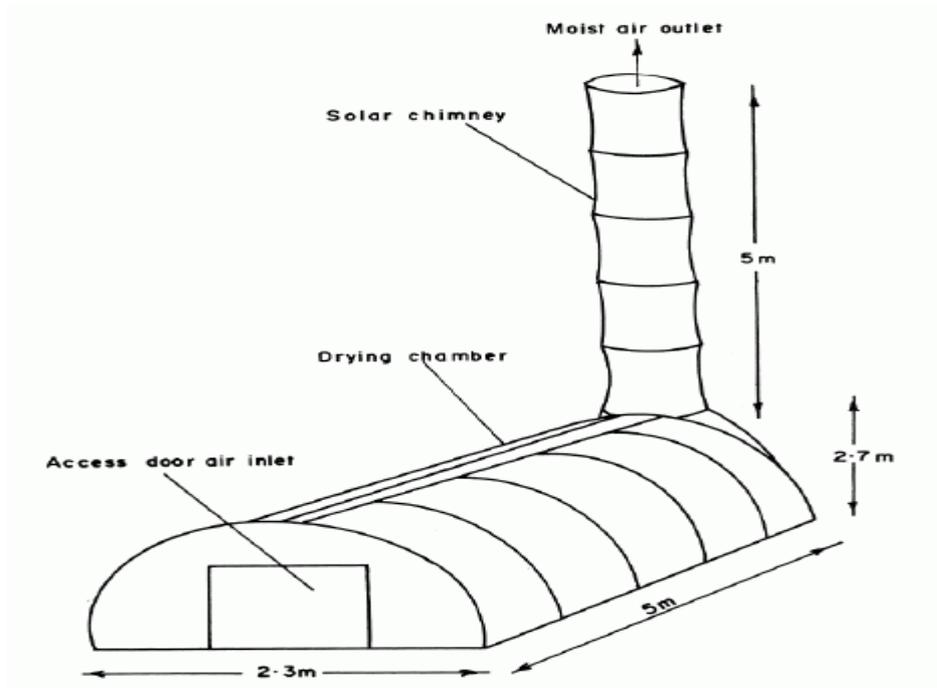


**Figure I.8 :** Séchoir à convection naturelle avec appoint.

### I.4.3. Séchoirs à effet de serre

L'idée d'un séchoir à effet de serre est de remplacer la fonction du capteur solaire par un système de serre. Le toit et le mur de ce séchoir solaire peuvent être constitués de matériaux transparents tels que du verre, de la fibre de verre ou des feuilles de polycarbonate. Les matériaux transparents sont fixés sur un support de cadre en acier ou des piliers avec des boulons et des écrous et une garniture en caoutchouc pour empêcher l'air humide ou l'eau de pluie de s'infiltrer dans la chambre autres que ceux introduits par l'ouverture d'entrée. Pour améliorer l'absorption du rayonnement solaire, des surfaces noires doivent être prévues à l'intérieur de la structure. Les ventilateurs d'admission et d'extraction sont placés à la bonne position dans la structure pour assurer une distribution uniforme de l'air de séchage.

Les séchoirs à effet de serre permettent un plus grand degré de contrôle sur le processus de séchage que les séchoirs à armoire et ils sont plus appropriés pour le séchage à grande échelle [9].



**Figure I.9:** Séchoir à effet de serre avec cheminée [5].

## I.5. Conclusion

Le séchage des aliments permet d'améliorer leur durée de conservation, de minimiser les pertes lors du stockage et de réduire les coûts de stockage et de transport. Afin de maîtriser les techniques de séchage, nous avons procédé à la réalisation d'un séchoir solaire. Afin d'avoir les critiques sur cette réalisation et de connaître les modifications et corrections qu'il faut apporter nous avons choisi de présenter ce modeste travail.

Nous avons opté pour un séchoir solaire indirect et ce pour les avantages qu'il présente essentiellement sa caractéristique de préserver la qualité du produit séché telle que sa couleur, sa saveur et sa valeur nutritionnelle.

## CHAPITRE II

# Positionnement du problème

### Sommaire

II.1.	Introduction .....	17
II.2.	Position du problème .....	17
II.3.	Fourniture et les éléments constitutifs du séchoir solaire .....	19
II.4.	Instrumentation.....	22
II.5.	Réalisation du séchoir.....	25
II.6.	L'intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur .....	26
II.7.	Rétrécissement de la veine d'air .....	28
II.8.	Produits à sécher.....	28
II.9.	Protocole expérimentale .....	30
II.10.	Rendement du capteur .....	31
II.11.	Conclusion.....	31

## II.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la description générale du prototype expérimental réalisé dans le cadre de ce mémoire de master dont nous préciserons avec détails les différentes étapes de réalisation et d'assemblage de tous les éléments constitutifs.

Nous considérons un séchoir solaire compact de type indirect à convection forcée destiné à sécher divers produits agroalimentaires. Il est adapté à la vie nomade. Le choix des différents matériaux a été fait selon la disponibilité sur le marché, le coût de revient du produit, la facilité d'usinabilité et la sécurité alimentaire.

## II.2. Position du problème

Cette partie donne un aperçu du prototype expérimental réalisé au laboratoire de recherche ETAP de l'université de Tlemcen. Nous considérons un séchoir solaire écologique fabriqué en bois, de type indirect, à convection forcée (figure II.1). Ce séchoir est destiné à une utilisation familiale ou pour une petite exploitation agricole. Le séchoir a été instrumenté de sorte à pouvoir étudier son comportement thermique ainsi que la cinétique de séchage du produit à sécher.

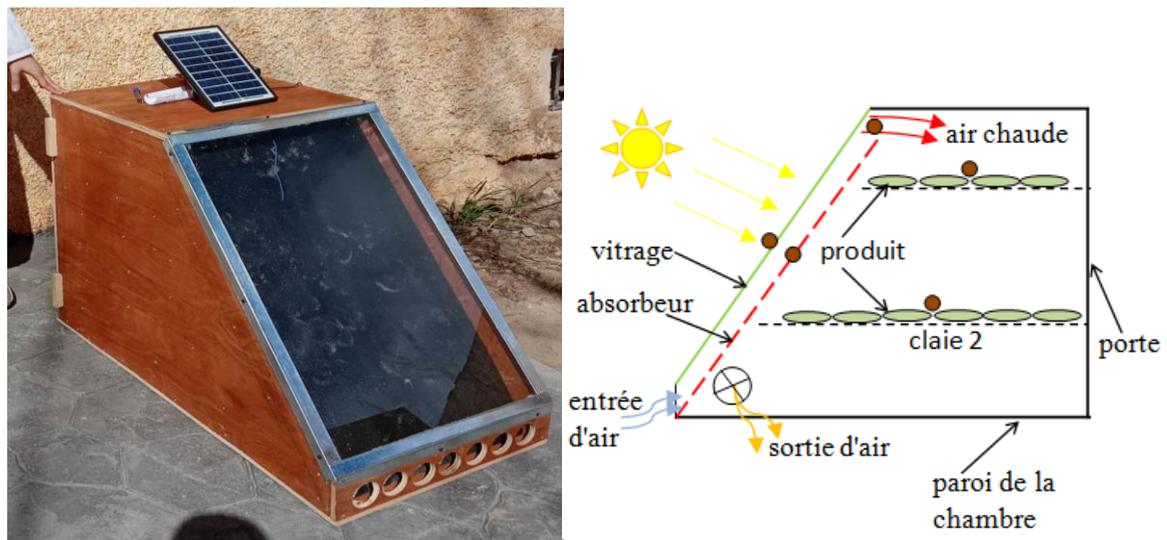
Cette étude est réalisée pour comparer deux processus de séchage solaire: le séchage à l'air libre (traditionnel) et par un séchoir solaire. Comme produit à séché, nous avons choisi les poivrons verts.

Le séchoir solaire a été conçu selon les conditions climatiques de notre région. Nous avons pris en considération un angle d'inclinaison que nous avons déterminé en fonction de la position moyenne du soleil. Le séchoir solaire est construit de manière à ce que les rayons du soleil ne puissent pas atteindre directement le produit.

Le séchoir solaire est composé essentiellement de deux parties: un capteur solaire et une chambre de séchage.

- Le capteur solaire à absorbeur plan, d'une surface de captation de  $0.82 \times 0.50 \text{ m}^2$ , incliné de  $45^\circ$  (déterminé en fonction de la position moyenne du soleil) et orienté vers le sud est placé en avant de la chambre de séchage. Le rayonnement solaire incident sur le capteur est transmis par un vitrage en verre ordinaire et est absorbé par une plaque absorbante en acier galvanisé peinte en noire de 2 mm d'épaisseur.

- Le flux d'air circule dans un espace de 0,07 m entre l'absorbeur et le verre, assurant le renouvellement et la circulation du flux d'air à travers le capteur.
- Le capteur solaire absorbe le rayonnement solaire pour le transformer, grâce à un fluide caloporteur (l'air de séchage), en énergie thermique. Cela chauffe l'air et l'introduit dans la chambre de séchage. Des trous régulièrement espacés sont percés à l'entrée du capteur pour assurer une circulation d'air uniforme.
- La chambre de séchage sous forme d'un caisson en bois multicouche est couplée directement au capteur construisant un séchoir compact. Elle est constituée de plusieurs claies sur lesquelles s'étale le produit à sécher. Les claies recouvertes d'un filet de protection, sont superposées à une distance de 10 cm. La plus grande claie étant située en bas, et la plus petite en haut (pour cette étude nous avons utilisé deux claies seulement, claie1 en haut et claie 2 en bas).
- L'air chaud venant du capteur s'écoule directement à travers les claies pour sécher les produits alimentaires (les menthes).
- Le renouvellement d'air dans le séchoir est assuré grâce à un extracteur d'air fixé à la partie gauche en bas de la chambre de séchage. Cela permet d'extraire l'air humide vers l'extérieur.



Le tableau II.1 présente les différents éléments de montage ainsi leurs dimensionnements et la quantité :

**Tableau II. 2:** Dimensions et quantité des éléments.

N° Article	Elément	Dimension (cm)	Quantité
1	Base	100× 52.4	01
2	Entrée d'air	7× 52.4	01
3	Paroi droite	50× 100× 70	01
4	Paroi gauche	50× 100× 70	01
5	Porte	52.4× 70	01
6	Toit	52.4× 50	01
7	Vitre	52.4× 78	01
8	Claie 1	49× 57	01
9	Claie 2	49× 57	01
10	Poignée	Standard	01
11	Ventilateur extracteur	8.5 (diamètre)	01
13	Cellule solaire		01

### II.3. Fourniture et les éléments constitutifs du séchoir solaire

#### II.3.1. Panneau en contreplaqué multiplié

Les panneaux multiples, également appelés panneaux à trois plis ou contreplaqués à trois plis, sont un type de panneau souvent utilisé dans la fabrication de meubles.

Le panneau multicouche fait également partie des panneaux artificiels, qui sont une combinaison de placages perpendiculaires les uns aux autres dans le sens du fil du bois. Il présente les avantages suivants : légèreté, qualité, excellente élasticité et résistance.

Ce type des panneaux est utilisé pour les parois de la chambre (Figure II.2).



**Figure II. 2:** Panneau en contreplaqué multiplié.

### II.3.2. Vitrage

L'énergie solaire entrant dans un local à travers un vitrage est absorbée par les objets et les parois intérieures qui en s'échauffant, réémettent un rayonnement thermique situé principalement dans l'infrarouge (supérieur à  $5 \mu\text{m}$ ).

Le verre ordinaire transparent, est pratiquement opaque à la radiation de longueur d'onde supérieure à  $5 \mu\text{m}$ . L'énergie solaire entrant par le vitrage se trouve donc piégée dans le local qui a tendance à s'échauffer : c'est "l'effet de serre" que l'on constate. Pour ces avantages, il est utilisé comme vitrage dans notre prototype (figure II.3).



**Figure II. 3:** Verre ordinaire transparent

### II.3.3. Plaque métallique

C'est un matériau en acier sous forme d'une tôle, large et de 2mm d'épaisseur, rigide utilisé comme absorbeur dans le capteur solaire (figure II.4).

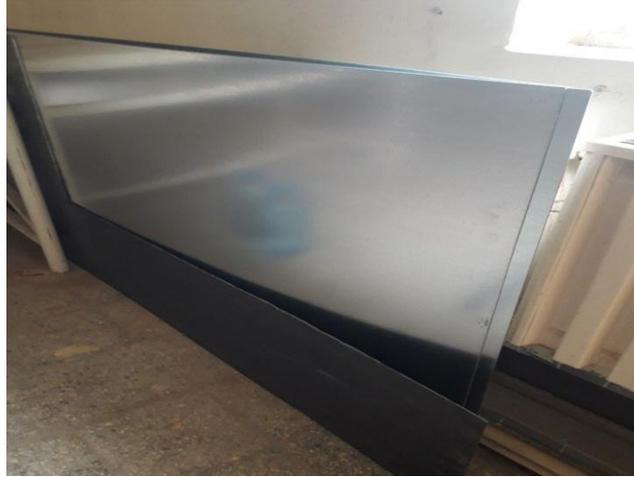


Figure II.4: Plaque métallique.

### II.3.4. Visserie

Pour l'assemblage des pièces on utilise des vis à bois et agglomérés, appelées vis VBA, de diamètre 3\*16 (21) qui ont la propriété de pouvoir être vissées sans avoir fait d'avant trou. Très pointues et filetées sur toute leur longueur, elles permettent de ne pas fissurer le bois durant le vissage (figure II.5).



Figure II. 5: Visseries.

### II.3.5. Ventilateur

Ventilateur d'extraction durable 12 V, avec les dimensions 0.12 x 0.12 x 0.025 m. Modèle : AFB0912H, Alimentation: 12V, Ampérage : 0.30 A, Consommation : 3.6 W, Débit d'air: 1.3 m<sup>3</sup>/min, Vitesse 2850 tr/mn. Il est utilisé pour assurer le renouvellement d'air à travers le séchoir solaire (figure II.6).



Figure II. 6: Ventilateur

## II.4. Instrumentation

### II.4.1. Mesure des températures

Les températures de l'air de séchage et de différents composants du séchoir sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K (figure II.7) connectés à un enregistreur pour enregistrer les valeurs de température en format Excel. Ces thermocouples permettent une précision qui varie de 0,1÷0,2°C.



**Figure II. 7:** Enregistreur de température et sa position sur le séchoir solaire indirect

Pour la mesure de la température ambiante et l'humidité au niveau des deux claies, nous avons utilisé deux thermomètres modèle LILYTECH ZL-7918A (figure II.8). La plage de mesure de température est (-50 à 1230 °C).



**Figure II.8:** Mesure de température et humidité

#### **II.4.2. Mesure du rayonnement solaire**

Un solarimètre est l'instrument utilisé pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire reçue par le capteur solaire en Watt par mètre carré (figure II.9).



**Figure II.9:** Solarimètre

### II.4.3. Mesure du poids

Il s'agit d'une balance SF-400 conçue pour la cuisine ou même pour l'atelier. Elle garantit un pesage précis même dans les zones très humides grâce à sa conception résistante aux éclaboussures. La balance de cuisine numérique fonctionne sur batterie, facile à utiliser (figure II.10).



**Figure II.10:** Instrument de mesure du poids

#### II.4.4. Cellule solaire

La cellule solaire est un assemblage des matériaux qui permet de convertir l'énergie lumineuse de rayonnement solaire en énergie électrique. Elle est utilisée pour alimenter le ventilateur d'extraction en électricité (figure II.11). Elle est placée sur la paroi haute de la chambre de séchage.



Figure II. 11: Cellule solaire.

### II.5. Réalisation du séchoir solaire

Afin de réaliser le séchoir solaire souhaité, on doit suivre plusieurs étapes organisées comme suit :

#### II.5.1. Découpage

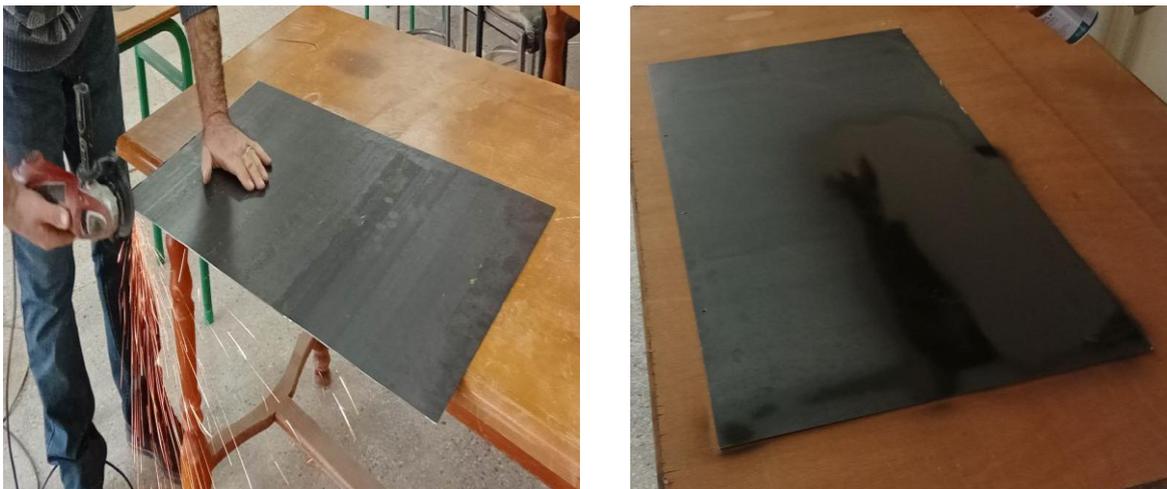
On va découper le bois selon les dimensions mentionnées précédemment à l'aide d'une scie sauteuse (figure II.12). Un outil idéal pour les coupes droites, mais sont particulièrement bonnes pour les coupes circulaires ou les coupes angulaires précises dans tous les matériaux. C'est l'outil idéal pour les coupes courbes et les endroits à accès difficiles.



**Figure II. 12:** Découpage du bois.

La scie sauteuse fait partie des outils électroportatifs réservés aux bricoleurs déjà avertis car elle offre la puissance requise pour couper du bois épais ou de grande taille, qu'il s'agisse de scier parfaitement droit ou en biseau.

Nous avons découpé aussi l'acier galvanisé on utilisant une scie circulaire, par la suite nous avons peint l'absorbeur par une peinture noir mate pour capter au maximum le rayonnement solaire (Figure II.13). A la fin nous avons coupé le verre par un coupe verre en diamant.



**Figure II. 13:** Découpage et peinture d'acier galvanisé.

### II.5.2. Assemblage des différents composants

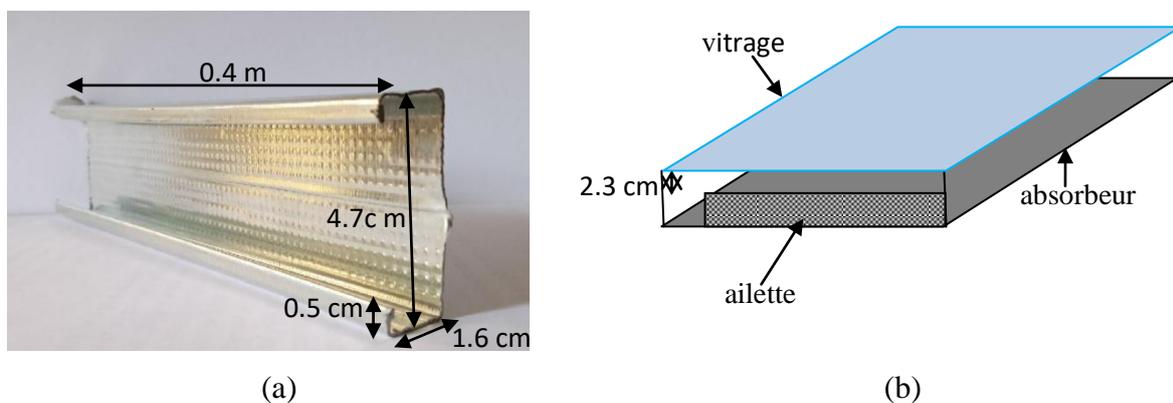
Après avoir découpé toutes les différentes pièces nous avons utilisé des vis à bois de diamètre (3 x 16) et des clous longs de 20 mm avec des supports en forme de U pour renforcer l'assemblage, pour cela nous avons utilisé un tournevis, un marteau et une visseuse (figure II.14).



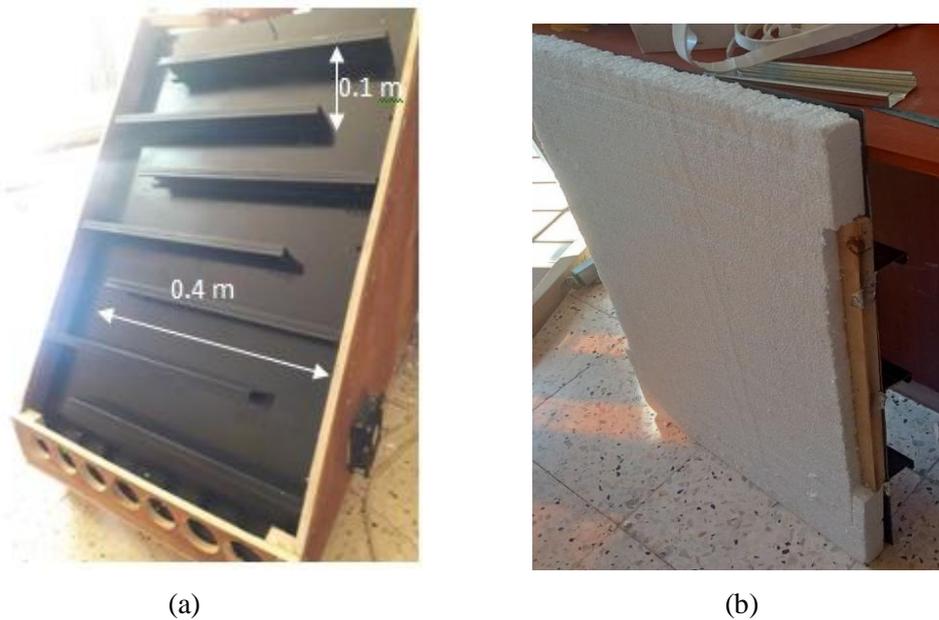
**Figure II.14:** Assemblage des pièces coupées.

## II.6. Intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur

Pour améliorer les performances thermiques du séchoir solaire indirect nous proposons d'intégrer des obstacles en aluminium sous forme de U peint en noir comme ailettes au niveau de l'absorbeur. Sept (07) ailettes de longueur 40 cm et de hauteur 4.7 cm (figure II.15.a) sont fixées perpendiculairement à l'absorbeur avec une distance entre ailettes de 10 cm (voir la figure II.16.a). La courbure sous forme de U est orientée face à l'écoulement d'air pour créer plus de turbulence. La hauteur de l'ailette est inférieure de la hauteur du canal d'air pour éviter tout contact rigide entraînant la cassure du vitrage (figure II.15.b). Nous proposons aussi d'isoler la face arrière de l'absorbeur avec une feuille de polystyrène de 35 mm d'épaisseur pour minimiser les pertes en aval de l'absorbeur (figure II.15. b).



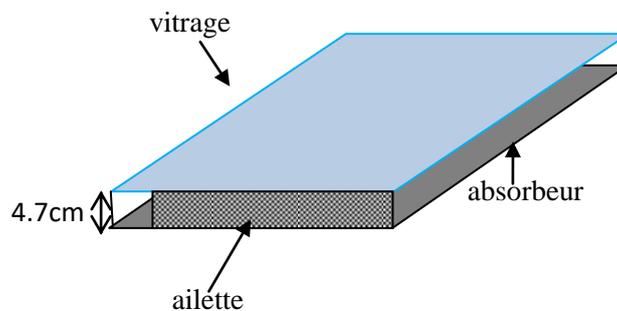
**Figure II. 15:** (a) Dimensions de l'ailette, (b) Schéma des positions des ailettes par rapport au vitrage et l'absorbeur.



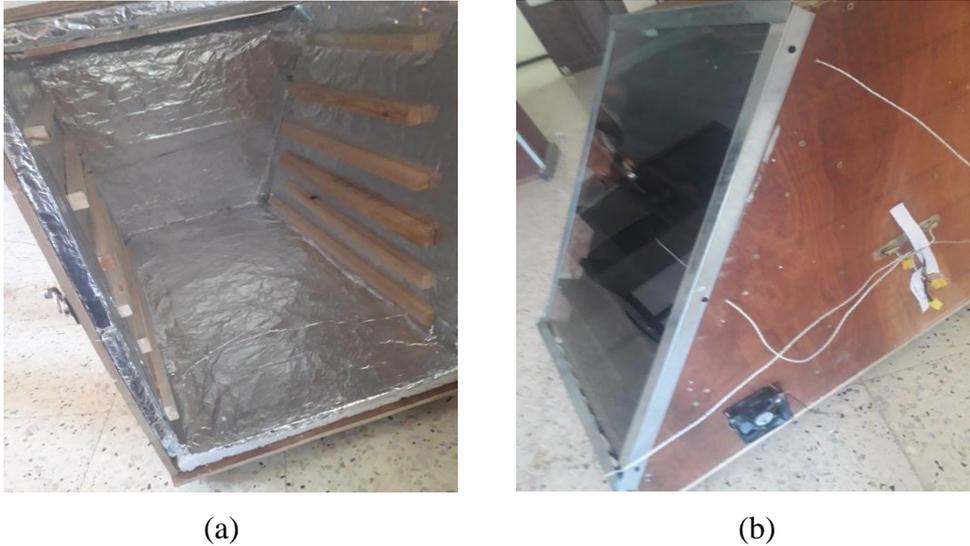
**Figure II. 16:** (a) Intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur, (b) Isolation de la face inférieure de l'absorbeur.

## II.7. Rétrécissement de la veine d'air

Pour mettre en évidence l'effet de la distance entre l'absorbeur et le vitrage sur le comportement thermique du capteur, nous avons réduit cet espace de 0.07 m à 0.047 m (la même hauteur de l'ailette, figure II.17). Nous avons isolé aussi toutes les parois de la chambre de séchage avec une feuille de polystyrène de 20 mm d'épaisseur pour minimiser les pertes thermiques vers l'air ambiant (figure II.18).



**Figure II. 17:** Schéma de rétrécissement de la veine d'air.



**Figure II. 18:** (a) Isolation des parois de la chambre, (b) Vue finale du séchoir solaire.

## II.8. Produits à sécher

Cette partie présente les produits séchés lors de cette opération. Les produits sélectionnés sont le poivron, tomate, fraise et pomme. Tous ces produits sont achetés du marché local à Tlemcen.

Au début les produits sont lavés puis tranchés finement. Chaque produit est réparti sur trois claies de séchages, 1 en haut de la chambre et 2 en bas de la chambre et la 3<sup>ème</sup> claie pour le séchage à l'air libre.

### II.8.1. Poivron

La masse des poivrons déposée sur la claie1, 2 et 3 est 160g, 159g et 158 g, respectivement répartie sur les trois claies.



**Figure II. 19:** Poivron avant séchage

### II.8.2. Tomate

La masse des tomates déposée sur la claie 1, 2 et 3 est 536 g, 711 g et 507 g, respectivement répartie sur les trois claies.



**Figure II. 20:** Tomate avant séchage

### II.8.3. Fraise

La masse des fraises déposée sur chaque claie est 230 g.



**Figure II. 21:** Fraise avant séchage

### II.8.4. Pomme

La masse des pommes déposée sur chaque claie est 300 g,



**Figure II. 22:** Pomme avant séchage

## II.9. Protocole expérimental

Les produits à sécher sont coupés en petite rondelles de faible épaisseur pour faciliter le séchage. Ces échantillons sont pesés puis uniformément réparties sur les trois claies.

Avant d'introduire les produits à sécher, il faut attendre au minimum 30 min pour que le séchoir atteigne un régime thermique établi. Les poids des produits humides sont relevés à l'extérieur du séchoir toutes les 30 minutes.

Une mesure à l'instant  $t$  donne la masse humide du produit  $X_h(t)$ . Le test de séchage se termine lorsque deux mesures consécutives de masse de produit se rapprochent.

## II.10. Rendement du capteur

La puissance calorifique d'un capteur plan est déterminée par le rendement instantané [10]:

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile sur la surface du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le capteur}}$$

Donc le rendement peut être écrit comme suit :

$$\eta = \frac{\dot{m} \times C_p \times (T_{sc} - T_e)}{I_g \times A_c \times \alpha \times \tau} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\eta$  : Rendement du capteur.

$\dot{m}$  : Débit massique de l'air [kg/s]

$C_p$  : Chaleur spécifique [J/kg.K]

$T_s$  : Température de l'air à la sortie du capteur [K]

$T_e$  : Température de l'air à l'entrée du capteur (température ambiante) [K]

$I_g$  : Densité du flux solaire globale incident [ $W/m^2$ ]

$A_c$  : Surface de l'absorbeur [ $m^2$ ]

$\alpha$ : Coefficient d'absorption de l'absorbeur

$\tau$ : Coefficient de transmission du vitrage

## II.11. Conclusion

D'après tous ce que nous avons détaillés sur la conception et la mise en marche du prototype visé; on conclue que l'objectif visé à construire un séchoir solaire est bien atteint. Nous allons maintenant le tester par des essais de séchage de quelques produits locaux sous différents conditions climatiques.

---

## CHAPITRE III

---

# Résultats et interprétations

---

### Sommaire

III.1.	Introduction .....	34
III.2.	Etude de comportement thermique du séchoir solaire indirect simple .....	34
III.3.	Etude de comportement thermique du séchoir solaire indirect avec ailettes .....	40
III.4.	Comparaison de séchage forcé et naturel de la tomate.....	43
III.5.	Effet du rétrécissement de la veine d'air .....	51
III.6.	Produits après séchage.....	53
III.7.	Conclusion.....	55

### III.1. Introduction

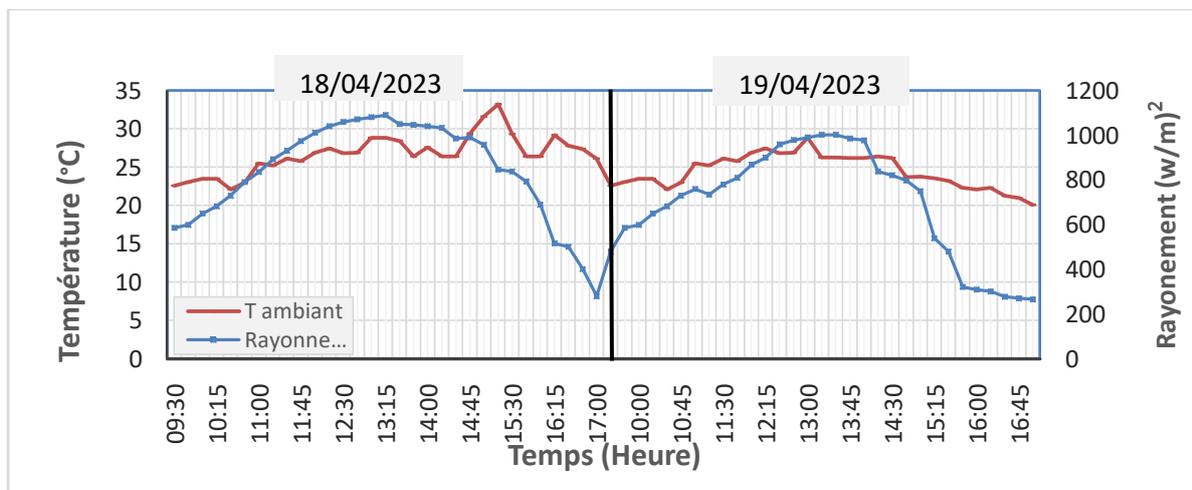
Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus des différentes expériences du processus de séchage utilisant le séchoir solaire indirect réalisé au sein du laboratoire Energétique et Thermique Appliquée ETAP. Le chapitre présente par la suite les résultats qui mettent en évidence l'influence d'intégrer des ailettes au niveau de l'absorbeur pour augmenter le transfert de chaleur dans le capteur solaire et l'effet de réduire la veine d'air sur les performances du séchoir.

### III.2. Etude du comportement thermique du séchoir solaire indirect simple

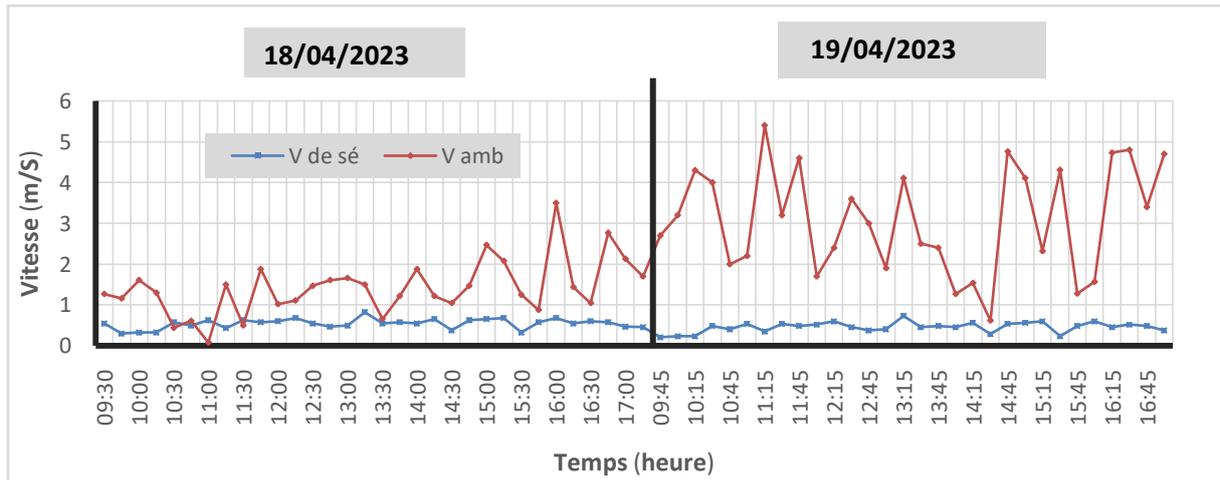
#### III.2.1. Conditions climatiques

Les tests se sont déroulés durant une période de deux jours les 18 et 19 Avril 2023 au niveau d'un espace découvert au sein de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen (Chetouane). Le rayonnement solaire (ensoleillement) et l'air ambiant sont des facteurs climatiques qui influent fortement sur le processus du séchage. La figure III.1 présente la variation temporelle du rayonnement solaire et de la température ambiante au cours de ces deux journées d'essai.

Tlemcen est une ville située au nord-ouest de l'Algérie à 800 m d'altitude. La température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de 11,1°C, celle du mois le plus chaud (août) est de 27,0 °C.



**Figure III.1:** Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire durant deux journées.



**Figure III.2:** Evolution de la vitesse de l'air ambiant et l'air à l'entrée du capteur solaire.

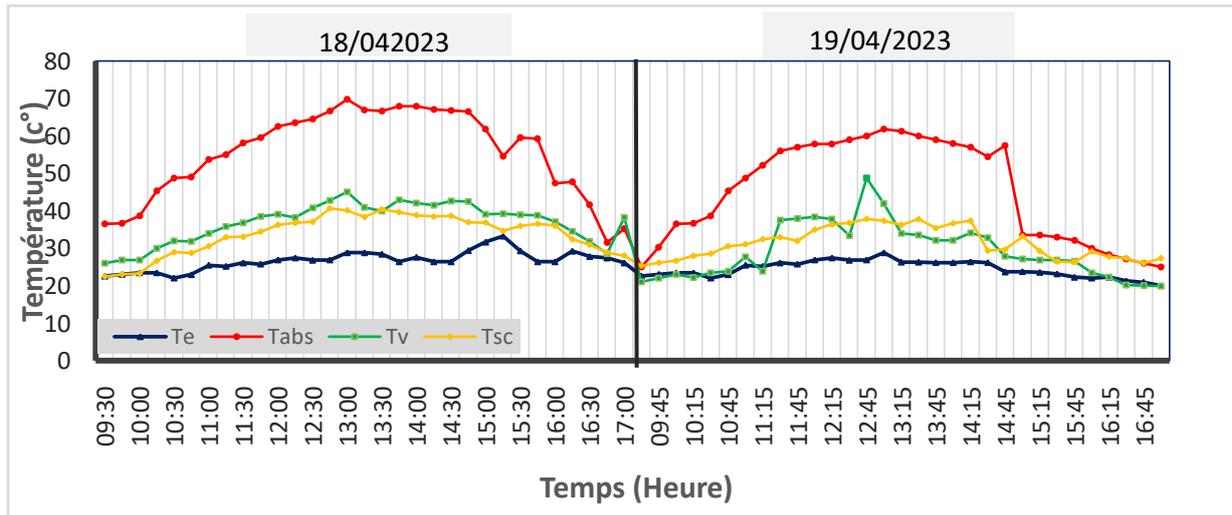
La figure III.1 montre une augmentation progressive de l'intensité du rayonnement solaire et de la température ambiante jusqu'à atteindre un maximum autour de 13:00 pour diminuer ensuite durant l'après-midi. On observe quelques fluctuations de puissance au niveau des graphes dues aux différents passages nuageux.

Les valeurs maximales enregistrées par le rayonnement solaire et la température ambiante sont de  $1091 \text{ W/m}^2$  et  $33.2^\circ\text{C}$  pour la première journée et  $1002 \text{ W/m}^2$  et  $27^\circ\text{C}$  pour la deuxième, respectivement. Il s'agit des conditions climatiques favorables pour le séchage solaire.

La Figure III.2 montre l'évolution de la vitesse de l'air ambiant et de l'air à l'entrée du séchoir. Il est intéressant de voir que la vitesse de l'air ambiant est plus importante que celle à l'entrée du séchoir donnant ainsi l'avantage au séchage à l'air libre. Néanmoins, les fluctuations enregistrées dans la vitesse de l'air ambiant rendent le contrôle du séchage libre assez difficile.

### III.2.2. Evolution de la température des composants du capteur solaire

La figure III.3 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour quatre positions différentes du capteur solaire: le centre de l'absorbeur ( $T_{abs}$ ), du vitrage ( $T_v$ ) ainsi que l'entrée ( $T_e$ ) et la sortie ( $T_{sc}$ ) du capteur.



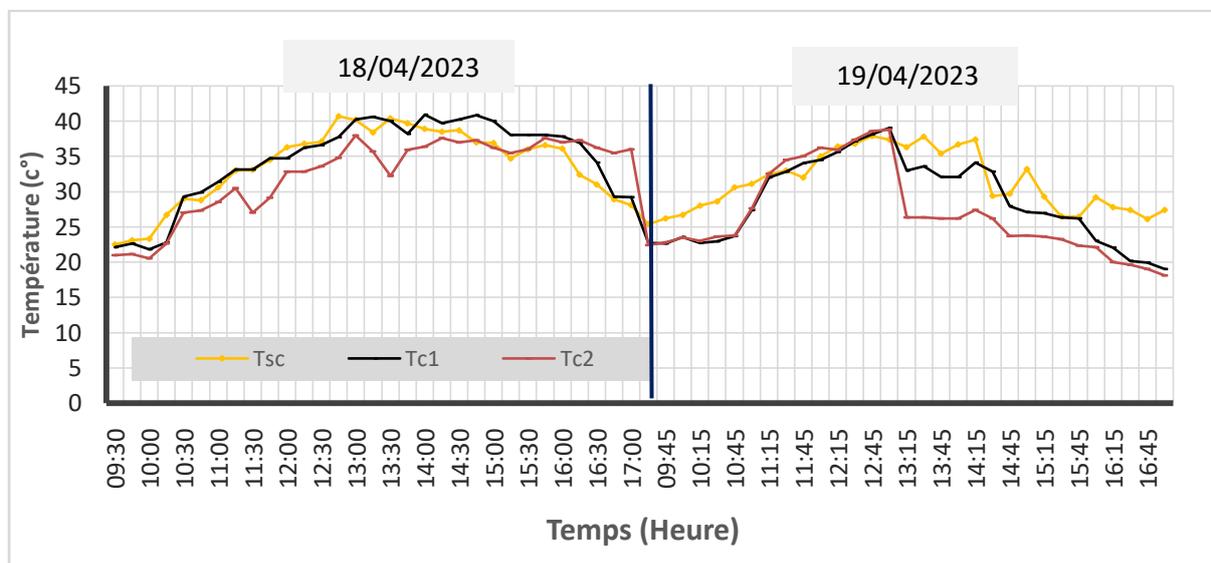
**Figure III.3:** Evolution horaire de la température des différents composants du capteur solaire

L'analyse de la figure III.3 montre une augmentation de la température des différents composants pendant la matinée suivie par une baisse l'après-midi. Durant la deuxième journée, une réduction rapide de la température de l'absorbeur suivie par la réduction des autres températures est remarquée à partir de 15h. Ce comportement suit bien l'évolution temporelle du rayonnement solaire et de la température ambiante durant les deux jours. Les températures maximales enregistrées pour l'absorbeur, le vitrage, l'air à l'entrée et à la sortie sont respectivement 69,8, 45, 34 et 40,7°C. Nous remarquons que la température de l'absorbeur est la plus élevée durant toute la journée, cela s'explique par son facteur d'absorption solaire important. L'absorbeur cède une partie de sa chaleur à l'air aspiré de l'extérieur provoquant son réchauffement progressif jusqu'à la sortie du capteur.

Une différence faible observée de l'ordre de 13°C entre l'air à l'entrée et à la sortie du capteur revient à la différence importante, de l'ordre de 29°C enregistrée entre la température de l'absorbeur et celle de l'air à la sortie du capteur réduisant ainsi le rendement thermique du capteur solaire. Cette différence est due d'une part à l'écoulement direct de l'air à travers le capteur réduisant ainsi la récupération de la chaleur, d'autre part aux pertes thermiques en aval de l'absorbeur. La différence maximale de température entre l'entrée et la sortie du capteur est d'environ 13,5°C. Donc, Il est utile de trouver une solution pour améliorer le transfert thermique entre l'absorbeur et l'air.

### III.2.3. Evolution de la température à travers la chambre de séchage

La figure III.4 présente l'évolution de la température en fonction du temps à différentes positions de la chambre de séchage : à l'entrée de la chambre de séchage ( $T_{es} = T_{sc}$ ), la claie 1 ( $T_{c1}$ ) et la claie 2 ( $T_{c2}$ ).



**Figure III. 4:** Evolution horaire des différentes températures au sein de la chambre de séchage.

Sur une bonne partie de la journée (entre 09:30 h et 13:30 h), l'air à l'entrée de la chambre enregistre la température maximale dans la chambre. En effet l'air chauffé dans le capteur solaire représente la source principale de la chaleur dans la chambre. Il s'oriente par la suite vers l'extérieure de la chambre passant par la claie 1 en suite la claie 2. Le passage de l'air par la claie 1 lui permet d'évacuer l'eau évaporée du produit. Cela conduit à la diminution de sa température avant d'arriver à la claie 2. Les températures maximales atteintes aux niveaux des deux claies 1 et 2 sont 41°C et 38°C, respectivement. Donc, un écart maximal de 6,3°C et 3,3 °C, respectivement est enregistré par rapport à l'air ambiant (34,7°C). Ensuite, la température de l'air ( $T_{es}$ ) diminue avec la diminution du rayonnement solaire. Cette diminution n'a pas un effet instantané sur les températures de la claie 1 et 2 car la chaleur stockée dans les parois de la chambre (bois) empêche la diminution directe de ces températures jusqu'à 16:15 h. A la fin de la première journée, la température de la claie 1 et 2 diminue rapidement avec un déphasage thermique due aux positions des deux claies.

Durant la deuxième journée, le comportement thermique dans la chambre diffère légèrement à cause de la variation des conditions climatiques, nous remarquons une légère

diminution du rayonnement solaire et de la température ambiante et une augmentation de la vitesse de l'air ambiant par rapport à la première journée.

La circulation de l'air est assurée à travers le séchoir grâce à un ventilateur alimenté en électricité par un panneau photovoltaïque. La diminution du rayonnement solaire provoque la diminution de la vitesse de l'écoulement d'air à travers le séchoir solaire. Entre 09:30 et 10:30, la vitesse de l'air est faible (0.1 m/s) et la convection naturelle domine le transfert thermique dans le séchoir. L'air dans le capteur s'échauffe et monte lentement à cause des forces de flottabilité. Dans la chambre, les claies de séchage reçoivent la chaleur à partir de deux sources, l'air chaud venant du capteur et la chaleur cédée par la surface inférieure de l'absorbeur. Cela explique l'égalité de la température des deux claies.

Ensuite, la vitesse de la circulation d'air augmente progressivement provoquant un écart de température entre les deux claies. La température maximale enregistrée pour les deux claies 38.8°C vers 13h.

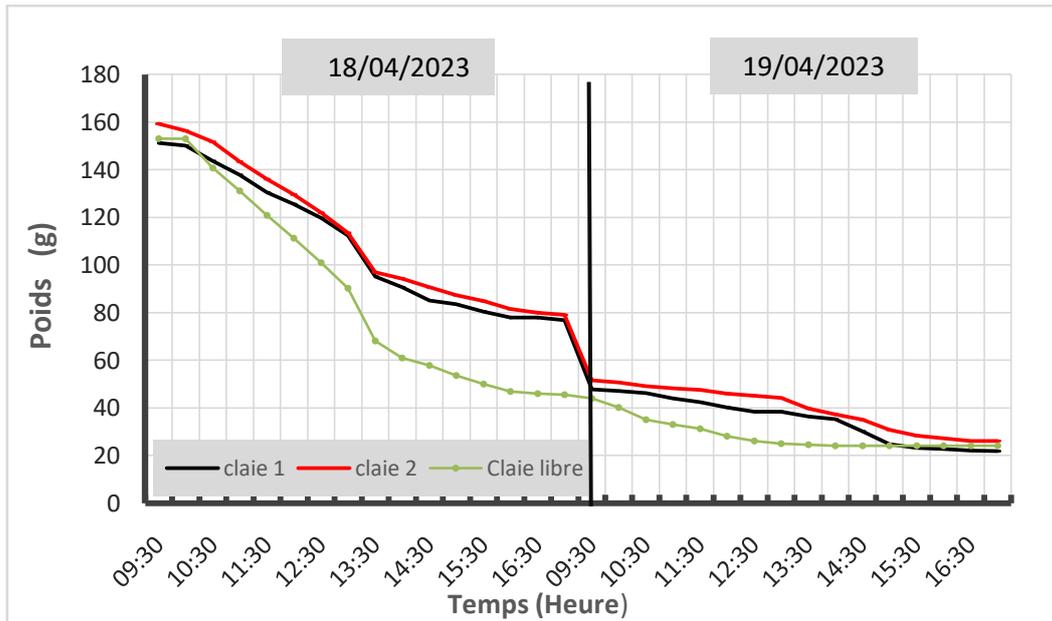
L'effet de la réduction de la température de l'air  $T_{es}$  est remarquable sur les températures des claies. Les parois de la chambre de séchage ont perdu leur pouvoir de stockage thermique à cause de la vitesse importante de l'air ambiant ce qui implique un refroidissement rapide des parois de la chambre (bois) par l'air ambiant.

L'écart maximal de température enregistrée entre l'air ambiant et les claies est 4°C.

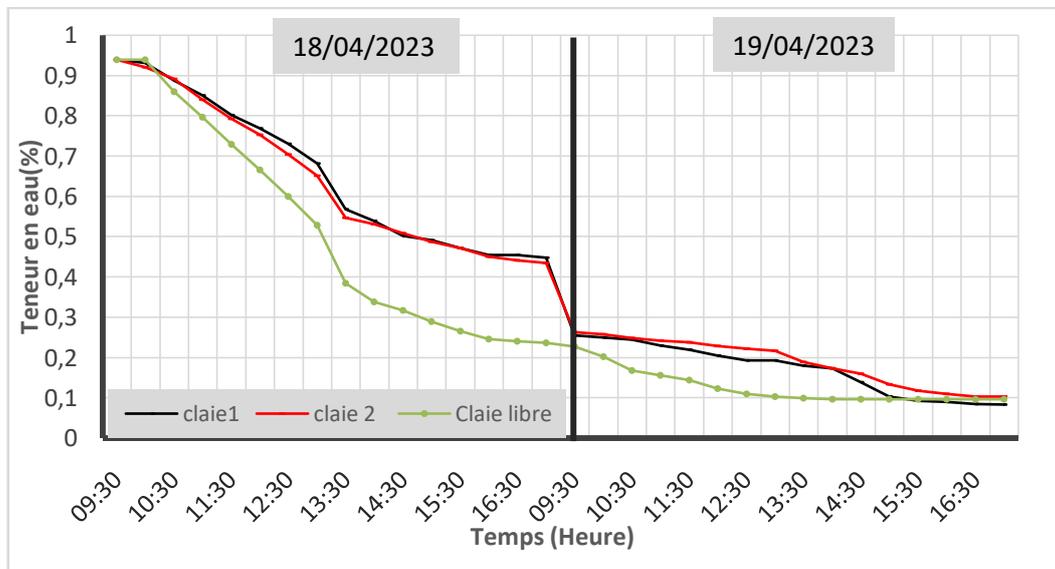
#### III.2.4. Cinétique de séchage

Pour tracer l'évolution temporelle de la teneur en eau du produit, on enregistre l'évolution de la masse humide des poivrons des claies au cours de séchage chaque 30 min jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée. Selon **J. M. F. Faustino et al [11]**, la teneur en eau initiale pour les poivrons verts est de l'ordre de 94.01% et la teneur en eau finale recommandée varie de 10 à 14% [12].

La masse initiale des poivrons est 160g, 159g et 158g pour les claies 1, 2 et 3 respectivement. La figure III.5 représente les variations de la masse et de la teneur en eau en fonction du temps pour les deux claies du séchoir indirect et celle à l'air libre. Il est remarqué un abaissement progressif de la masse des poivrons au cours du temps pour les trois claies. Les claies 1 et 2 montrent une évolution similaire avec une légère différence de 2g. La réduction de la masse des poivrons à l'air libre est plus rapide grâce au rayonnement solaire direct reçu et à la vitesse d'air libre enregistrée durant ces deux journées.



(a)



(b)

**Figure III. 5:** Variations (a) de la perte de masse et (b) de la teneur en eau au cours du temps.

A 16h de la deuxième journée, la masse des poivrons atteint 21,8, 26, 24g pour les claies 1,2 et 3 respectivement. Ensuite, une stabilisation de la masse est enregistrée marquant la fin de séchage.

L'évolution de la teneur en eau est similaire à celle de la masse du produit. Il est évident que, la teneur en eau est maximale au début de séchage puis elle se dégrade en cours du temps. Les courbes obtenues pour l'évolution de la teneur en eau montrent trois phases

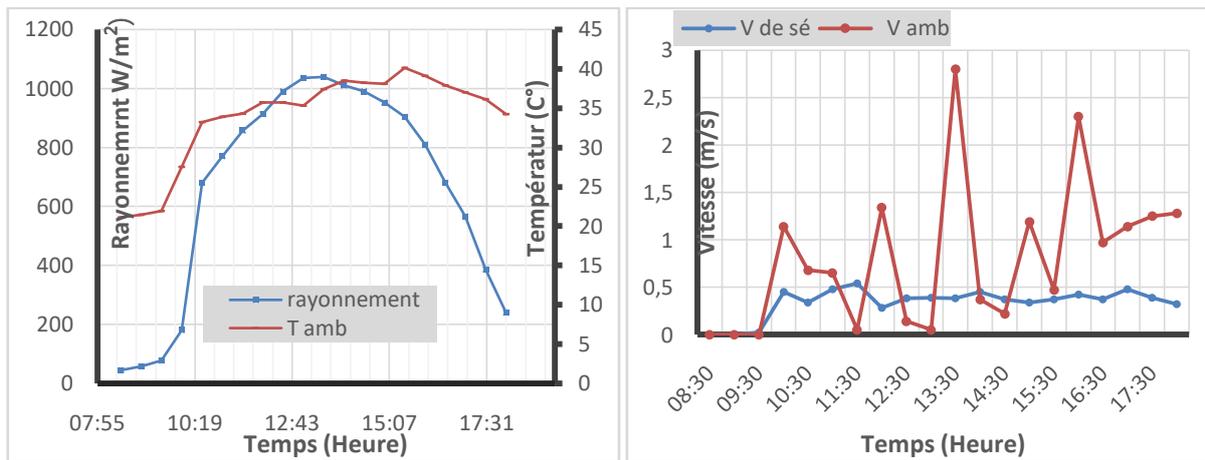
essentielles dans le processus de séchage. La première correspond à la phase de mise en température, elle est courte (environ 30 minutes) à cause de la teneur initial importante en eau (94.01%). La deuxième phase où la vitesse diminue rapidement correspondant à l'évacuation de l'eau libre. La phase 3 où la vitesse diminue lentement correspondant à l'évacuation de l'eau liée. La teneur en eau a diminué jusqu'à atteindre une valeur limite de 10%, la figure III.5 (b) est éloquent à ce propos.

### III.3. Etude de comportement thermique du séchoir solaire indirect avec ailettes

Pour mettre en évidence l'effet de l'intégration des ailettes et l'isolation de la face inférieure de l'absorbeur sur les performances du séchoir, nous avons testé le séchoir amélioré durant la journée du 27 Avril 2023 pour le même produit (les poivrons).

#### III.3.1. Conditions climatiques

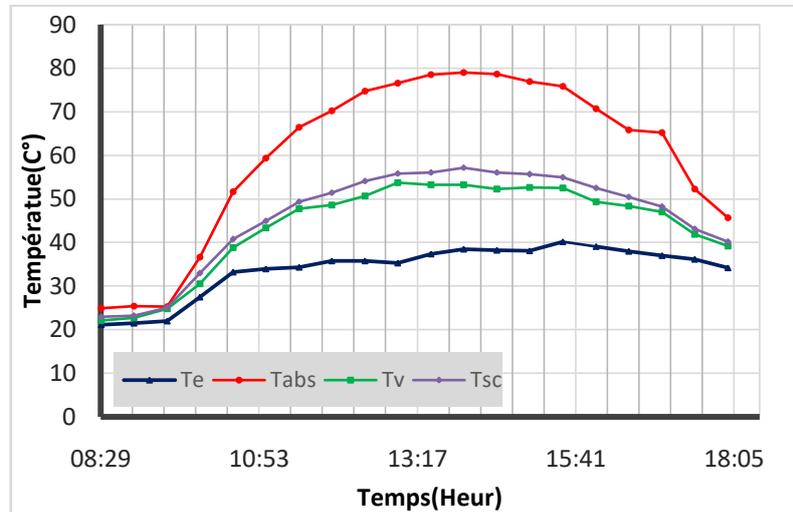
La figure III.6 présente la variation du rayonnement solaire et la température ambiante au cours de la journée d'essai. Un ciel clair et une température ambiante élevée ont marqué cette journée. Le rayonnement, la température et la vitesse d'air ambiant maximale enregistrés sont  $1039 \text{ W/m}^2$ ,  $40^\circ\text{C}$  et  $2.8 \text{ m/s}$ , respectivement.



**Figure III. 6:** Evolution de la température ambiante, rayonnement solaire, vitesse de l'air ambiant et vitesse à l'entrée capteur solaire 27/04/2023.

### III.3.2. Evolution de la température des composants du capteur

Le comportement thermique de différents composants du capteur solaire est similaire au premier cas (absorbeur simple). Une augmentation de la température de l'ensemble du capteur puis une baisse l'après-midi (figure III.7). La température maximale enregistrée pour l'absorbeur, l'air à la sortie du capteur, le vitrage et l'air à l'entrée sont  $79^{\circ}\text{C}$ ,  $57.2^{\circ}\text{C}$ ,  $53.7^{\circ}\text{C}$  et  $40^{\circ}\text{C}$ , respectivement.



**Figure III.7:** Evolution horaire de la température des différents composants du capteur solaire avec ailette

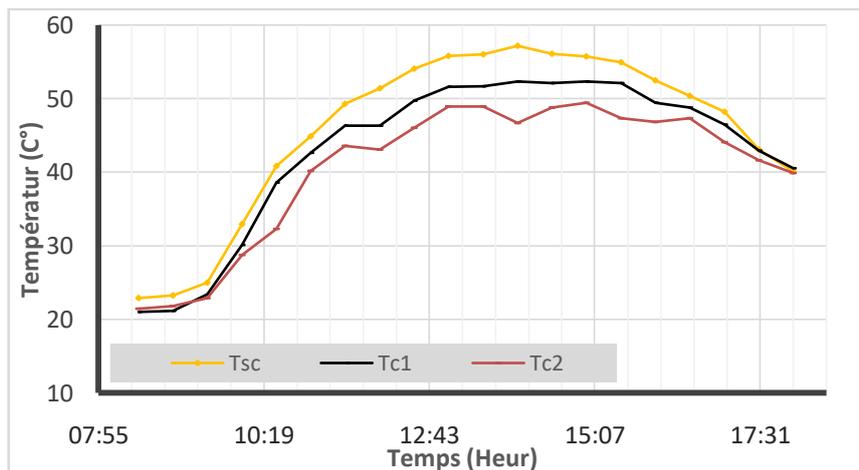
Les ailettes augmentent le chemin de l'écoulement d'air assurant un temps de séjour plus long au sein du capteur. Aussi, les ailettes augmentent la surface d'échange thermique et créent la turbulence ce qui réduit les zones inactives dans le capteur solaire.

Après l'intégration des ailettes, l'écart maximal de la température entre l'absorbeur et l'air à la sortie du capteur a été réduit à  $21.8^{\circ}\text{C}$  (une baisse de 24.8%) et celui entre l'air à l'entrée et à la sortie du capteur a été augmenté à  $17.2^{\circ}\text{C}$  marquant une amélioration de 21.5%. Cela confirme l'amélioration des échanges thermiques dans la nouvelle configuration.

### III.3.3. Evolution de la température à travers la chambre

La température dans le séchoir diffère selon la position vis à vis l'écoulement d'air (figure III.8). La température la plus élevée est celle de l'air ( $T_{es}$ ), c'est la source de chaleur dans la chambre. La température de la claie 1 est plus importante que la deuxième sur la quasi totalité de la journée car l'air chaud passe d'abord par la claie

1 ensuite 2 avant de sortir vers l'extérieur. Les températures maximales de l'air ( $T_{sc}$ ), des claies 1 et 2 sont 57.2°C, 52.3°C et 48.9°C, respectivement.



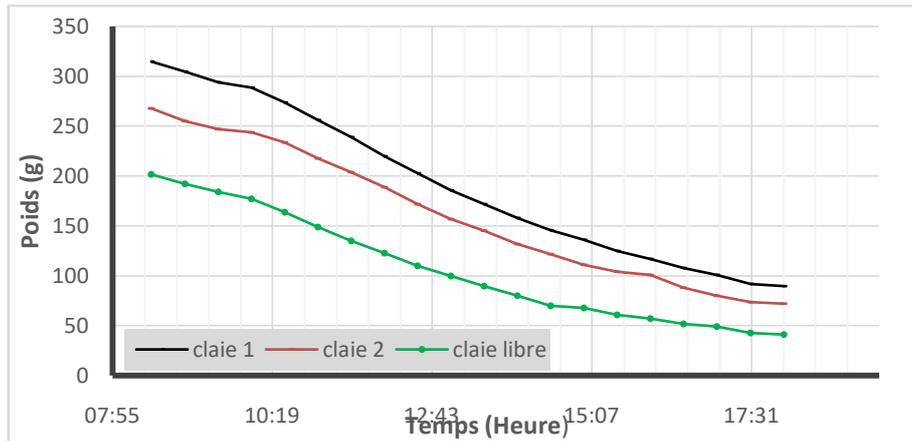
**Figure III. 8:** Evolution horaire des différentes températures au sein de la chambre de séchage (cas du capteur avec ailettes).

La différence maximale de température entre l'air ambiant et les claies est 12.3°C et 8.9°C pour les claies 1 et 2, respectivement. En comparaison avec le cas précédent (absorbeur simple), la nouvelle configuration a augmenté la température au niveau de la chambre par d'environ 48%. L'accroissement de la température de l'air venant du capteur solaire a provoqué une augmentation de la quantité de chaleur transférée par convection aux poivrons.

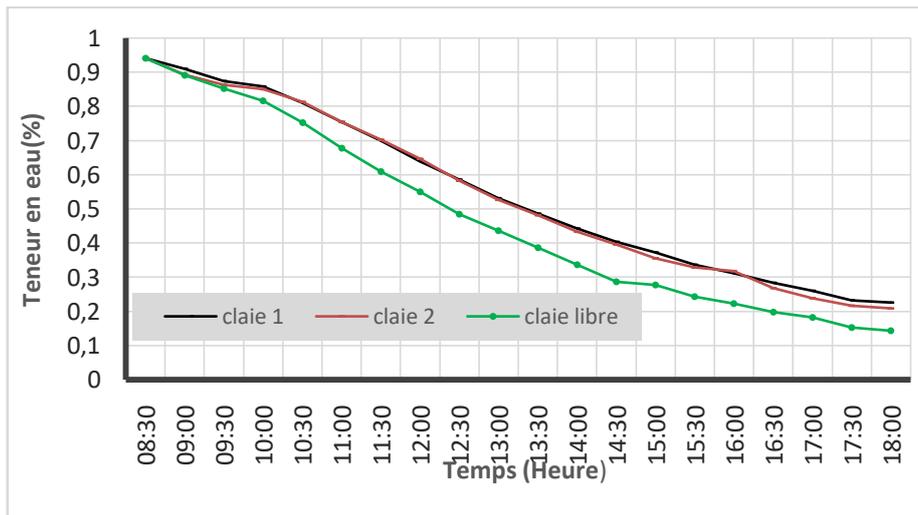
### III.3.4. Cinétique de séchage

La figure III.9 représente l'évolution de la masse et de la teneur en eau des poivrons pour les deux modes de séchage ; à l'air libre et dans le séchoir solaire indirect. Initialement, on distingue une diminution rapide de la masse du produit puis un ralentissement du processus de séchage. Nous remarquons que le séchage à l'air libre est toujours plus rapide. La masse du produit dans les claie1, 2 et à l'air libre a baissé par 71.21% (95g), 70.37% (80g) et 75% respectivement.

A la fin de cette journée (après 9h de séchage), les teneurs en eau atteintes sont 14% à l'air libre 22.5% et 20.8 % pour les claies 1 et 2, respectivement. Ces valeurs (22.5% et 20%) ont été atteinte dans les cas d'un absorbeur simple après 10 heures de séchage (sans compter les heures de nuit). Donc, l'utilisation des ailettes a permis de réduire le temps de séchage d'au moins 10%.



(a)



(b)

**Figure III.9:** Evolution de (a) La perte de masse et (b) La teneur en eau au cours du temps

#### III.4. Comparaison de séchage forcé et naturel de la tomate

Dans cette partie, nous allons comparer deux techniques de séchage par :

- convection forcée où le renouvellement d'air à travers le séchoir est assuré par un ventilateur (cas classique)
- convection naturelle ou le renouvellement d'air est due à une différence de densité de l'air.

Les deux séchoirs ont la même description (séchoir solaire avec ailettes), sauf dans le cas du séchoir solaire à convection naturelle, le ventilateur est à l'arrêt.

Dans le cas de séchoir à convection naturelle, l'absorbeur s'échauffe en absorbant les rayons solaires. L'air en contact avec l'absorbeur récupère par convection une partie de cette énergie et subit une élévation de température

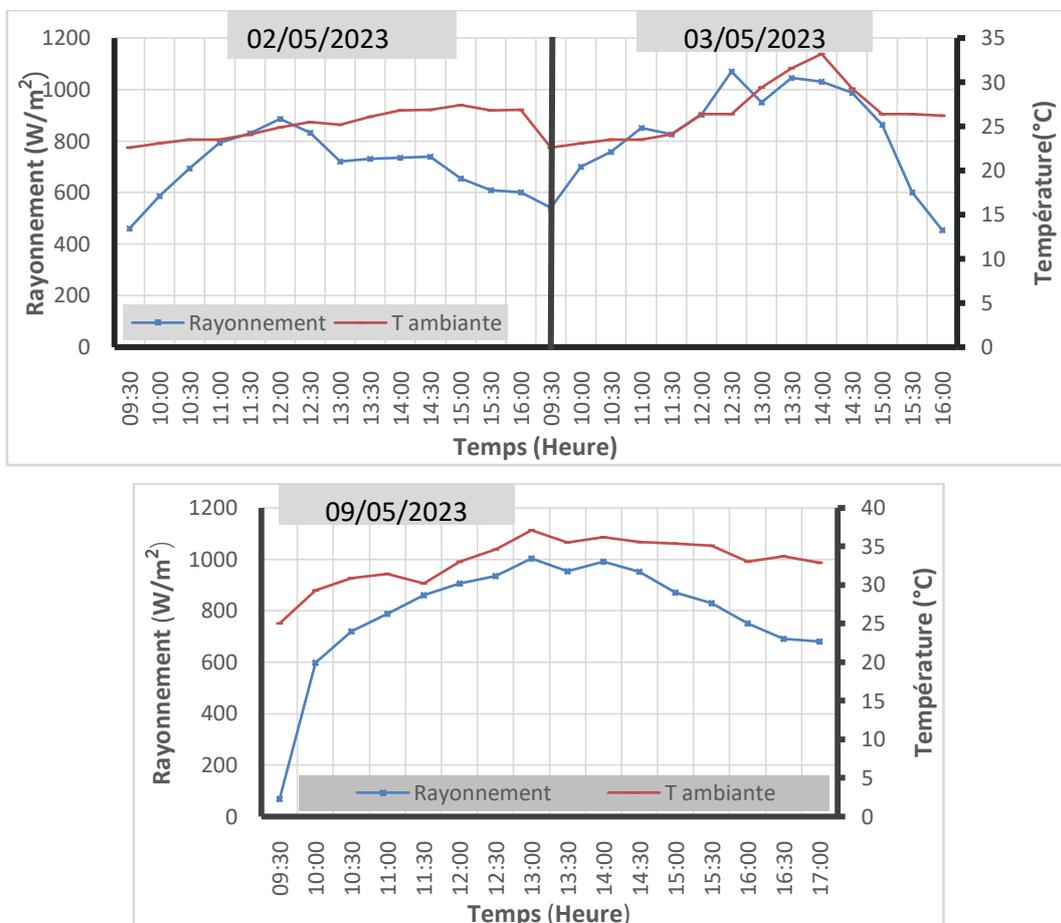
provoquant ainsi une variation de densité. La différence de densité crée un mouvement de l'air du bas en haut du capteur. L'air chaud s'oriente par la suite vers la chambre de séchage.

Les tests se sont déroulés durant une période de deux jours consécutifs 02 et 03/05/ 2023 pour la convection forcée et 04/05/2023 pour la convection naturelle.

Comme produit nous avons choisi les tomates. La teneur en eau initial pour les tomates est en moyen 94 % [13] et la teneur en eau finale recommandée varie de 13 à 14.5%.

### III.4.1. Conditions climatiques

Nous remarquons sur la figure III.10 une augmentation du rayonnement solaire de 09:30 à environs 12:30, puis une baisse par la suite. Quelques fluctuations de puissance du rayonnement dues aux passages nuageux sont enregistrées.

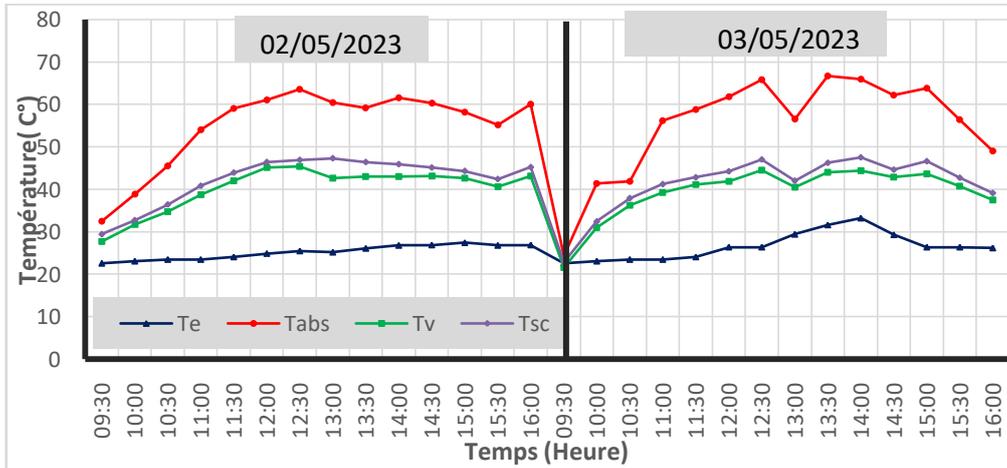


**Figure III. 10:** Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire pour les jours 02, 04, 09/05/2023.

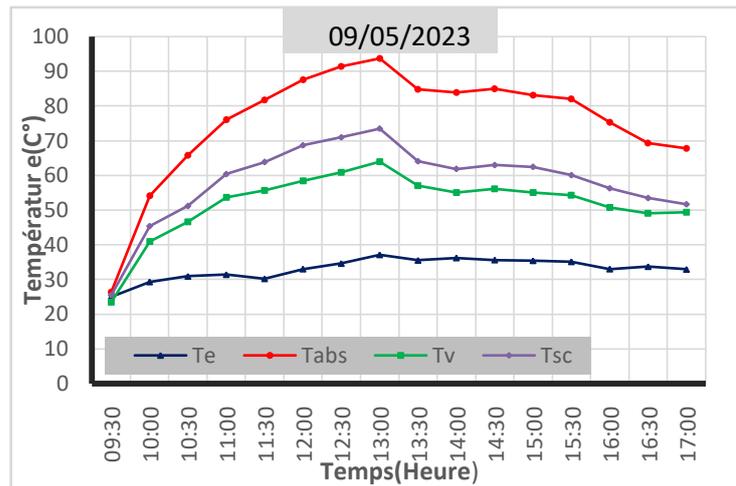
La valeur maximale atteinte par le rayonnement est de  $885 \text{ W/m}^2$  pour la journée du 02/05/2023,  $1070 \text{ W/m}^2$  pour la journée du 03/05/2023 et  $1002 \text{ W/m}^2$  pour la journée 04/05/2023.

### III.4.2. Evolution de la température des composants du capteur

La figure III.11 présente l'évolution de la température des différents composants du capteur pour les deux cas: (a) convection forcée et (b) naturelle.



(a)



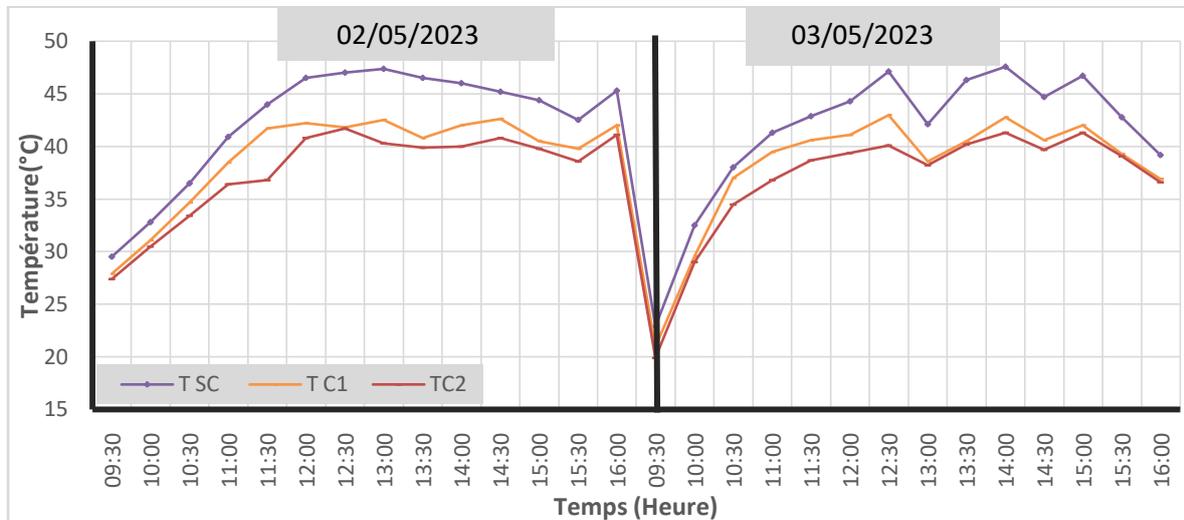
(b)

**Figure III.11:** Variation temporelle de la température de différents composants du capteur (a) convection forcée, (b) convection naturelle.

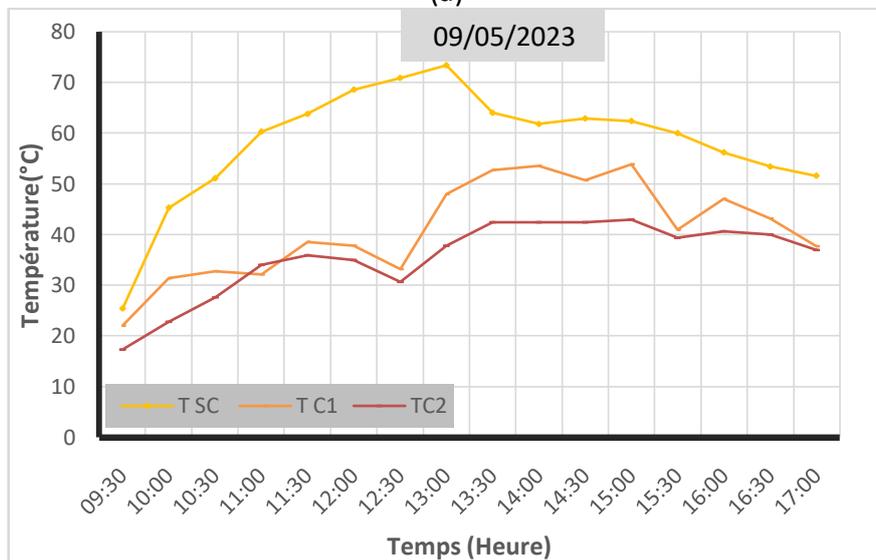
L'ensemble des courbes indique une augmentation de la température jusqu'à midi puis une baisse. Ces températures suivent l'allure du rayonnement solaire et la température ambiante. Les températures maximales de  $T_{abs}$ ,  $T_v$ ,  $T_e$  et  $T_{sc}$  pour la convection forcée sont:  $66.7^\circ\text{C}$ ,  $45.5^\circ\text{C}$ ,  $33.2^\circ\text{C}$  et  $47.4^\circ\text{C}$ , respectivement. Pour la convection naturelle:  $93.8^\circ\text{C}$ ,  $63.9^\circ\text{C}$ ,  $37.1^\circ\text{C}$  et  $73.4^\circ\text{C}$ , respectivement.

Les températures sont nettement plus élevées dans le cas de la convection naturelle, cela est due à la diminution de la vitesse voir stagnation de l'air entre le vitrage et l'absorbeur ce qui donne à l'air un temps prolongé de chauffage.

### III.4.3. Evolution de la température des composants dans la chambre



(a)



(b)

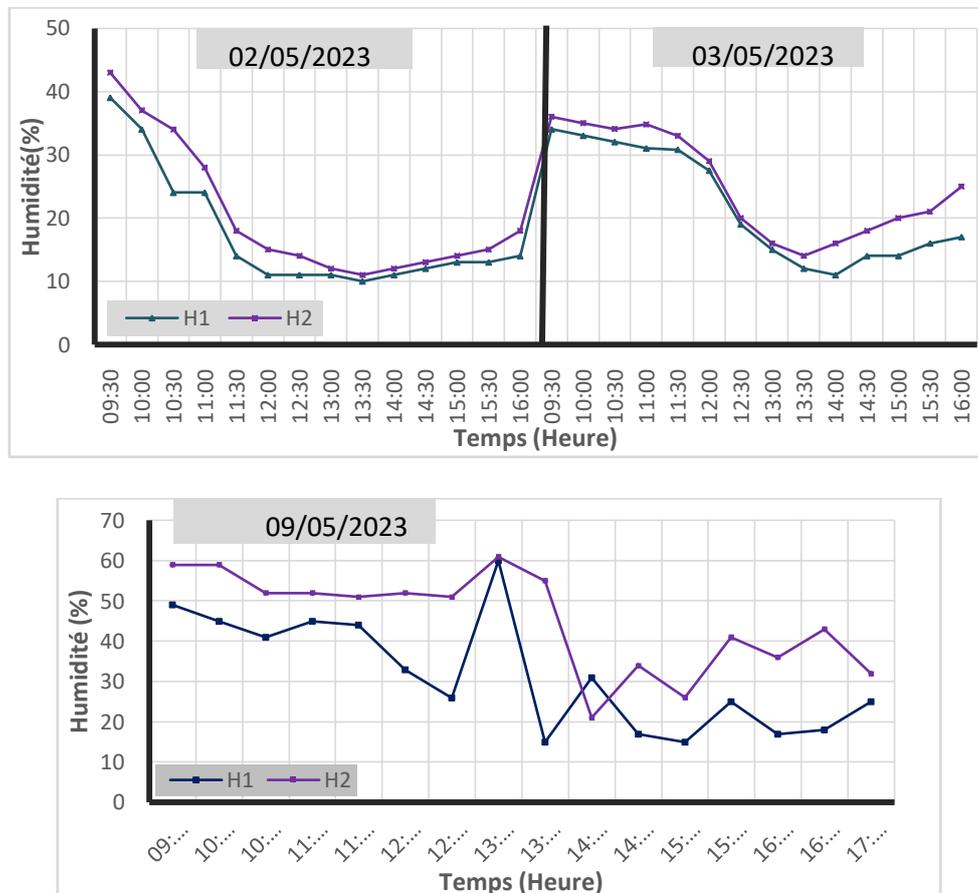
**Figure III. 12:** Variation temporelle de la température dans la chambre de séchage (a) convection forcée, (b) convection naturelle.

La variation de la température  $T_{sc}$ ,  $T_{c1}$  et  $T_{c2}$  pour les cas forcée et naturelle sont présentées sur la figure III. Pour les deux cas la température à l'entrée de la chambre est la plus élevée. Les températures maximales des claies 1 et 2 sont 43°C et 40.1°C pour la convection forcée et 53.9°C et 43°C pour la convection naturelle.

L'écart maximum de température ente l'entrée de la chambre et la 1<sup>er</sup> claie est 4.9°C pour la convection forcée (due aux pertes thermiques à travers les parois de la chambre) et 37°C pour la convection naturelle. L'écart de température est très important dans la convection naturelle. Cela peut être expliqué par une stagnation d'air chaude à la partie supérieur de la chambre de séchage. L'air n'arrive pas à s'échapper de la chambre car l'ouverture de la sortie se situe en bas de la chambre. Cette stagnation de l'air dans la chambre a bloqué l'air même dans le capteur solaire. Ce qui explique l'augmentation massive de la température dans le capteur et la chambre.

#### III.4.4. Humidité relative de l'air

La figure III. 13 présente la variation de l'humidité relative de l'air aux niveau des deux claie 1 et 2 pour les deux cas forcée et naturelle.



**Figure III.13:** Variation temporelle de l'humidité relative de l'air dans la chambre (a) convection forcée, (b) convection naturelle.

L'humidité relative de l'air ambiant est inversement proportionnelle à sa température. Dans le cas de la convection forcée, l'humidité relative de l'air diminue au début de la journée

puis elle augmente progressivement après 14h. Lors du séchage, l'humidité de l'air augmente dans la chambre de séchage, notamment au niveau des deux claies où l'air emporte avec lui l'eau évaporée des produits. Au début, les tomates sont assez humide contenant une quantité d'eau maximale. Durant le séchage, cette eau s'évapore progressivement avec le temps.

L'humidité relative de l'air au niveau de la première claie est plus importante que la deuxième. En effet, l'air chaud accroît le gradient de concentration de vapeur d'eau entre le produit et le courant d'air, et par conséquent, le taux de l'eau évaporée augmente au niveau de la claie1 car la température de la claie 1 est plus élevée.

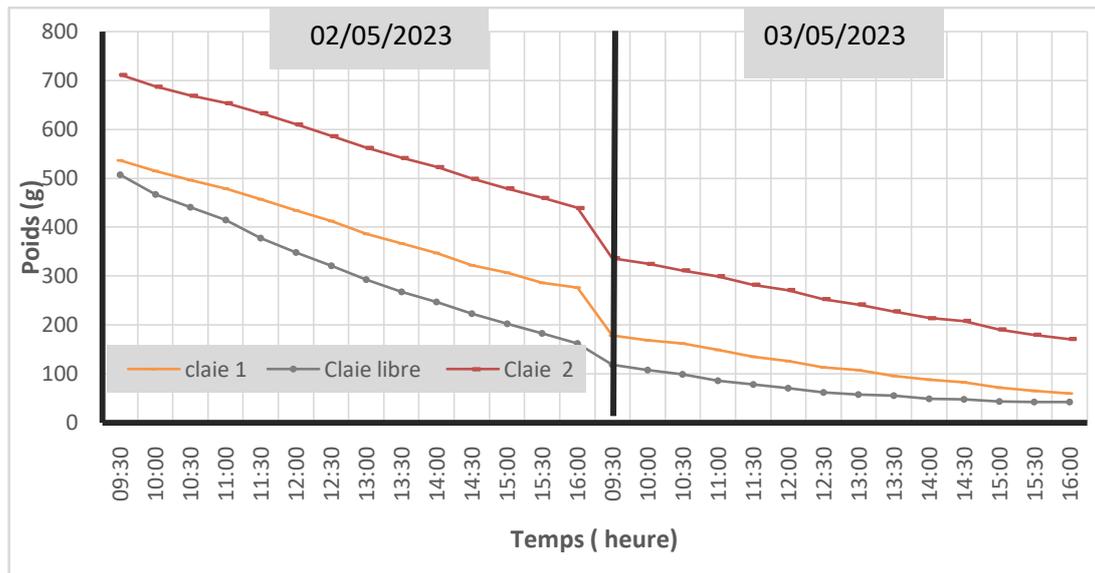
Dans le cas de la convection naturelle ou il n'y a pas un renouvellement d'air dans la chambre, l'air absorbe la vapeur d'eau dégagée par les tomates et son humidité relative augmente avec le temps spécialement pendant les heures de fort rayonnement quand la température atteint son niveau maximal vers 13h. Cela provoque la saturation de l'air en humidité (60%).

#### **III.4.5. Cinétique de séchage**

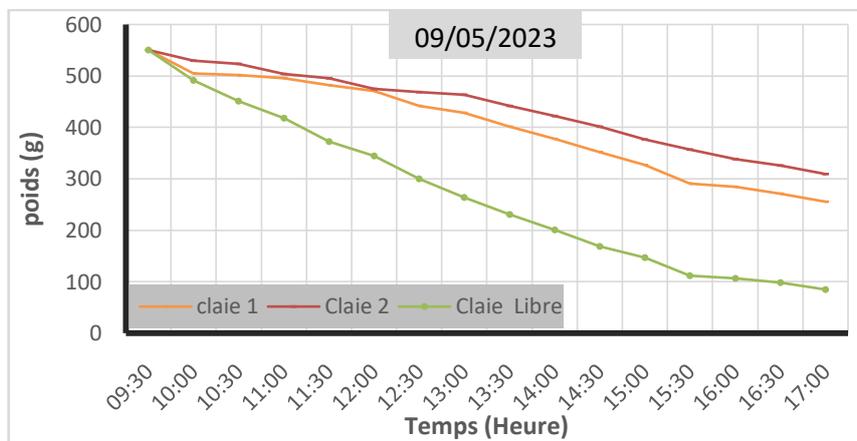
La figure III.14 présente l'évolution de la perte de masse pour les deux cas de convection forcée et naturelle. La température de l'air de séchage influe considérablement la vitesse de séchage, la vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de la température de séchage. Pour la convection forcée, une perte de 88% de la masse pour la claie 1 et 75% pour la claie 2 est marquée à la fin de la deuxième journée, la température la claie 1 est plus élevée par rapport à la claie 2.

Après deux jours successifs de séchage, les tomates ont atteint une teneur en eau de 18%, 5% pour les claie 1, 2 respectivement et 2% pour le séchage à l'air libre, voir figure III.15.

La comparaison entre les deux modes de convections montre une perte rapide de masse pour la convection forcée bien que la température au niveau des claies est plus importante dans le cas de la convection naturelle. La saturation en humidité de l'air remarquée dans le cas de la convection naturelle provoque la diminution de son pouvoir à absorber la vapeur. Ce qui empêche la migration de l'eau des tomates vers l'air de séchage conduisant à une diminution importante de taux de séchage.



(a)



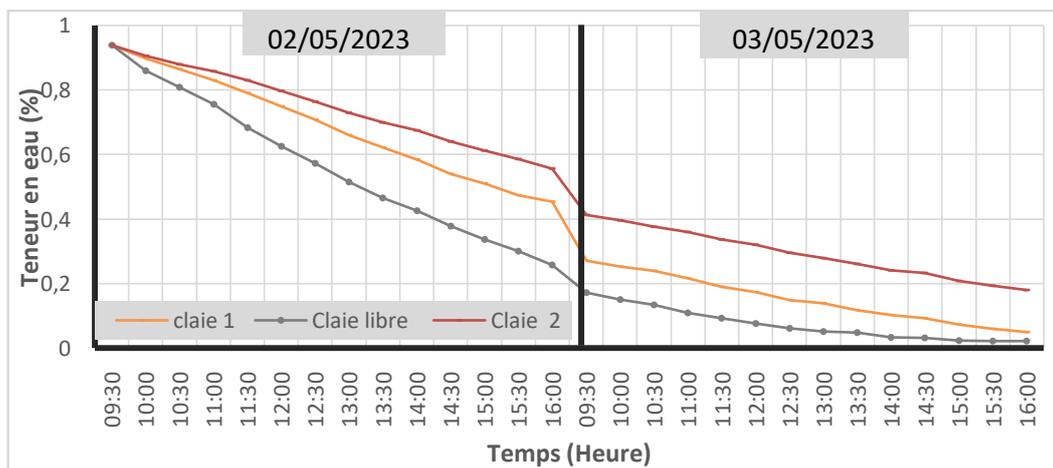
(b)

**Figure III.14:** Evolution de la perte de masse des tomates au cours du temps  
(a) convection forcée, (b) convection naturelle.

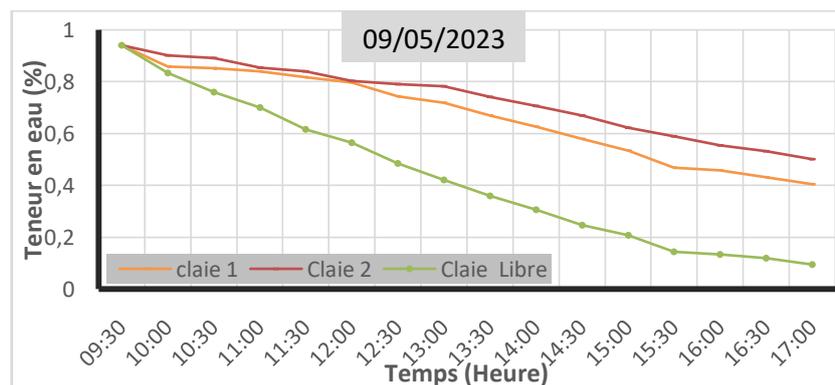
Pour la convection naturelle, une perte de masse de 43% et 53% est marquée pour les claies 1 et 2, respectivement à la fin du 1<sup>er</sup> jour de séchage. L'espace entre la claie 1 et le plafond de la chambre est petit comparé à l'espace entre la claie 2 et le bas, c'est à dire l'espace en bas contient plus d'air que en haut conduisant à une saturation plus rapide en haut. Ce qui donne avantage à la claie 2 de se sécher plus rapidement et perdre plus de poids. Pour le séchage à l'air libre une perte de 84% est marquée.

Après une journée de séchage, les tomates atteignent une teneur en eau de 40% pour la claie 1 et 50% pour la claie 2. Les tomates dans les deux claies gardent toujours une grande quantité d'eau qu'elle doit être éliminée pour assurer son stockage. A partir de ces résultats on confirme que le renouvellement d'air est un facteur clé pour le bon déroulement de séchage.

Quand la vitesse de l'écoulement d'air augmente la vitesse de séchage augmente avec, ce qui explique le taux important de séchage à l'air libre dans toutes les expériences précédente (la vitesse de l'air ambiant était toujours plus élevée que la vitesse de l'air dans le séchoir). Le meilleur procédé de séchage est d'extraire l'humidité en vitesse, sinon la moisissure va prendre place dans le produit, c'est à dire moisira avant qu'il ne soit séché. Ce qui nous a arrivé dans le cas de séchage à convection naturelle. Nous avons remarqué une odeur d'acidité viens des tomates au début de la deuxième journée ce qui signifie qu'il y a un changement négative de l'aliment et nous ne pouvons plus continuer son séchage.



(a)



(b)

**Figure III. 15:** Evolution de la réduction de la teneur en eau au cours du temps (a) convection forcée, (b) convection naturelle.

La comparaison de ces deux modes de ventilation (forcée et naturelle) nous a montré que l'adoption de la convection naturelle seul pour le renouvellement d'air n'est recommandée pour les séchoirs solaires compacts. Le couplage des deux modes peut donner des résultats intéressants en termes de température et de séchage.

### III.5. Effet du rétrécissement de la veine d'air

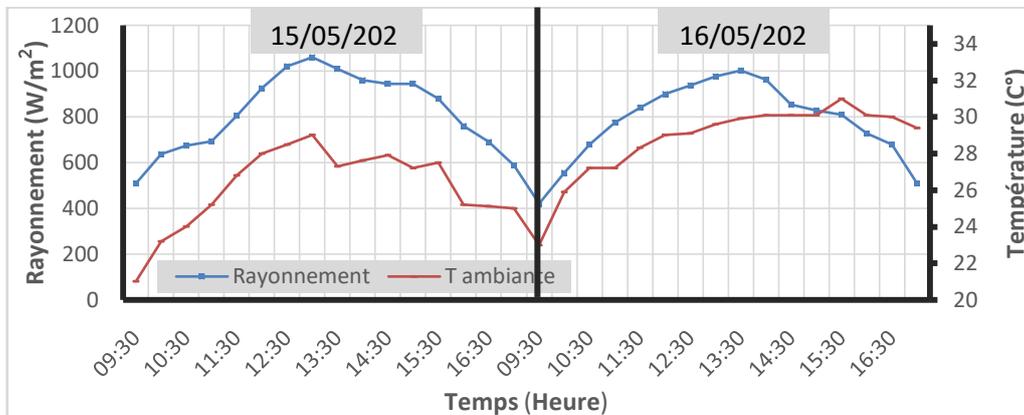
Dans cette partie nous avons réduit l'espace de la veine d'air de 0.07 m à 0.047 m. Pour tester la nouvelle configuration nous avons séché deux produits au même temps: les fraises sur la claie 1 et les pommes sur la claie 2. Les deux produits ont été séchés à l'air libre aussi.

Les teneurs en eau initiales pour les fraises et les pommes sont 88.3% [14] et 86.7 % [15], respectivement. Leurs teneurs en eau finales après séchage recommandées sont 22.93 % pour les pommes [16] et 13 à 14.5% pour les fraises.

#### III.5.1. Conditions climatiques

Les tests se sont déroulés durant deux jours successifs 15 et 16/05/ 2023. La figure III.16 montre l'évolution du rayonnement solaire et la température ambiante.

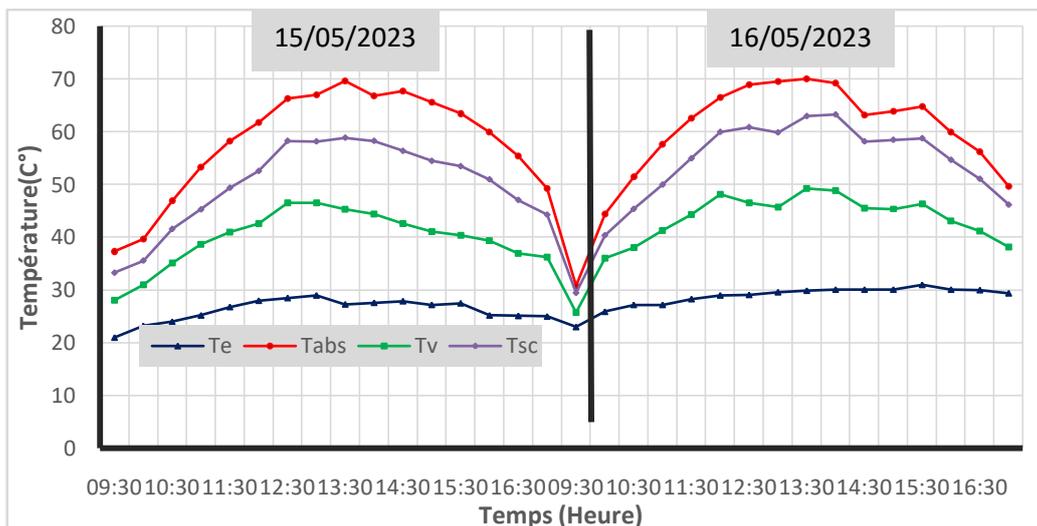
Les valeurs maximales enregistrées sur les deux jours sont  $1006 \text{ W/m}^2$  pour le rayonnement et  $31^\circ\text{C}$  pour la température ambiante.



**Figure III. 16:** Evolution de la température ambiante et du rayonnement solaire pour les jours 15 et 16 /05/2023.

#### III.5.2. Evolution de la température des composants du capteur solaire

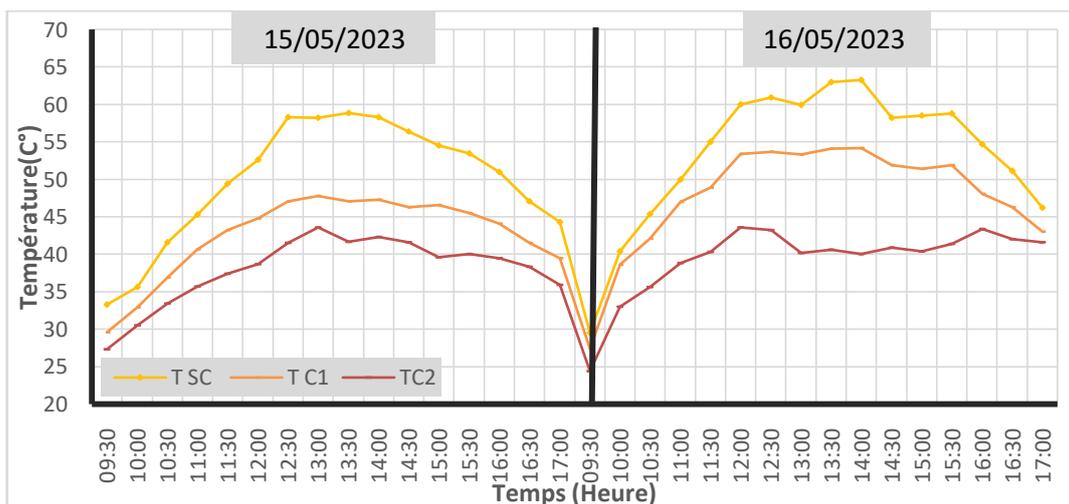
La température de l'absorbeur et le vitrage atteint un maximale de  $70^\circ\text{C}$  et  $46.6^\circ\text{C}$ , respectivement (figure III. 17). La température de l'air à la sortie du capteur atteint un maximum de  $63^\circ\text{C}$  tandis que le maximum de la température ambiante était de  $30^\circ\text{C}$ , marquant un écart de  $33^\circ\text{C}$ . Cet écart est amélioré par environ 47% par rapport au cas de l'absorbeur avec ailettes et d'environ 60% par rapport à l'absorbeur lisse. C'est une amélioration significativement et donne une indication de la bonne efficacité de la dernière configuration.



**Figure III. 17:** Variation temporelle de la température de différents composants du capteur.

### III.5.3. Evolution de la température dans la chambre de séchage

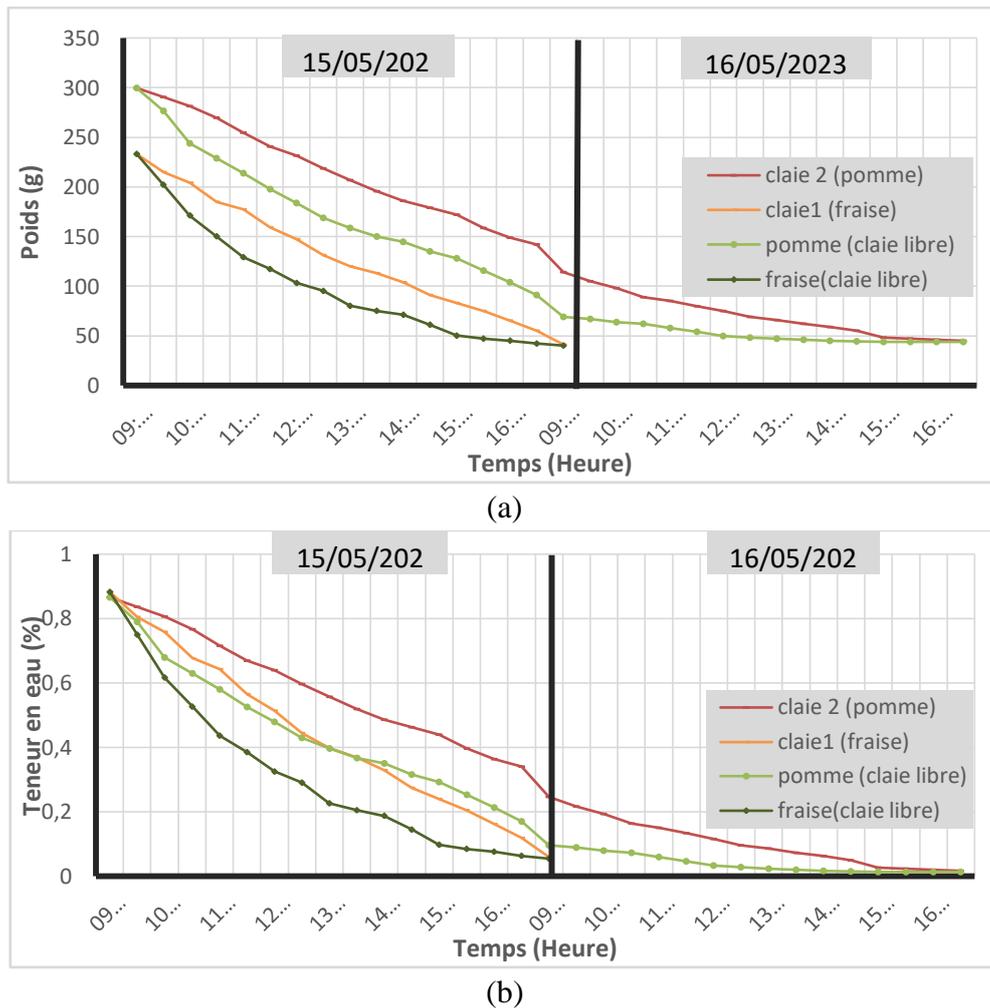
D'après la figure III.18, la température aux niveaux des claies 1 et 2 atteint un maximum de 53°C et 43°C, respectivement. La différence maximale de température entre la claie 1 et l'air ambiant est 22 °C. La chambre a gagné 12°C de plus par rapport au cas précédent (séchage des tomates).



**Figure III. 18:** Variation temporelle de la température dans la chambre de séchage.

### III.5.4. Cinétique de séchage

Les masses totales perdues par les fraises et les pommes sont 193g (83%) et 256g (85%) respectivement. La teneur en eau des fraises a diminué de 88.3% à 5.4 % et des pommes de 86.7 % à 1.3 % ce qui est optimal pour le stockage.

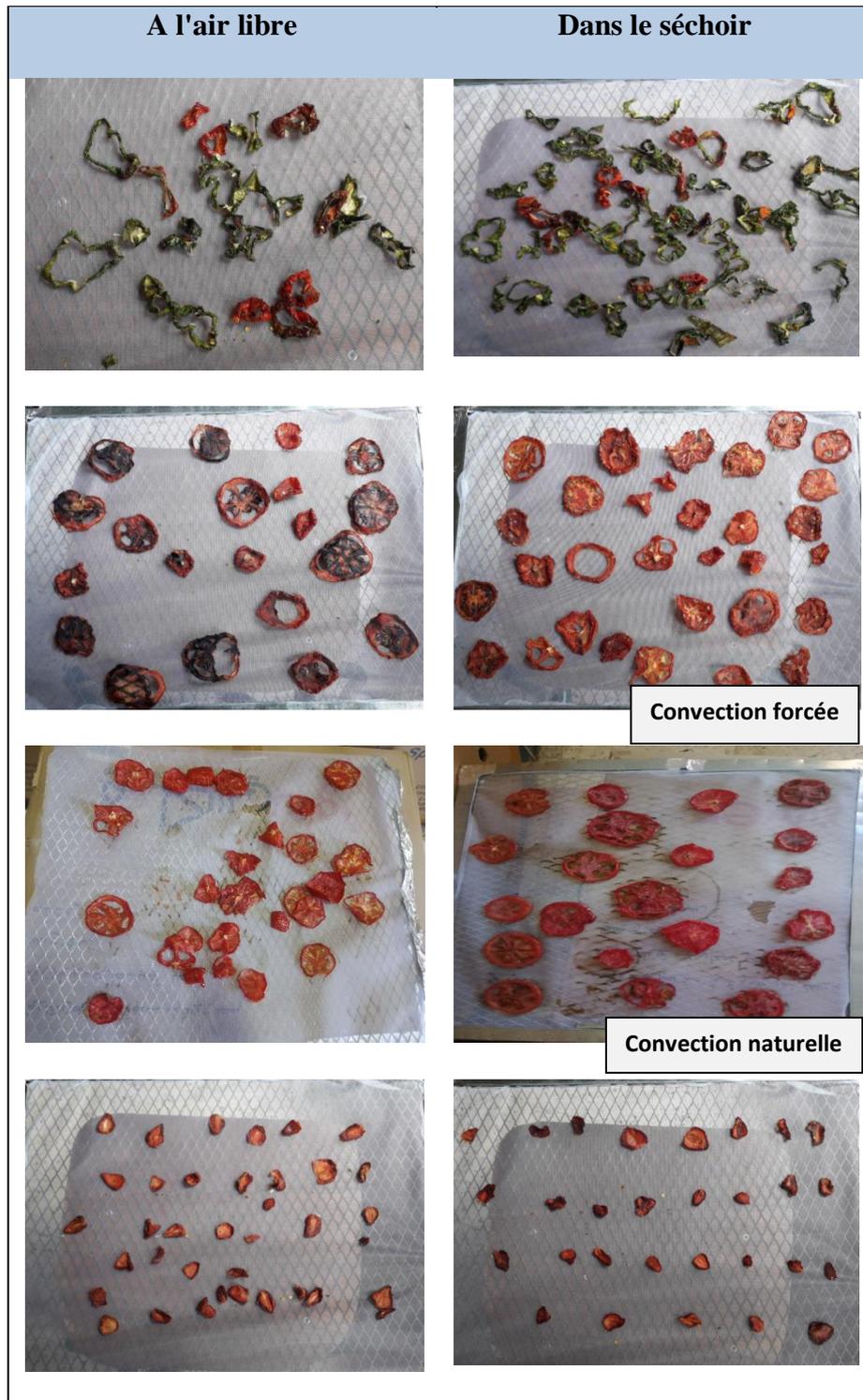


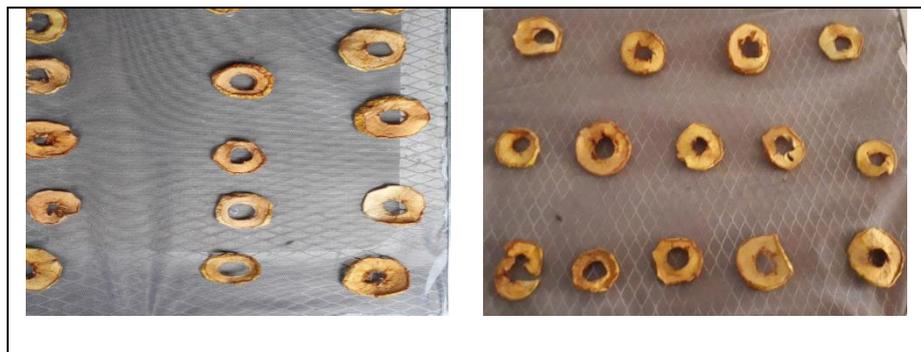
**Figure III. 19:** Evolution de (a) la perte de masse et (b) la teneur en eau au cours du temps.

### III.6. Produits après séchage

Le tableau III.1 regroupe les photos des produits testés après le séchage.

La couleur de tous les produits séchés à l'air libre est noircie montrant une dégradation de la qualité du produit. Par contre, les produits séchés par le séchoir solaire ont gardé une bonne couleur avec un parfum assez naturel, montrant la bonne qualité du produit final. Le séchage indirect protège ainsi la qualité du produit.

**Tableau III. 1:** Produits après le séchage: à l'air libre et dans le séchoir.



### III.7. Conclusion

Dans la présente étude nous avons réalisé un séchoir solaire indirect avec un absorbeur lisse dans la première partie de l'étude, et avec un absorbeur muni des ailettes dans le reste de l'étude. Les produits agroalimentaires choisis sont les poivrons, les tomates, les fraises et les pommes.

D'après les résultats obtenus, les principales conclusions tirées sont:

L'utilisation d'un absorbeur simple (configuration 1) a marqué une différence importante de température de  $29^{\circ}\text{C}$  entre l'absorbeur et l'air à la sortie du capteur due au faible transfert thermique entre les deux, par conséquent l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur est faible  $13,5^{\circ}\text{C}$ .

Les poivrons ont marqué une perte de masse d'environ 86%, 83% et 84% pour les claies 1,2 et 3 respectivement et la teneur en eau a diminué jusqu'à 9% durant une période de 15h.

Après l'intégration des ailettes (configuration 2), l'écart maximal de la température entre l'absorbeur et l'air à la sortie du capteur a été réduit par 24.8% et celui entre l'air à l'entrée et à la sortie du capteur a été augmenté par 21.5% et le temps de séchage a diminué au moins par 10%.

Les deux modes d'écoulements passif et actif ont été testés à travers la 2<sup>ème</sup> configuration pour le séchage des tomates. Une différence de:  $30^{\circ}\text{C}$  pour l'absorbeur et  $26^{\circ}\text{C}$  pour la sortie du capteur est enregistré entre les deux modes.

Les températures sont nettement plus élevées dans le cas de la convection naturelle à cause d'une stagnation de l'air dans le séchoir solaire ce qui a conduit à une saturation d'air empêchant l'évaporation de l'eau des tomates, à cet effet il n'y avait pas une réduction appréciable de la masse des tomates (43% -53%) durant toute une journée de séchage.

Au début de la deuxième journée, le séchage n'a pas été relancé suite à une odeur d'acidité dégagée par les tomates (la haute température a détruit la tomate).

L'adoption de la convection naturelle seule pour le renouvellement d'air n'est pas recommandée pour les séchoirs solaires compacts. Le couplage des deux modes peut donner des résultats intéressants en termes de température et de séchage.

Le rétrécissement de la veine d'air de 0.6 m à 0.47 m (3<sup>ème</sup> configuration) a permis d'améliorer l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur par environ 47% par rapport au 2<sup>ème</sup> configuration et d'environ 60% par rapport à la 1<sup>ère</sup> configuration.

La différence maximale de température entre la claie 1 et l'air ambiant est 22 °C, la claie 1 a gagné 12°C de plus par rapport à la configuration 2.

La teneur en eau des fraises a diminué de 88.3% à 5.4 % et des pommes de 86.7 % à 1.3 % ce qui est optimal pour le stockage.

## Conclusion générale

L'augmentation des prix des produits agroalimentaires séchés, tels que les légumes et les fruits, exige des solutions appropriées en matière de production et de conservation des produits. Une des alternatives possibles est le séchage moins coûteux de ces produits en utilisant le séchage solaire au lieu du séchage conventionnel.

Dans ce contexte, l'objectif de ce mémoire constitue une contribution à l'étude expérimentale de séchage solaire indirect. Il s'agit de fabriquer un séchoir solaire, de mieux comprendre pour améliorer le comportement thermique du séchoir solaire et de suivre la cinétique de séchage des produits à sécher.

La première partie du travail est consacrée à la réalisation d'un prototype de séchoir solaire compact de type indirect. Il est composé d'un capteur solaire plan couplé à une chambre de séchage. Contrairement aux séchoirs classiques, l'air de séchage entre du haut de la chambre de séchage et sort forcé par le bas à l'aide d'un extracteur alimenté par une cellule PV. L'amélioration des performances thermiques du séchoir solaire est assurée par l'intégration des ailettes au niveau de l'absorbeur et le rétrécissement de la veine d'air. Le fonctionnement du séchoir solaire sous les deux modes d'écoulements d'air passif et actif est analysé aussi.

Les produits agricoles choisis sont, le poivron, la tomate, la fraise et la pomme. Les expériences se sont déroulées durant les mois d'Avril et Mai 2023 sous les conditions climatiques de Tlemcen (Algérie). D'après les résultats obtenus, les principales conclusions tirées sont:

L'utilisation d'un absorbeur simple a marqué une différence de température de 29°C entre l'absorbeur et l'air à la sortie du capteur. L'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur est de 13,5°C. Les poivrons ont marqué une perte de masse d'environ 86%, 83% et 84% pour les claies 1,2 et 3 respectivement et la teneur en eau a diminué jusqu'à 9% durant une période de 15 heures.

Après l'intégration des ailettes, l'écart maximal de la température entre l'absorbeur et l'air à la sortie du capteur a été réduit par 24.8% et celui entre l'air à l'entrée et à la sortie du capteur a été augmenté par 21.5%. Le temps de séchage a diminué ainsi par 10%.

Les deux modes d'écoulements passif et actif ont été testés pour le séchage des tomates. Les températures sont nettement plus élevées dans le cas de la convection naturelle (mode passif) à cause d'une stagnation de l'air dans le séchoir solaire conduisant à la saturation d'air. Le non renouvellement d'air empêche l'évaporation de l'eau des tomates et il n'y a pas une réduction appréciable de la masse des tomates (43% -53%) durant toute une journée de séchage.

Le rétrécissement de la veine d'air de 0.07 m à 0.047 m a permis d'améliorer l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur par environs 47% avec ailettes et d'environ 60% sans ailettes. La différence maximale de température entre la claie 1 et l'air ambiant est 22 °C, la claie 1 a gagné 12°C de plus.

La teneur en eau des fraises a diminué de 88.3% à 5.4 % et celle des pomme de 86.7 % à 1.3 % ce qui est optimal pour le stockage.

En perspective de ce travail, on prévoit l'installation d'une unité de stockage thermique pour pallier au problème de l'intermittente de l'énergie solaire.

Effectuer des manipulations servant à déterminer les isothermes de sorption qui sont indispensable à la prédiction de la durée de conservation des aliments et au contrôle du séchage.

## Références

- [1] TOUATI Boumediene ; « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de la menthe verte », thèse de doctorat, Université de Tlemcen », 2008.
- [2] TOUATI TLIBA Marouane, DRIHEM Badr-Eddine ; « Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues », Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018.
- [3] Naseer Ahmed, Jagmohan Singh, Harmeet Chauhan, Prerna Gupta Anisa Anjum, Harleen Kour; “Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances”, *International Journal of Food Nutrition and Safety* 4(1): 34-42, 2013.
- [4] ITDG: Drying of Foods, <http://itdg.org>, Technical Brief
- [5] Val Ekechukwu, Brian Norton ; «Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, *Energy Conversion and Management*,40(6):615-655, 1999.
- [6] FABRE, M., MIHAILOV, S. “Expert consultations on planning the development of sun drying techniques in Africa”, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- [7] HISLOP, D. “Energy Options – Chapter 3: Heat from Solar Energy”, 1992.
- [8] Benon Bena, R.J Fuller ; “ Natural convection solar dryer with biomass back-up heater”, *Solar Energy* 72(1):75-83, 2002.
- [9] Brace Research Institute, “Types of solar agricultural dryers”, *Sunworl* 4(6):181, 1980.
- [10] DJETTOU Tarek ; « Conception et réalisation d'un séchoir solaire »; Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2020.
- [11] J. M. F. Faustino, M. J. Barroca and R. P. F. Guine, “Study of the Drying Kinetics of Green Bell Pepper and Chemical Characterization. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 163–170, 2007.
- [12] Lee D.S., Chung S.K., Yam K.L.; “Carotenoid loss in dried red pepper products”, *International Journal of Food Science and Technology* 21, 179-185, 1992.
- [13] Hossein Ebadi, Dariush Zare, Masoud Ahmadi, Guangnan Chen, “Performance of a hybrid compound parabolic concentrator solar dryer for tomato slices drying”, *Solar Energy* 215, 44–63, 2021.
- [14] A. El-Beltagy, G.R. Gamea, A.H. Amer Essa, « Solar drying characteristics of strawberry”, *Journal of Food Engineering* 78, 456–464, 2007.

[15] Mohammad Jafar Royen, Abdul Wasim Noori and Juma Haydary, “Experimental Study and Mathematical Modeling of Convective Thin-Layer Drying of Apple Slices” *Processes*, 8, 1562, 2020.

[16] Hava Miftari, Durim Alija, Ismail Ferati, Mereme Idrizi, Nexhdet Shala, “ Effect of drying in the preservation of apple and its vitamin c content” *international journal of food technology and nutrition*, vol. 4, no. 7/8, 2021.

# Business Model Canvas

## 1- Value proposition

- Fabrication des séchoirs indirects compacte (système intégré: capteur+chambre).
- Facile à utiliser et mobile.
- Dimensions personnalisées.
- Séchage rapide et efficace des produits agricoles.
- Logistique
- Réduction des couts de séchage.
- Conservation des nutriments et de la qualité des produits.
- Utilisation d'une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement

## 2- Customer segments

- Agriculteurs écologiques.
- Producteurs de fruits et légumes.
- Entreprises agroalimentaires

## 3- Customer Relationship

- Vente par commande
- Offres
- Service après-vente pour l'installation et la maintenance du séchoir.
- Formation des agriculteurs et producteurs à l'utilisation de séchoir.

## 4- Channel

- Ventes directes aux agriculteurs et producteurs.

## 5- Key Partner

- ANADE
- BNA
- Responsable de maintenance
- Les agents de transports
- Sous-traitance avec les artisans (Menuisier)
- Responsable de Marketing
- Collectivités locales
- Direction de Commerce
- ASF (Algerian Startup Fund)
- Condor (panneau photovoltaïque)
- Les ingénieurs
- Fournisseurs de matériaux et de composants pour la fabrication du séchoir.
- Distributeurs spécialisés dans les équipements agricoles.
- Organisations de recherche et de développement en énergie solaire et en agriculture.
- Partenariats avec des entreprises spécialisés.

## **6- Key activités**

- Production
- Vente par commande
- Montage
- Installation
- Maintenance
- Marketing et vente du séchoir.
- Formation et service après -vente.

## **7- Key Ressources**

- Local
- Bois
- Acier

- Verre
- Panneau solaire

## 8- Cost structure

		<b>Q</b>	<b>PU</b>	<b>Prix</b>
1	Contre plaquet (Multiplié) 1.2×2 m	1	3500,00	3500,00
2	Tôle en acier	1	9000,00	9000,00
3	Feuille en verre	1	3065,00	3065,00
4	Tube en silicone	4	330,00	1320,00
5	Support colle silicone	1	350,00	350,00
6	Boite à vis bois	1	1000,00	1000,00
7	Poignée	2	100,00	200,00
8	Paumelle	2	100,00	100,00
9	Ventilateur	1	900,00	900,00
10	Cellule solaire	1	5900,00	5900,00
11	Grille	1	600,00	600,00
12	Cornière en aluminium	3	300,00	900,00
13	Barre en bois	1	550,00	550,00
14	Scotch Aluminium	1	160,00	160,00
15	Joint isolant	1	400,00	400,00
16	Roue pour table	4	125,0	500,00
17	Peinture noire	2	350,00	700,00
18	Barre en aluminium	1	330,00	330,00
19	Film en aluminium	3	200,00	600,00
20	Polystyrène	2	150,00	300,00
21	Visseuse- Chignole	1	23000,00	23000,00
22	Scie sauteuse	1	7700,00	7700,00
23	Meuleuse d'angle	1	5800,00	5800,00
			<b>Totale</b>	<b>66875,00 DA</b>

- Coût net = 66.875,00 DA/unité
- Coût net = 1.604.280,00 DA/an
- Coût fixe = 50.000,00 DA/mois
- Coût fixe = 1.200.000,00 DA/an

### **9- Revenue streams**

- Prix de vente unitaire = 150.000,00 DA
- Chiffre d'affaire (prix de vente d'une année = 3.600.000,00 DA/an
- Frais de vente = 1.995.720,00 DA/an
- Frais net d'une année =  $1.995.720,00 - 1.200.000,00 = 795.720,00$  DA/an

## Business Model Canvas

<p>Partenaires clés</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-ANADE</li> <li>-BNA</li> <li>-Responsable de maintenance</li> <li>-Les agents de transports</li> <li>-Menuisier</li> <li>-Responsable de Marketing</li> <li>-Collectivités locales</li> <li>-Direction de Commerce</li> <li>-ASF</li> <li>-Condor</li> <li>-Les ingénieurs</li> <li>-Fournisseurs</li> <li>-Distributeurs</li> </ul>	<p>Activités </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Production</li> <li>-Vente par commande</li> <li>-Montage</li> <li>-Installation</li> <li>-Maintenance</li> <li>-Marketing</li> </ul> <hr/> <p>Local</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Bois</li> <li>-Acier</li> <li>-Verre</li> <li>-Panneau solaire</li> </ul>	<p>Propositions </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Séchoir indirect</li> <li>-Séchage rapide</li> <li>-Facile à utiliser</li> <li>-Dimensions personnalisées</li> <li>-Logistique</li> </ul> <hr/> <p>-Coûts de séchage réduit</p> <p>-Conservation des nutriments du produit</p> <p>-Utilisation d'une source d'énergie renouvelable</p>	<p>Relation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Vente par commande</li> <li>-Offre</li> <li>-Service après vente</li> <li>-maintenance</li> <li>-Formation des agriculteurs et des producteurs</li> </ul> <hr/> <p>Canaux</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Vente directe aux agriculteurs et producteurs</li> </ul>	<p>Clients </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Agriculteurs écologique</li> <li>-Producteurs de fruits et légumes</li> <li>-Entreprises agroalimentaires</li> </ul>
<p>Coûts </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût net = 66.875,00 DA/unité</li> <li>• Coût net = 1.604.280,00 DA/an</li> <li>• Coût fixe = 50.000,00 DA/mois</li> <li>• Coût fixe = 1.200.000,00 DA/an</li> </ul>		<p>Revenus </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de vente unitaire = 150.000,00 DA</li> <li>• Chiffre d'affaire (prix de vente d'une année = 3.600.000,00 DA/an</li> <li>• Frais de vente = 1.995.720,00 DA/an</li> <li>• Frais net d'une année = 1995720,00-1.200.000,00 =795720,00 DA/an</li> </ul>		

## ملخص

يتمثل التجفيف في تقليل جزء كبير من ماء الطعام عن طريق التبخر من أجل تحسين حفظه ، وهي عملية بسيطة تحتوي على آليات معقدة. في هذا العمل ، تم تصنيع نموذج أولي من المجفف الشمسي المضغوط من النوع غير المباشر باستخدام مواد محلية بتكلفة منخفضة. تتيح الدراسة التجريبية فهم السلوك الحراري للمجفف الشمسي بالحمل القسري ومتابعة حركية التجفيف لبعض المنتجات الغذائية الزراعية. درسنا تأثير دمج حواجز معدنية على مستوى الممتص وتضييق تيار الهواء في المجمع الشمسي على السلوك الحراري للمجفف وحركية تجفيف شرائح رقيقة من الفلفل والطماطم والفراولة والتفاح.

**الكلمات المفتاحية:** مجفف شمسي ، حركية مدمجة ، حركية التجفيف ، السلوك الحراري ، الحمل القسري ، الحمل الحراري الطبيعي ، حواجز معدنية.

## Résumé

Le séchage consiste à réduire une grande partie de l'eau d'un aliment par évaporation afin d'améliorer sa conservation, c'est une opération simple qui renferme des mécanismes complexes. Dans ce travail, un prototype de séchoir solaire compact type indirect a été fabriqué en utilisant des matériaux locaux à moindre coût. L'étude expérimentale permet de comprendre le comportement thermique du séchoir solaire à convection forcée et de suivre la cinétique de séchage de quelques produits agroalimentaires. On a étudié l'influence d'intégrer des ailettes au niveau de l'absorbeur et le rétrécissement de la veine d'air dans le capteur solaire sur le comportement thermique du séchoir et la cinétique de séchage des tranches minces de poivron, tomate, fraise et pomme.

**Mots clés:** séchoir solaire indirect, cinétique de séchage, comportement thermique, convection forcée, ailettes.

## Abstract

Drying consists of reducing a large part of the water of a food by evaporation in order to improve its conservation, it is a simple operation which contains complex mechanisms. In this work, a prototype of indirect type compact solar dryer was fabricated using local materials at low cost. The experimental study makes it possible to understand the thermal behavior of the forced convection solar dryer and to follow the drying kinetics of some agri-food products. We studied the influence of integrating fins at the level of the absorber and the reducing the space of the air stream in the solar collector on the thermal behavior of the dryer and the kinetics of drying of thin slices of pepper, tomato, strawberry and apple.

**Keywords:** indirect solar dryer, drying kinetics, thermal behavior, forced convection, fins.