

REPUBLIQUE DU SENEGAL



Ministère de l'enseignement supérieur de  
La recherche et de l'innovation  
Université Assane Seck de Ziguinchor  
Faculté des Sciences et Technologies



Département de Physique

## Mémoire

Présenté pour l'obtention du

### MASTER ACADAMIQUE

Spécialité : Physique des Matériaux

Présenté par :

Pape Demba Thiaw

Thème :

*Séchoirs solaires à convection naturelle et forcée : étude expérimentale et analyses économiques dans le cas de la mangue en Casamance.*

Soutenu le 21/ 02 / 2022

Devant le jury

Nom Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
<b>KOBOR Diouma</b>	Professeur Titulaire	PRESIDENT DE JURY	UASZ
<b>THIAO Sérigne</b>	Maître-conférences Assimilé	RAPPORTEUR	UASZ
<b>SY Mouhamadou</b>	Maître-conférences Assimilé	EXAMINATEUR	UASZ
<b>DIEDIOU Ansoumane</b>	Maître-conférences Assimilé	EXAMINATEUR	UASZ
<b>TINE Modou</b>	Maître-conférences Assimilé	ENCADRANT	UASZ

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020/2021

## Remerciements

### Remerciement

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Chimie Physique des Matériaux (LCPM) de l'Université de Assane Seck de Ziguinchor. Je n'aurais jamais pu mener à bien mes travaux de master pendant une durée sans le soutien de beaucoup de personnes dont la générosité, la motivation et la bonne humeur m'ont beaucoup aidé dans mes travaux.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de mémoire de Master, Dr. Modou TINE, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer mon travail. Ses multiples conseils, sa patience, sa disponibilité et sa sympathie m'ont permis d'être autonome tout au long de mon mémoire. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse toute ma gratitude.

Je remercie tous les membres de jury qui ont accepté de consacrer un temps qui leur est précieux pour juger mon travail à savoir : **Pr. Diouma KOBOR, Dr. Serigne THIAO, Dr. Mouhamadou SY** et Dr. **Ansoumane DIEDIOU** à qui je traduis la gratitude qui m'anime et la reconnaissance que je leur voue, vos remarques et suggestions me sont d'un grand intérêt.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

J'adresse tous mes remerciements au personnel du Laboratoire chimie physique des Matériaux et plus particulièrement à **Mr. YOCK** et **Mr. SOW** pour leur aide, leur soutien et leur encouragement.

Mes remerciements vont aux étudiants de master physique et chimique avec qui j'ai partagé la vie estudiantine.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenues de près ou de loin principalement à tous les employés du département de physique et chimie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor.

Enfin, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à ma maman qui m'a fait comprendre la vie à travers tous les problèmes que j'ai rencontrés pendant durant mon parcours universitaire. Elle a su écouter toutes les péripéties survenues durant mes études. Elle m'a toujours encouragé dans les moments de désespoir et elle attendait avec impatience le jour de mon obtention du diplôme de Master. Je n'oublie pas de remercier mon papa, même s'il m'a toujours posé les questions « quand est-ce que tu vas soutenir ton Mémoire ? Ou quand tu vas finir tes études? ». Malgré cela mon papa m'a encouragé et j'ai toujours apprécié

## Remerciements

sa bonne humeur. Merci également à mon frère et ma belle-sœur, pour tous les encouragements.

## Dédicace

Dédicace

**À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et  
source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié  
pour me voir réussir, que dieu te protège,**

**À toi Mon père.**

**A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme  
de mon cœur, ma vie et mon bonheur ;**

**Maman que j'adore.**

**Aux personnes qui m'ont toujours aimés et aidés et  
encouragés, qui étaient toujours à mes côtés,  
mes frères et mes sœurs.**

**Je dédie ce modeste travail à :**

**À mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure  
bonne santé et longue vie,**

**Et À tous ceux qui nous ont aidés dans ce travail,**

**Je vous dis merci**



## Résumé

### Résumé

Nous avons mené ce travail dans l'optique d'étudier le processus de séchage du type solaire. Le séchage solaire étant l'un des modes de conservation les plus prisés en Afrique par la gratuité du soleil, souffre de plusieurs maux donc le plus important se trouve dans la disponibilité en permanence des ressources de cet astre.

Le séchage solaire indirect de la mangue consiste à réduire une grande partie de l'eau qu'ils contiennent de façon à faciliter leur conservation. L'eau se présente dans les tranches de mangue sous forme d'eau libre et d'eau liée. Le principe d'enlèvement de cette eau repose sur un phénomène d'entraînement de l'eau par un fluide caloporteur à savoir l'air préchauffé au niveau du capteur avant d'atteindre la chambre de séchage. Le séchage s'effectue en trois phases à savoir une phase de mise en température, une phase de vitesse de séchage constante et une phase de ralentissement de séchage.

L'objectif de notre travail consiste à bien comprendre le mécanisme physique de l'opération de séchage qui est entre autres qu'un transfert de chaleur et de masse d'une part, et d'autre part, aux analyses économiques surtout du fait des investissements élevés du coût de la conception dans le cas du SSCF (séchoir solaire à convection forcée) qui s'élève à 380.000 F et à 250.000 F pour le cas du SSCN (séchoir solaire à convection naturelle).

En tenant compte des dépenses annuelles, le prix d'un kg de mangues sèches est élevé à 1391,06 F pour le SSCF et 1829,19 F pour le SSCN.

La production annuelle de mangues sèches nous permettra de calculer le revenu annuel, plus la production annuelle est importante plus le résultat brut d'exploitation est important. Le RBE (Résultats Bruts d'Exploitation) annuelle du SSCF s'élève à 104031,4 F et 39025,2 F pour le SSCN. En se référant sur le **RBE** et le coût des deux séchoirs, l'amortissement du SSCN est atteint au-delà de la sixième année. Contrairement au SSCF avec son coût plus élevé son amortissement est obtenu à partir de la troisième année. Durant le processus de séchage, l'étude des paramètres tels que la température des tranches de mangue et celle à l'intérieur de la chambre de séchage ainsi que leur humidité sont déterminées à l'aide d'un thermomètre à sonde et d'une balance de précision pour les pertes de masse donnant l'humidité.

**Mots clés :** Séchoir solaire, séchage, convection forcée, convection naturelle, investissement, mangue, performance, économique, .....

## Abstract

### Abstract

We carried out this work with the aim of studying the drying process of the solar type. Solar drying, being one of the most popular methods of conservation in Africa due to the free sun, suffers from several evils, the most important of which is the permanent availability of the resources of this star.

Indirect solar drying of mangoes consists of reducing a large part of the water they contain in order to facilitate their conservation. Water occurs in mango slices as free water and bound water. The principle of removing this water is based on a phenomenon of water entrainment by a heat transfer fluid, namely air preheated at the level of the sensor before reaching the drying chamber. Drying is carried out in three phases, namely a warm-up phase, a constant drying speed phase and a drying slowdown phase.

The objective of our work is to understand the physical mechanism of the drying operation which is among other things a transfer of heat and mass on the one hand,

And on the other hand, or was interested in economic analyzes especially because of the high investments of the cost of the design in the case of the SSCF (forced convection solar dryer) which amounts to 380,000 F CFA and to 250,000 F CFA in the case of the SSCN (natural convection solar dryer).

Taking into account the annual expenses, the price of one kg of dry mango is high at 1391.06 F for the SSCF CFA and 1829.19 F CFA for the SSCN.

The annual production of dry mango will allow us to calculate the annual income, the greater the annual production, the greater the gross operating profit. The annual RBE (Gross Operating Results) of the SSCF amounts to 104031.4 F and 39025.2 F for the SSCN. By referring to the RBE and the cost of the two dryers, the amortization of the SSCN is reached beyond the sixth year. Unlike the SSCF with its higher cost, its amortization is obtained from the third year

During the drying process, the study of parameters such as the temperature of the mango slices and that inside the drying chamber as well as their humidity are determined using a probe thermometer and a precision balance for mass losses giving humidity.

Keywords : Solar dryer, drying, forced convection, natural convection, investment, mango, performance, economic, .....

# Tables des Matière

## Table des matières

Remerciement.....	i
Dédicace .....	iii
Résumé.....	iv
Abstract .....	v
Table des matières .....	vi
Nomenclature .....	ix
Liste des abréviations .....	xi
Liste des figures : .....	xii
Listes des tableaux .....	xiv
Introduction générale.....	1
Chapitre I Étude bibliographique .....	3
Introduction : .....	3
I.1 Généralité sur le séchage .....	3
I.1.1 Définition et intérêts du séchage .....	3
I.1.2 Mécanisme du séchage.....	4
I.1.3 Cinétique du séchage.....	5
I. 1.4 Les types de séchages.....	6
I. 1.4.1 Le séchage naturel .....	6
I. 1.4.2 Le séchage artificiel.....	7
I.2 Étude descriptive d'un séchoir solaire indirect .....	7
I.3. Historique et caractérisation de la mangue .....	9
I.3.1 Historique de la mangue .....	9
I.3.1 Description et caractérisation de la mangue fraiche.....	10
Conclusion partielle.....	11
Chapitre II Matériels et Méthodes.....	12
Introduction .....	12
II.1 Matériels .....	12
II.2 Dimensionnement du séchoir solaire.....	13
II.2.1 Présentations de la mangue .....	13
II.2.2 SPÉECIFICATION TECHNIQUE.....	14
II.2.2.1 Avertissement.....	14
II.2.2.2 Les paramètres du dimensionnement .....	15

## Tables des Matière

II.3 Procédures de séchage de la mangue .....	19
II.3.1 Le choix du bon produit .....	19
II.3.2 Les dégradations des fruits.....	20
II.3.3 Schéma du séchage de la mangue .....	21
II.4 Fiche technique de la mangue (teneur en eau et température de séchage) .....	23
II.6 Rendement de la mangue dans notre étude .....	23
Conclusion partielle.....	24
Chapitre III Résultats et discussion .....	25
Introduction .....	25
III.1 Les paramètres influençant la cinétique de séchage du produit .....	25
III.2 Caractérisation expérimentale dans le cas du système à convection naturelle .....	26
III.2.1 Évolution de la Température du Rayonnement solaire pour le séchage de la mangue (convection naturelle) .....	26
III.2.2 Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.....	27
III.2.3 Évolution de la teneur en eau en fonction du temps.....	29
III.2.4 L'influence de la température sur la cinétique du séchage.....	30
III.3 Caractérisation expérimentale dans le cas du système à convection forcée.....	32
III.3.1 Évolution de la Température du Rayonnement solaire pour le séchage de la mangue (convection forcée) .....	32
III.3.2 Évolution de la teneur en eau de la mangue en fonction du temps dans le cas du système forcé .....	33
III.3.3 Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps (cas du système à convection forcée) .....	35
III.3.4 l'influence de température de l'air de séchage sur la cinétique du séchage .....	36
III.4 Analyse comparative entre un séchoir solaire à convection naturel et un séchoir solaire à convection forcée .....	37
III.4.1 Descriptions du séchoir solaire à convection forcé puis à convection naturelle .....	37
III.5 ANALYSE ECONOMIQUE .....	38
III.5.1 Le coût d'investissement .....	38
III.5.2 La charge d'exploitation.....	39
a) Donné économique .....	39
b) Evaluation des dépenses annuelles .....	40
c) Compte des résultats prévisionnels.....	41
d) Evaluation du coût d'amortissement des séchoirs en fonction des années.....	42
Conclusion partielle.....	43
Conclusion générale .....	25

## Tables des Matière

Références et Bibliographies.....	46
Annexes.....	48

## Nomenclature

### Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
$a_w$	Activité de l'eau	-
P	Pression des vapeurs d'eau dans le produit humide	$P_a$
$P_\theta$	Pression des vapeurs saturantes à la même température $\theta$	$P_a$
$M_e$	Masse d'eau	$k_g$
$P_{m15\%}$	Masse d'eau avec 15% d'humidité	$k_g$
$M_{e. Rest}$	Masse d'eau restant	$k_g$
$M_{e. evap}$	Masse d'eau évaporée	$k_g$
$D_s$	Débit d'air recherché	$m^3/h$
$M_e$	Masse d'eau à extraire	$k_g$
$V_{em}$	Vitesse d'enlèvement de l'eau	$kg/h$
$T_s$	Durée idéale du séchage pour le produit considéré	Heures
$\rho_{air}$	Masse volumique de l'air sec	$kg/m^3$
$X_m$	Teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage	$g/Kg_{aire}$
$h_s$	Rendement de séchage	-
$h_a$	Énergie contenue dans l'air à l'entrée et en sortie du séchoir	$(kJ/kg \text{ d'air sec})$
$P_n$	Puissance nécessaire pour le séchage (en kW) ;	$(KW)$
$T_2$	Température de séchage (à l'arrivée sur le produit)	$(^\circ C)$
$T_1$	Température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage	$(^\circ C)$
$C_{p \text{ air}}$	Chaleur massique de l'air	$(J/kg^\circ C)$

## Nomenclature

$E_n$	Énergie nécessaire	kWh.
$P_n$	Puissance nécessaire	kW
$G_n$	Puissance de rayonnement disponible	(kW/m <sup>2</sup> )
A	Surface du capteur	(m <sup>2</sup> )

## Liste des abréviations

### Liste des abréviations

SSCN : séchoir solaire à convection Naturelle

SSCF : séchoir solaire à convection forcée

ACSSCF : amortissement cumulé du séchoir solaire à convection forcée

ACSSCN : amortissement cumulé du séchoir solaire à convection Naturelle

RBE : résultats bruts d'exploitation

## Liste des figures

Liste des figures :

Figure 1: Présentation schématique d'un produit humide .....	4
Figure 2: courbe de cinétique de séchage présentant les 3 phases de séchage.....	5
Figure 3:Le principe d'un séchoir solaire indirect. ....	8
Figure 4: séchoir solaire à convection forcée .....	9
Figure 5: Évolution de la qualité de la mangue en fonction de son stade de maturité, [18] ....	11
Figure 7:Liste des matériels utilisés .....	13
Figure 8 : Composition d'une mangue mure .....	14
Figure 9 : schéma de séchage de la mangue.....	22
Figure 10 : Images des différentes procédures de séchage de la mangue .....	22
Figure 11: Rendement globale par cycle.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 12: Rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal du 11 au 13/07/2021 .....	27
Figure 13: l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au premier jour de séchage.....	27
Figure 14:l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au deuxième jour de séchage.....	28
Figure 15: l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au troisième jour de séchage.....	28
Figure 16: l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au premier jour de séchage..	29
Figure 17:l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au deuxième jour de séchage	29
Figure 18: l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au troisième jour de séchage	30
Figure 19 : Variation de la température de la mangue en fonction du temps au premier jour de séchage.....	31
Figure 20: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au deuxième jour de séchage .....	31
Figure 21: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au troisième jour de séchage .....	32
Figure 22:Rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal du 14 au 15/07/2021 .....	33
Figure 23:Variation de la teneur en eau en fonction du temps au premier jour de séchage.....	34
Figure 24 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps au deuxième jour de séchage	34
Figure 25: Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au premier jour de séchage .....	35

## Liste des figures

Figure 26 : Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au deuxième jour de séchage .....	35
Figure 27: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au premier jour de séchage .....	36
Figure 28: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au deuxième jour de séchage .....	37

## Liste des tableaux

### Listes des tableaux

Tableau 1 : Teneur en eau et température de séchage de la mangue.....	23
Tableau 2 : tableau de rendement en pulpe de quelque variété.....	23
Tableau 3: Tableau récapitulatif du coût du séchoir solaire à convection forcée .....	39
Tableau 4: Tableau de récapitulation de la production annuelle.....	40
Tableau 5:Ttableau de la charge d'exploitation pour une année .....	40
Tableau 6: Tableau des résultats prévisionnels dans le cas du SSCN.....	41
Tableau 7: Tableau des résultats prévisionnels dans le cas du SSCF .....	41
Tableau 8 : Tableau récapitulatif de l'amortissement du SSCF .....	42

## Introduction générale

### Introduction générale

Le Sénégal a un important potentiel solaire avec une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 3 000 heures et une irradiation moyenne de 5,7 kWh/m<sup>2</sup>/j. Cette irradiation varie entre la partie nord plus ensoleillée (5,8 kWh/m<sup>2</sup>/j à Dakar) et la partie sud plus riche en précipitations (4,3 kWh/m<sup>2</sup>/j à Ziguinchor). [1]

L'augmentation des prix et la pénurie de carburants conduisent à des études et des recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en voie de développement. [2]

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des dépenses et pertes après les récoltes.

Suite à des réflexions menées, une problématique majeure fut soulevée à savoir : une étude sur le secteur agricole indiquant que la production de mangues au Sénégal a enregistré un bond qualitatif en passant de 125.000 tonnes à 130.000 tonnes en l'espace d'une année (2017), soit environ 63 % de la production horticole [3].

Faute d'industries de transformation et de conservation, et des pratiques post-récoltes, les producteurs de fruits et de légumes de la Casamance perdent 60 à 70 % de leurs productions.

Moralité, les producteurs sont obligés de brader leurs productions à 75 CFA le kg, lieu de 150 F CFA, juste pour amortir les charges engagées pour la culture. La révélation est d'Ives Assistant technique aux filières agricoles au Projet d'Appui au Développement Rural en Casamance (PADERCA).

Pour éviter les pertes post récoltes (estimées à environ 60% de la récolte) des grosses quantités de mangues. L'utilisation de l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage. Ces dernières années, de nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire, principalement pour préserver les produits alimentaires. Les systèmes de séchage solaire doivent être correctement conçus pour répondre aux exigences du séchage, particulièrement ; les récoltes spécifiques, et pour donner une exécution satisfaisante en ce qui concerne le

## Introduction générale

besoin en énergie. Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés lors du séchage et des modèles de simulation sont nécessaires dans la conception, la construction et l'exploitation des systèmes de séchage. [4]

L'objectif de notre travail consiste d'une part à l'étude de l'influence des quelques paramètres sur la cinétique du séchage de la mangue en utilisant un séchoir solaire indirect à convection forcée, puis naturelle. Ces paramètres sont :

- La teneur en eau du produit
- L'impact de l'irradiation sur la cinétique du séchage.
- L'utilisation des différents débits d'air

Et d'autre part, faire une analyse économique en fonction des résultats trouvés sur les performances.

Le présent travail comporte trois chapitres.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur quelques travaux concernant le séchage solaire tel que la technologie des séchoirs solaires, l'étude de la cinétique de séchage, et une étude générale sur la mangue.

Le deuxième chapitre est consacré aux matériels et méthodes, nous allons vous montrer la zone d'étude, la fiche technique du matériel végétal pour mieux faire le dimensionnement et en fin donner la procédure du séchage de la mangue.

Dans le troisième chapitre les résultats expérimentaux ainsi que l'interprétation des graphes y sont présenté.

## Chapitre I Étude bibliographique

### Introduction :

Le soleil est une étoile dont la température de surface est d'environ 5 800K. Situé à 150 000 000 km de la Terre, le rayonnement électromagnétique émis sous forme de lumière et de chaleur met environ huit minutes pour nous parvenir. La Terre intercepte une très petite partie de ce rayonnement, qui au bord extérieur de l'atmosphère terrestre est pratiquement invariable lorsque la Terre est à une distance moyenne du Soleil. Cette constante est de  $1\,350\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . [4]

Le soleil étant une source d'énergie inépuisable, les domaines d'applications apportés par cet astre sont infinis. Les plus employés se trouvent dans le secteur de l'énergie renouvelable à savoir : l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire thermique. La simplicité et la flexibilité du second domaine d'application au cours des deux derniers siècles ont favorisé la création d'une panoplie de systèmes dont les plus célèbres sont : les chauffe-eaux et les séchoirs solaires. Ces enjeux feront l'étude de ce chapitre.

### I.1 Généralité sur le séchage

#### I.1.1 Définition et intérêts du séchage

##### Définition

Nous appelons séchage, l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Dans le domaine agroalimentaire, il permet de convertir des denrées périssables en produits stabilisés, par abaissement de l'activité de l'eau ( $a_w$ ). [5]

$$a_w = \frac{P}{P_\theta} \quad (\text{Eq.1})$$

**P** : pression des vapeurs d'eau dans le produit humide

**P<sub>θ</sub>** : Pression des vapeurs saturantes à la même température **θ**

Avec :  $a_w$  = Activité de l'eau ( $0 < a_w < 1$ ) selon la norme NF ISO 18787 Décembre 2017 [6]

##### Intérêts

Le séchage a pour intérêt :

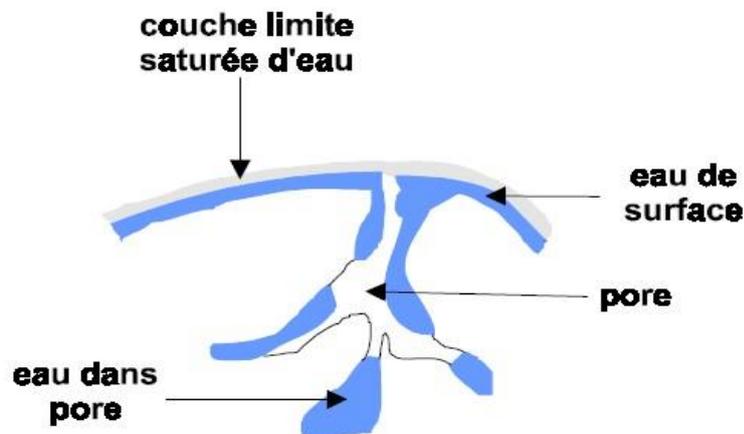
- Accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits et légumes) ;
- De faciliter surtout sa conservation par diminution de l'activité de l'eau. Mais en revanche :
  - Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.
  - Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération

### I.1.2 Mécanisme du séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité du produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage :

- ✚ Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire ;
- ✚ Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la **Fig.1**. Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles.



**Figure 1:** Présentation schématique d'un produit humide [7]

Au contact de l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit va être évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le produit. L'eau osmotique va migrer à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cette périphérie séchée par différence de pression osmotique. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers.

L'eau liquide sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le produit rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage.

### I.1.3 Cinétique du séchage

Étant données les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit en question dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse en fonction du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers.

[8]

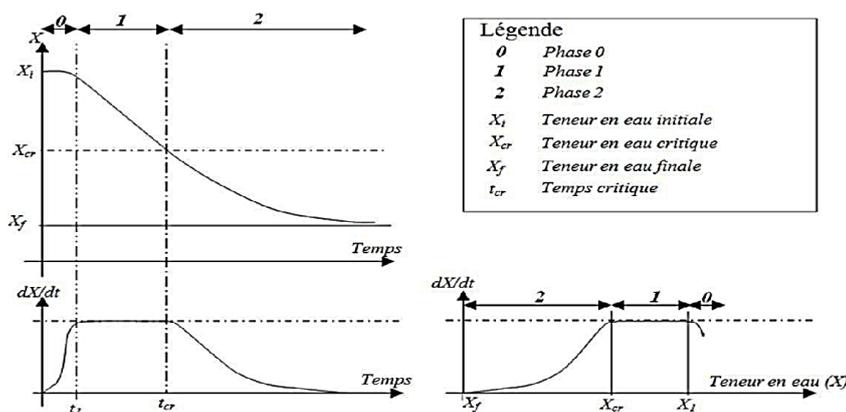


Figure 2: courbe de cinétique de séchage présentant les 3 phases de séchage

L'allure de la perte en eau du produit au cours du séchage est décrite à partir de trois types de courbe : [8]

- La courbe donnant la teneur en eau en base sèche ( $X$ ) (ou en base humide) en fonction du temps ( $t$ ),

- La courbe de la vitesse de séchage  $\frac{dX}{dt}$  en fonction du temps (t) obtenue en dérivant la fonction de la teneur en eau par rapport au temps.
- La courbe donnant la vitesse de séchage  $\frac{dX}{dt}$  en fonction de la teneur en eau (X).

La vitesse de séchage sera croissante puisque l'échange d'eau entre le produit et l'air sera d'autant plus efficace que le produit sera réchauffé.

- **La phase 0** de séchage (vitesse de séchage croissante) est courte, éventuellement inexistante, et correspond à la montée en température du produit jusqu'à atteindre une température d'équilibre ne s'atteint pas tout de suite, puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse, et qu'il existe une inertie thermique.
- **La phase 1** : de séchage à vitesse constante qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, son activité ( $a_w$ ) reste proche de 1 et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est sensiblement égale à la température humide de l'air. La fin de cette phase permet de définir la teneur en eau critique du produit
- **La phase 2** de séchage à vitesse décroissante où l'activité de l'eau baisse et les transferts internes deviennent limitants. La température du produit croît à partir de la surface. La teneur en eau diminue jusqu'à atteindre la teneur en eau limite  $X_{lim}$  qui dépend des caractéristiques de l'air de séchage (Température et humidité relative).  $X_{lim}$  se déduit de l'isotherme de désorption à la température (T).

#### I. 1.4 Les types de séchages

Les types de séchages sont fonction de la nature du produit à sécher et des moyens dont on dispose. À cet effet, on distingue :

##### I. 1.4.1 Le séchage naturel

Le séchage naturel effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Il est encore utilisé pour des matériaux dont le séchage est aisé comme les briques, mais présente des insuffisances et des inconvénients tels que :

- L'exposition des produits à des conditions climatiques irrégulières ;
- Une longue durée de séchage ;
- L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis ;
- L'attaque par les champignons et les insectes. [9]

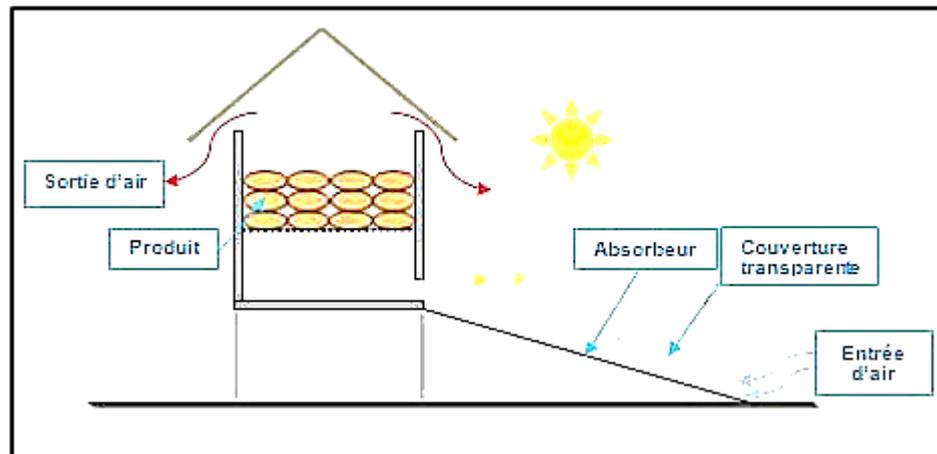
Toutes ces raisons ont orienté les professionnels vers le séchage artificiel.

#### I. 1.4.2 Le séchage artificiel

Le séchage artificiel permet, dans une certaine mesure de pallier aux inconvénients du séchage naturel : il permet de réduire considérablement la durée du séchage et d'atteindre l'humidité souhaitée des produits. Ce type de séchage est obtenu à l'aide d'appareils spécialisés. [9]

#### I.2 Étude descriptive d'un séchoir solaire indirect

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (**Fig.3**). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage. [10]



**Figure 3:** Le principe d'un séchoir solaire indirect. [10]

Les séchoirs solaires indirects présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive, etc.). Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires. Il existe deux types de modes de fonctionnements :

#### ✚ **Fonctionnement par convection naturelle**

Le principe de fonctionnement du prototype est décrit comme suit :

D'abord le rayonnement solaire pénètre à travers la couverture transparente, il arrive aux parois internes horizontales et verticales du film noir où il sera absorbé et transformé en chaleur. Ensuite l'air ambiant qui est déjà entré dans la serre par la fente avant, s'échauffera par convection naturelle, il monte sous l'effet de thermosiphon et pénètre dans l'enceinte de séchage à travers la fente. Enfin, l'air chaud sèche les produits alimentaires et s'échappera en dehors à travers la cheminée.

#### ✚ **Fonctionnement par convection forcée**

Le séchoir indirect à convection forcée se compose de trois parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et un système de ventilation. Le système de ventilation est composé d'un ventilateur, d'un panneau solaire (**Fig. 4**). L'air chaud monte par convection forcée par le système de ventilation jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon la puissance du ventilateur.

[11]

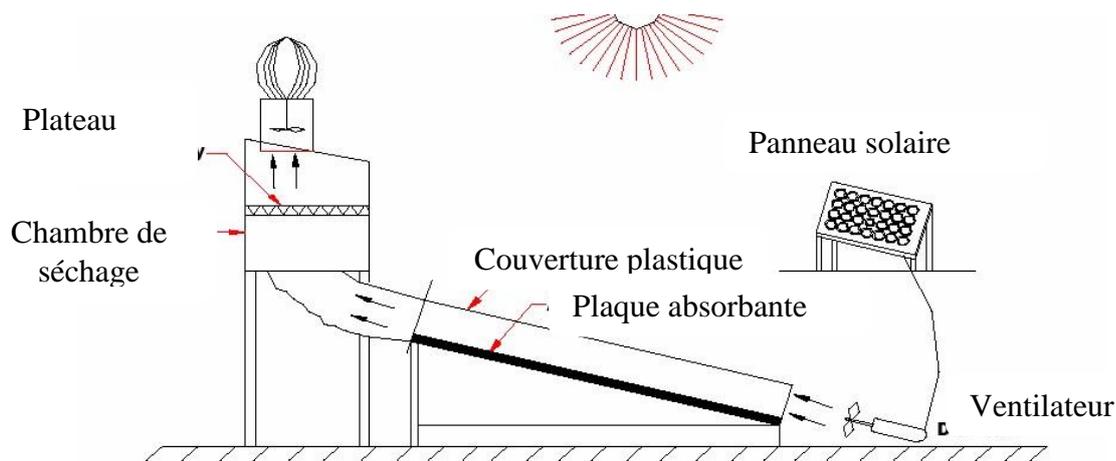


Figure 4: séchoir solaire à convection forcée [11]

### I.3. Historique et caractérisation de la mangue

#### I.3.1 Historique de la mangue

Découvert il y'a fort longtemps (les premières traces remontent à 2000 ans avant Jésus Christ) [12], le manguier, genre *Mangifera*, est un des arbres fruitiers les plus anciennement cultivés [13]. L'origine et la diversité du genre *Mangifera* sont encore largement discutées. Beaucoup de chercheurs estiment que le manguier viendrait du Sud-est asiatique et plus précisément d'une zone couvrant le Nord-Nest de la Malaisie, le Bangladesh et le Nord-Est de l'Inde (berceau de l'espèce *M. indica*) où il serait développé depuis environ 4000 ans. Le manguier a ensuite été introduit dans les autres régions du monde par les découvertes et les colonisations européennes. Actuellement, la mangue est présente dans toute la zone intertropicale et dans une moindre mesure, dans le pourtour méditerranéen ((Égypte,, Espagne, Israël, etc.) [14].

Toutefois l'essentiel de la production fruitière du Sénégal provient des régions de Ziguinchor et Thiès [15]. La région de Ziguinchor est caractérisée par une importante production de mangue. Le manguier est un arbre fruitier de climat tropical caractérisé par une alternance très nette de saisons sèches et humides. Il s'accommode à toutes les conditions pédoclimatiques tropicales, mais préfère les sols profonds, limoneux et frais. Il supporte mal les basses et hautes températures (inférieures à 10 °C et supérieure à 44 °C). Sa culture exige des sols dont le pH est compris environ entre 5 et 7. [16]

La multiplication des manguiers s'effectue essentiellement par greffage, ce qui permet la conservation des caractères variétaux. En Casamance, les variétés rencontrées sont : KEITT,

KENT, DIOUROU, PAPAYE, PÊCHE, SIERRA LEONE. D'ailleurs ces variétés sont fréquemment sûres greffées en variété Kent. [3]

La mangue est un fruit, délicieusement parfumé, juteux, tendre et charnu. Sa chair, d'un beau jaune-orangé, a un délicat goût sucré. Avec plusieurs milliers de variétés, la mangue offre une diversité peu commune de couleurs et de saveurs. Aliment de bien-être, elle allie plaisir gourmand et apport nutritionnel équilibré. [17]

C'est l'un des fruits les plus consommés au Sénégal (frais, cuit, transformé) et dont le potentiel d'exportation reste grandement inexploité. La filière mangue, véritable mine d'or pour ses acteurs, a depuis quelques années maintenant, pris des ailes et se positionne favorablement dans les marchés internationaux.

### I.3.1 Description et caractérisation de la mangue fraîche

Le fruit du manguier est une drupe plus ou moins aplatie latéralement suivant les variétés. Les mangues ont divers aspects. Les unes sont ovales ou ovoïdes, d'autres sont allongées et réniformes, plus ou moins aplaties.

La peau ou **épicarpe** est fine, lisse et résistante, d'aspect brillant à maturité. Sa couleur varie de vert à jaune jusqu'au rouge en passant par l'orange selon les variétés.

Pulpe ou **mésocarpe** est de couleur jaune-orangée, juteuse, onctueuse et très parfumée, d'une saveur agréable rappelant l'abricot.

Le noyau ou **endocarpe**, ovoïde et très aplati, est entouré par la pulpe. En forme d'amande, il est couvert de fibres plus ou moins longues et nombreuses ; et pouvant pénétrer dans la chair sans constituer une gêne pour la consommation. La production de mangues est assurée par une multitude de petits planteurs. Elle est saisonnière, et tellement abondante en certaines périodes que des milliers de tonnes pourrissent aux pieds des arbres. Ces pertes importantes pourraient atteindre 50 % de la production [18].

La maîtrise et la préservation de la qualité des mangues représentent un enjeu important pour la poursuite du développement de cette production. La caractérisation de la matière première est le point de départ du projet de conservation en post récolte de la mangue. Elle a pour objectif de relier la qualité finale des fruits après traitements de conservation à sa qualité de départ, en tenant compte de son stade de récolte (**figure 5**). Dans cette optique le suivi des propriétés morphologiques et biochimiques des fruits sur ce stade de maturité est réalisé,

incluant le paramètre agronomique de croissance en conditions contrastées d'alimentation carbonée.

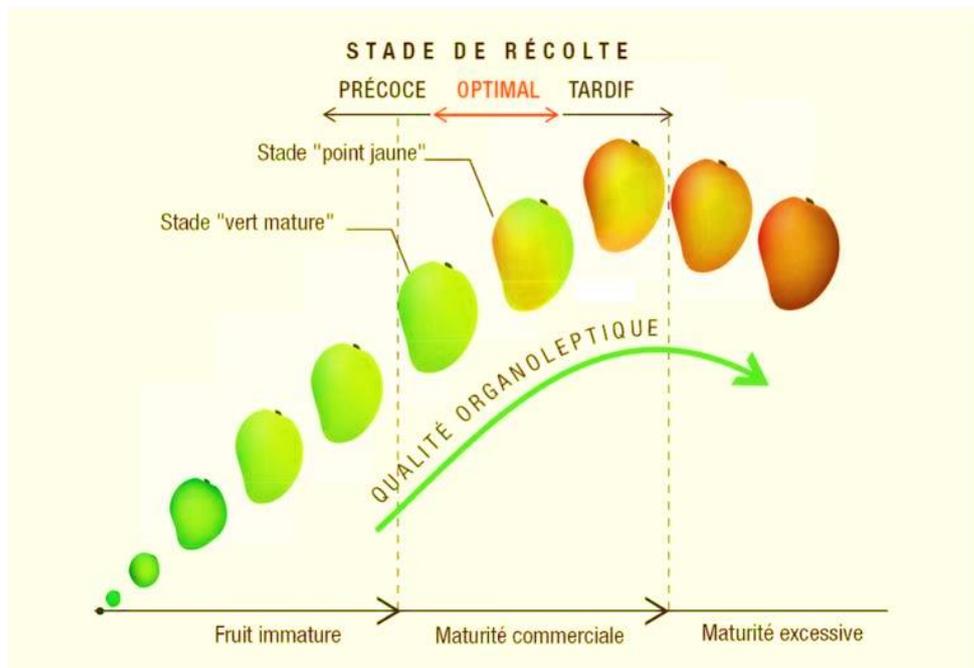


Figure 5: Évolution de la qualité de la mangue en fonction de son stade de maturité, [18]

La notion de qualité d'un fruit varie suivant que nous nous adressons aux producteurs, aux distributeurs ou aux consommateurs.

- Pour le producteur, la qualité est synonyme de rendement, de précocité et de résistance aux maladies.
- Le distributeur caractérise la qualité du produit selon sa durée de vie, l'homogénéité des lots de fruits, leur maturité, leur état sanitaire et leur bonne tenue en conservation.
- Enfin, pour le consommateur, la qualité est plutôt liée à l'aspect, au bon goût et à la valeur nutritionnelle du fruit

### Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à introduire le contexte de notre travail qui se ramène aux séchoirs solaires indirects. Une description générale de séchage, des séchoirs solaires ainsi que le produit choisi à titre d'exemple pour le séchage (la mangue) ont été présentées

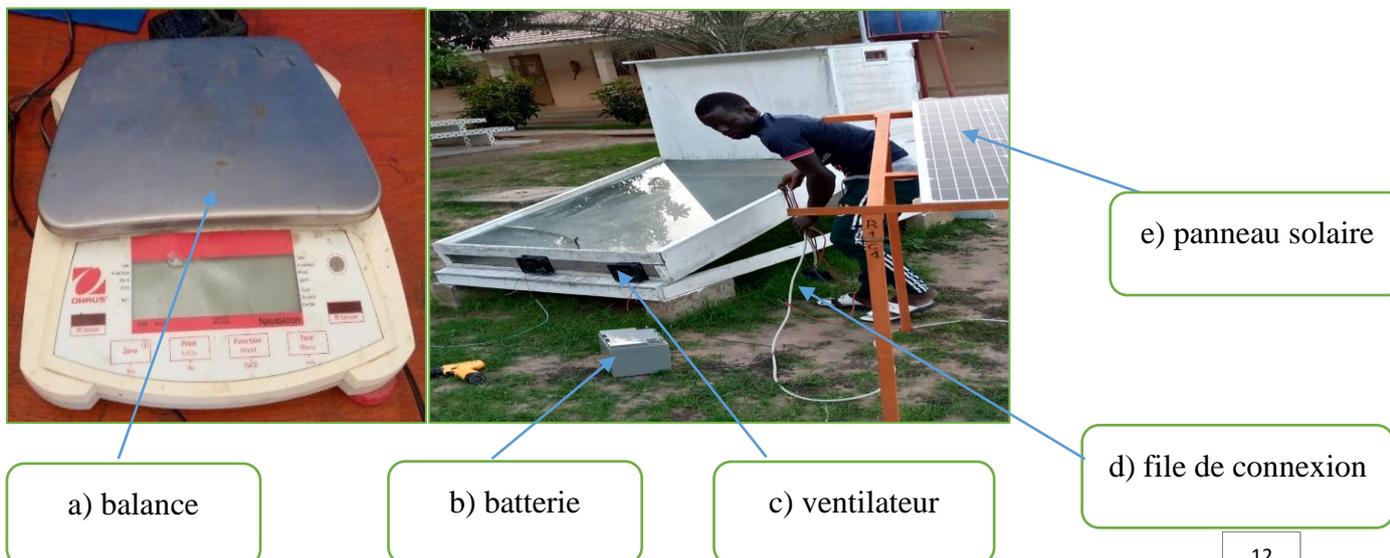
## Chapitre II Matériels et Méthodes

## Introduction

Le séchage est l'une des principales techniques de conservation des produits agricoles, et alimentaires au même titre que la congélation. L'utilisation des séchoirs repose sur une bonne connaissance des équipements permettant de contrôler les principaux paramètres de l'air sécheur tels que : la température, la vitesse et l'humidité relative. Dans l'optique d'étudier un dispositif de séchage «SÉCHOIR SOLAIRE INDIRECT », nous effectuerons dans ce chapitre une brève présentation zone d'étude, ensuite lister les matériels utiliser pour faire les expériences, suivie d'un dimensionnement du séchoir utiliser et enfin donner la fiche technique du produit à sécher.

## II.1 Matériels

Le matériel végétal utilisé dans ce travail est une variété locale de mangue (Mangue oleifera) de la Région de Ziguinchor au Sénégal. La période de récolte, relativement courte, elle dure en moyenne 6 mois dans l'année (Avril – Septembre). Le dispositif expérimental est composé d'un séchoir solaire à convection naturelle puis forcée, installé devant le bâtiment E. La mesure de la perte de poids de la mangue a été effectuée à l'aide d'une balance électronique Haus de précision égale à 0,001g, un thermomètre a été utilisé pour la mesure de la température de surface du produit, deux ventilateurs de 12v pour faire varier le débit d'air dans la chambre de séchage, d'un kit photovoltaïque associé à une batterie pour le fonctionnement des ventilateurs.





f) Thermomètre à sonde



g) Solarimètre

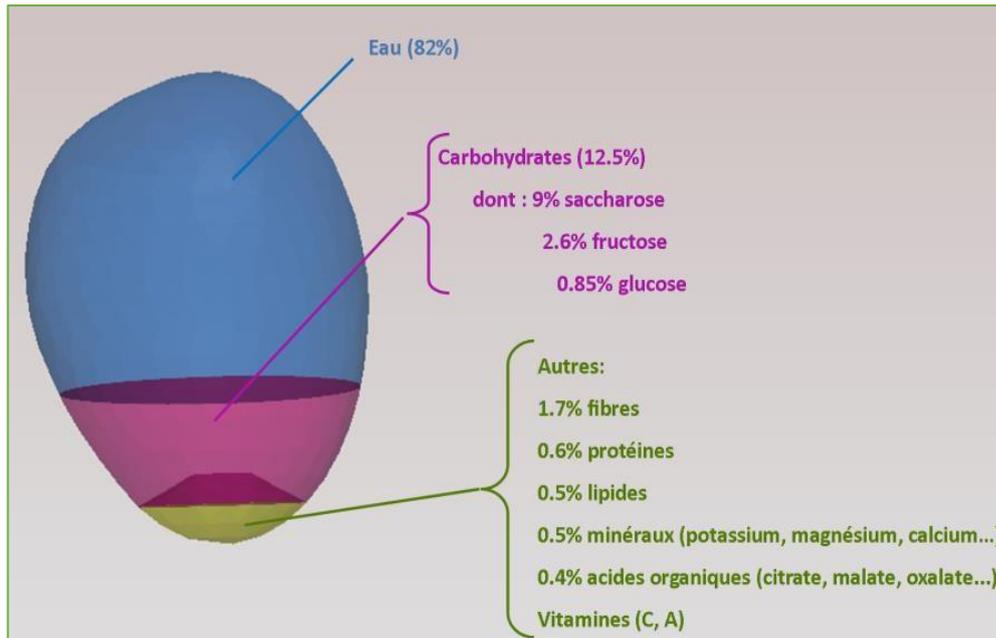
*Figure 6: Liste des matériels utilisés*

## II.2 Dimensionnement du séchoir solaire

Un séchoir solaire est un appareil destiné à déshydrater un produit pour des besoins de conservation. Pour effectuer le dimensionnement d'un tel dispositif, une étude préalable de ces besoins est nécessaire. À cet effet, le modèle que nous proposons aura la capacité de déshydrater des fruits. Le produit choisi pour cette étude est « LA MANGUE ».

### II.2.1 Présentations de la mangue

Les principaux constituants de la mangue sont l'eau, les glucides, les protides, les lipides, les minéraux, les pigments et les vitamines (figure 7). Les mangues doivent leur importance nutritionnelle à leur teneur en vitamines et minéraux. Vertes, elles sont riches en vitamine C ; mûres, elles représentent une excellente source de carotène (vitamine A). [20]



**Figure 7** : Composition d'une mangue mure [20]

Pour le séchage de la mangue les données suivantes sont connues

- Teneur en eau moyenne initiale  $w_i$  : 82,5% de la masse du produit ;
- Teneur en eau finale  $w_f$  : la mangue est considérée comme sec si sa teneur en eau moyenne représente 13,5% de sa masse finale ;
- Température du fluide sécheur  $T_{ec}$  : 70°C à 55°C

## II.2.2 SPÉCIFICATION TECHNIQUE

### II.2.2.1 Avertissement

La conception et le dimensionnement d'un séchoir sont des problèmes délicats. D'une part les éléments théoriques à prendre en compte sont parfois complexes, d'autre part ils n'apportent pas toutes les réponses, pour plusieurs raisons : [21]

- § Certains mécanismes, comme l'efficacité du transfert de masse et de chaleur entre le produit et l'air, l'efficacité d'un capteur solaire, ou les résistances au passage de l'air. Mais difficiles à transcrire avec précision dans la pratique ;
- § Il existe de nombreuses variétés de chaque produit. Chacune peut réagir différemment des autres dans le processus de séchage. Et on ne peut pas, en l'état actuel des connaissances, délivrer une fiche technique pour chacune d'elles ;
- § La conception du séchoir repose aussi sur des critères autres que techniques. Il y a les critères d'ordre économique. Mais d'autres interviennent, comme la disponibilité locale

en matériaux pour l'élaboration du séchoir ou pour sa maintenance, et le savoir-faire des artisans. [21]

**Les principaux éléments requis pour l'analyse sont :**

- § Le rythme de la production de produit sec que l'on envisage ;
- § le temps que le produit frais peut passer sans se dégrader, en stockage amont et dans le séchoir, tant que son humidité n'est pas encore assez réduite ;
- § le rythme d'enlèvement de l'eau du produit, qui résulte de ces contraintes et des caractéristiques du produit ;
- § la température de l'air envisagée pour le séchage ;
- § le débit d'air circulant dans le séchoir ;
- § la vitesse de l'air que cela suppose ;
- § la puissance du ventilateur requis, le cas échéant, pour fournir cette vitesse à l'air ;
- § la puissance thermique nécessaire pour extraire l'eau du produit au rythme envisagé ;
- § le dimensionnement des capteurs qui transmettent la puissance solaire à l'air ;
- § la puissance thermique d'une source d'énergie complémentaire, le cas échéant. [21]

Afin de connaître les contraintes du dimensionnement et les principaux éléments requis pour faire des analyses de l'expérience, nous allons vous montrer les paramètres à respecter pour faire le dimensionnement d'un produit donné.

#### II.2.2.2 Les paramètres du dimensionnement

- ❖ **La quantité de matières sèches contenue dans le produit considéré est donnée par la formule suivante [21].**

$$\text{Quantité de matière sèche (kg)} = \text{quantité de la pulpe} * \left(1 - \frac{\text{teneur en eau initiale}}{100}\right) \quad (\text{Eq.2})$$

Il ne faut pas confondre la matière sèche, qui est ce qui reste lorsque le produit a perdu la totalité de son eau (obtenue par un long séjour en étuve) et le produit sec, qui est le produit final après séchage et qui contient encore un peu d'eau.

Dans ce cas la masse de l'eau ( $M_e$  en kg) contenu dans les 20kg de mangue s'obtient par : [21]

$$M_e = \text{quantité de pulpe} * \frac{\text{teneur en eau initiale}}{100} \quad (\text{Eq.3})$$

- ❖ La masse de mangue avec 15% d'humidité ( $M_{m15\%}$ ) est donné par la relation suivante :

$$M_{m15\%} = \frac{\text{Quantité de matière sèche}}{1 - \frac{\text{teneur en eau initiale}}{100}} \quad (\text{Eq.4})$$

$$M_{e, \text{Rest}} = M_{m15\%} - \text{Quantité de matière sèche} \quad (\text{Eq.5})$$

Ce qui nous permet de déterminer la masse d'eau à évaporer.

$$M_{e, \text{evap}} = M_e - M_{e, \text{rest}} \quad (\text{Eq.6})$$

❖ **La vitesse enlèvement de l'eau dans le produit :**

Le débit d'air moyen dans le séchoir doit être tel qu'il permet l'évacuation de l'eau du produit à la vitesse moyenne  $V_{em}$ . Cette vitesse d'évacuation est d'autre part déterminée par le produit « débit d'air x eau enlevée en moyenne par mètre cube d'air » [21]

$$V_{em} = \frac{M_e}{T_s} = \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s \cdot \frac{D_s}{1000} \quad (\text{Eq.7})$$

Avec

- $D_s$  : débit d'air recherché (en  $m^3/h$ ) ;
- $M_e$  : masse d'eau à extraire (en kg) ;
- $T_s$  : durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures) ;
- $\rho_{air}$  : masse volumique de l'air sec :  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ;
- $x_m$  : teneur en eau de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage, en gramme par kilogramme d'air sec ;
- $x_a$  : teneur en eau de l'air, à l'entrée du séchoir, en grammes par kilogramme d'air sec ;
- $\eta_s$  : rendement de séchage

Si on connaît la durée idéale de séchage du produit considéré et la masse d'eau à extraire la vitesse est donnée par la relation suivante : [21]

En réunissant l'équation 7 on obtient l'expression du débit d'air

$$D_s = 1000 \cdot \frac{M_e}{(T_s \cdot \rho_{air} \cdot (x_m - x_a) \cdot \eta_s)} \quad (\text{Eq.8})$$

On considère de façon générale : [21]

- Si le débit d'air nécessaire est inférieur à 20 m<sup>3</sup>/h, le séchage pourra être assuré de façon naturelle, par les mouvements de convection de l'air chaud.
- Si le débit est compris entre 20 et 60 m<sup>3</sup> /h, alors le séchage pourra être assuré avec une cheminée solaire (Dimensionnement à faire...);
- Si le débit est supérieur à 60 m<sup>3</sup>/h, alors le séchage pourra être assuré par la convection forcée à l'aide des ventilateurs (Dimensionnement à faire...).

#### ❖ L'énergie nécessaire pour évaporer l'eau

Avant d'atteindre la chambre de séchage, l'air doit être élevé à la température maximale admissible par le produit. L'énergie nécessaire à l'élévation de température d'un kilogramme de l'air utilisé est déterminée par la différence d'énergie contenue dans un kilogramme d'air entre l'état final et l'état initial. Les énergies contenues dans l'air à ces deux étapes sont appelées enthalpies de l'air. En fonction du débit, on peut alors déterminer la **puissance nécessaire** pour atteindre ce niveau de température. [21]

$$P_n = 1,2 \cdot \frac{(h_s - h_a)}{3600} \cdot D_s \quad (\text{Eq.9})$$

- $D_s$  : débit d'air (en m<sup>3</sup>/heure) ;
- $h_s$  et  $h_a$  : énergie contenue dans l'air à l'entrée et en sortie du séchoir (en kJ/kg d'air sec) ;
- $P_n$  : puissance nécessaire pour le séchage (en kW) ;
- $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$  : masse volumique de l'air ;
- 3600 : conversion heures/secondes.

On peut cependant proposer une première approximation de la différence d'énergie de l'air entre l'entrée et la sortie, en supposant que les pertes thermiques sont minimales. Cette différence d'énergie correspond alors à l'énergie qu'il a été nécessaire de fournir pour porter l'air d'une température initiale (température extérieure généralement, sauf dans le cas d'un recyclage d'air) à la température de séchage. [21]

On écrira alors la puissance nécessaire à la première approximation de la façon suivante :

$$P_n' = 1,2 \times C_{p_{\text{air}}} \times (T_2 - T_1) \times \frac{D_s}{3600} \quad (\text{Eq.10})$$

Avec :

- $P_n'$  puissance nécessaire en première approximation ;
- $C_{p\text{ air}}$  : chaleur massique de l'air (en J/kg/°C) ;
- $T_2$  : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;
- $T_1$  : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C) ;
- $D_s$  : débit d'air (en m<sup>3</sup>/h).

La chaleur massique de l'air, à pression atmosphérique, évolue peu en fonction de la température (du moins pour les gammes de température envisagées).

On retiendra

- $C_{p\text{ air}} = 1030 \text{ J/kg/°C}$

On peut affiner cette estimation en évaluant la chaleur nécessaire pour porter l'eau contenue dans l'air de la température de départ à la température de séchage. Mais dans la majorité des cas, elle est négligeable ou faible (sauf cas d'un air recyclé) : l'air extérieur a très rarement une teneur en eau supérieure à 40 grammes par kilogramme (valeur obtenue à 100 % d'humidité relative et température de 35°C). À titre indicatif, la chaleur massique de l'eau est approximativement de 4 200 J/kg/°C sur la plage de températures envisagées. Dans le cas extrême d'une teneur en eau de 40 g/kg d'air sec, l'erreur sur la première estimation est donc de 17 %. [21]

Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure : il suffit pour la vaporiser de relativement peu d'énergie (de l'ordre de 2 400 KJ/kg d'eau libre) [5]. En revanche, lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité nettement inférieure à 1, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit d'eau liée, des forces la maintiennent davantage au produit. L'évaporation de cette eau est de ce fait plus difficile et demande plus d'énergie.

On cherchera surtout à améliorer cette approximation de la puissance nécessaire par une évaluation des pertes de chaleur de l'air par les parois du séchoir :

❖ L'énergie nécessaire est pour sa part :

$$E_n = P_n \cdot t_s \quad (\text{Eq.11})$$

- $P_n$  : puissance nécessaire en KW ;

- $t_s$  durée du séchage en heure ;
- $E_n$  : énergie nécessaire en kWh.

❖ **L'énergie doit-on fournir à l'air**

Mais toute l'énergie fournie à l'air d'entraînement ne sert pas uniquement à sécher le produit. Une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques (dans les parois du capteur, de la chambre de combustion, dans l'échangeur thermique s'il existe...). On introduit la notion de rendement thermique ( $\eta_{therm}$ ) qui est lié à la différence de température et au débit souhaités.

$$E_{reelle} = \frac{E_n}{\eta_{therm}} \quad (\text{Eq.12})$$

Pour évaluer l'efficacité d'un capteur à collecter l'énergie solaire, à la transformer en chaleur après absorption et à chauffer l'air le traversant, on définit le rendement thermique d'un capteur selon le même principe que pour le séchoir entier comme suit :

$$\eta_{therm} = \frac{\text{Puissance thermique utile par m}^2 \text{ de capteur}}{\text{Puissance solaire incidente par m}^2 \text{ sur le plan du capteur}} \quad (\text{Eq.13})$$

Seule l'expérimentation peut donner des informations précises sur ce rendement.

La surface de captation nécessaire pour obtenir la puissance nécessaire au séchage qui a été exposée ci-dessus est donnée par [21] :

$$A = \frac{P_n}{G_n \cdot \eta_c} \quad (\text{Eq.14})$$

- $P_n$ : puissance nécessaire au séchage (en kW);
- $G_n$ : puissance de rayonnement disponible (en kW/m<sup>2</sup>);
- $\eta_c$  : rendement du capteur solaire, pouvant varier de 0,4 à 0,6 selon le capteur, si on admet qu'on l'utilise à sa capacité nominale (sinon moins).

## II.3 Procédures de séchage de la mangue

### II.3.1 Le choix du bon produit

Pour faire un bon choix du produit à sécher certains critères doivent être respectés :

- Ne pas cueillir de fruit trop vert, non arrivé à maturité ;
- Couper quelques fruits pour s'assurer de la maturité.

- Le pédoncule du fruit est bien enfoncé.
- Le fruit est sans défaut (sans marques de meurtrissures).
- Le fruit est ferme au toucher.
- La peau du fruit est lisse et brillante.
- La coloration du pédoncule est jaunâtre à brun en fonction des variétés.
- De petites boules de sève brillantes se forment sur la peau (surtout sur les fruits de la variété Amélie). [22]

### II.3.2 Les dégradations des fruits

- Au moment de la cueillette et au cours de toutes les manipulations, il faut redoubler de précautions afin d'éviter les dégradations, qui peuvent être d'origine microbiologique ou biochimique.
- La mangue étant un fruit peu acide (pH = 4,5), toute blessure de la peau est rapidement colonisée par diverses levures et moisissures ; il peut y avoir modification du goût par fermentation. Par ailleurs, une présence de levures ou moisissures trop importantes sur les fruits secs peut le rendre hors normes.
- Tout choc subi par le fruit abîme ses cellules. Les composés présents à l'intérieur des cellules (enzymes, substrats) sont libérés comme dans un fruit trop mûr. Il y a alors altération de la couleur et de la texture. La respiration s'accélère, ce qui provoque une perte de poids et surtout une augmentation de la température susceptible d'affecter les fruits proches). [22]

## II.3.3 Schéma du séchage de la mangue

Le procédé de transformation de la mangue fraîche en mangue séchée consiste en une succession d'opérations :

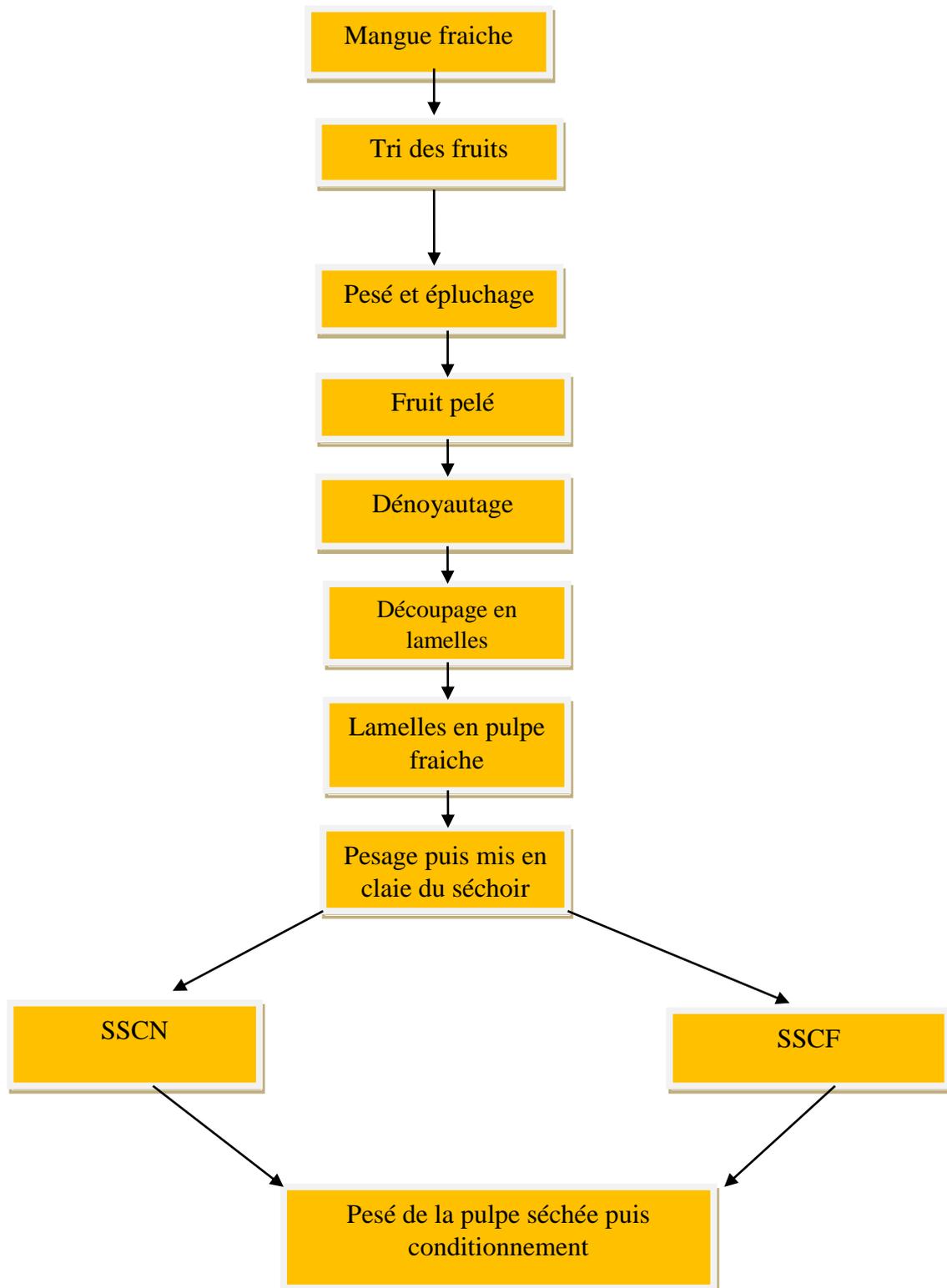


Figure 8 : schéma de séchage de la mangue

Ce processus de séchage a lustré dans le schéma suivant :



a) Lavage



b) Epluchage



d) Mangue épluchée



f) Mangue découpé en lamelle



e) Dénoyautage



f) Mise en claie des tranches de mangue



g) Mangue séché

Figure 9 : Images des différentes procédures de séchage de la mangue

## II.4 Fiche technique de la mangue (teneur en eau et température de séchage)

La connaissance de la teneur en eau et de la température de séchage (tableau 1) des produits joue un rôle important dans le processus de séchage solaire. Ainsi il est fondamental de tenir compte de la durée de stockage mais aussi des conditions de stockage des produits finis.

En ce qui concerne la mangue fraîche, plus de la moitié de l'eau peut être considérée comme libre. La teneur en eau pour une bonne conservation ( $a_w$  proche de 0,6) est de l'ordre de 14 g d'eau pour 100 g de mangue séchée. [22]

Tableau 1 : Teneur en eau et température de séchage de la mangue

Produits	Teneur en eau initiale (%)	Teneur en eau finale (%)	Température de séchage (°C)
Mangue oleifera	80 -85	12 -15	70 – 55

## II.6 Rendement de la mangue dans notre étude

### § Rendement en pulpe de la mangue

Le rendement en pulpe est le rapport de la masse de pulpe sur la masse initiale du produit (mangues fraîches). La masse de pulpe s'obtient après épluchage et dénoyautage. Cette valeur s'exprime en pourcentage (%) [22]. Le tableau 2 présente le rendement en pulpe de quelques variétés, selon les données bibliographiques.

Tableau 2 : tableau de rendement en pulpe de quelque variété [22]

Variété	Poids moyen (g)	Rendement globale (%)
Amélie	<b>350</b>	<b>40-50</b>
Lippens	<b>400</b>	<b>35-40</b>
Brooks	<b>400</b>	<b>30-40</b>
Kent	<b>800</b>	<b>40-50</b>

### § Rendement de séchage

Le rendement de l'opération de séchage est le rapport de la masse de mangues séchées sur la masse de pulpe. Il est exprimé en %.

$$R_S = \frac{\text{Masse de mangues séchées}}{\text{Masse de pulpe}} * 100 \quad (\text{Eq.14})$$

Tableau 3: Rendement globale par cycle

Calcul du rendement global par cycle			
	Masse de la pulpe (g)	Masse sèche (g)	Rendement
SSCN	1370.34	268,77	20%
SSCF	1398,75	276,75	20%

Le rendement dans le cas des deux séchoirs reste toujours identique. Cela explique que la durée du séchage n'a pas d'impact sur le rendement du séchage.

### Conclusion partielle

Au terme de cette étude consacré uniquement aux matériels et méthodes, il devient important d'étudier la performance des paramètres de séchage ainsi l'investissement des deux types de séchoirs. La connaissance de certains paramètres comme la teneur en eau dont sa variation en fonction du temps varie d'un produit à un autre permet d'obtenir un produit adéquat. Il faut veiller aussi le choix du produit en termes de valeur ajoutée pour faciliter l'amortissement du séchoir, ce qui est l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre III Résultats et discussion

### Introduction

Ce chapitre consacré aux résultats et discussions, nous allons voir à la première partie la variation des paramètres de séchage en fonction du temps dans le cas du séchoir à convection naturelle et aussi dans le cas du séchoir solaire à convection forcée, en deuxième partie nous allons étudier la différence entre les deux séchoirs et en-fin nous allons faire une analyse économique entre les deux séchoirs (coût d'investissement, les charges économiques et l'amortissement du coût des deux séchoirs).

### III.1 Les paramètres influençant la cinétique de séchage du produit

La variété de mangue est celle qui a été utilisée dans notre étude car elle est la plus répandue dans le marché dans la région de Ziguinchor. Pour préparer les échantillons, des fruits de bonne qualité (ni trop mûrs, ni trop crus) ont été choisis, lavés et rincés à l'eau potable. Les mangues ont ensuite été découpées en tranche d'épaisseur d'environ 1 cm. Les tranches obtenues sont alors uniformément disposées sur trois (3) claies à l'intérieur de la chambre de séchage et sur une (1) claie à l'air libre comme témoin.

#### ❖ Dimension chambre de séchage

La chambre de séchage est de forme d'un parallélépipède rectangle de largeur 100 cm, de longueur 140 cm et de hauteur 150 cm et portant à ces deux coté opposés une cheminée aération. Les parois extérieures sont en tôle non galvanisée. Trois (03) claies de formes rectangulaires en grillage non galvanisé et distantes de 20 cm servent de support pour le produit à sécher.

#### ❖ Mesure de Températures

Les expériences sur le séchage solaire indirect de la mangue ont été réalisées aux mois de juillet 2021. Les différentes températures ont été relevées avec l'enregistreur de températures. (Thermomètre à sonde)

#### ❖ Mesure de Masse

Les pesées ont été effectuées à l'aide d'une balance électronique de précision 0,01 g. Pour le séchage, des tranches de mangue de 1 cm d'épaisseur moyenne sont réparties uniformément

sur des claies avant d’être disposées dans l’unité de séchage. Ces claies sont régulièrement retirées et pesées à des intervalles de temps allant de 1h30 minutes.

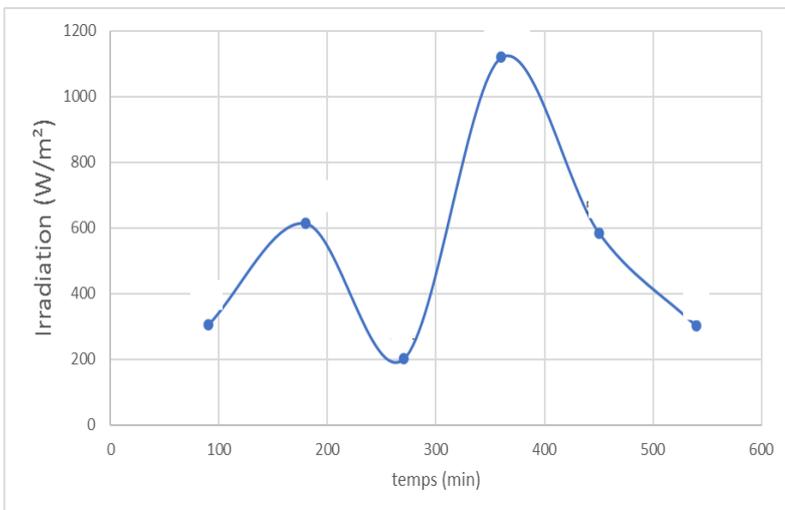
III.2 Caractérisation expérimentale dans le cas du système à convection naturelle

III.2.1 Évolution de la Température du Rayonnement solaire pour le séchage de la mangue (convection naturelle)

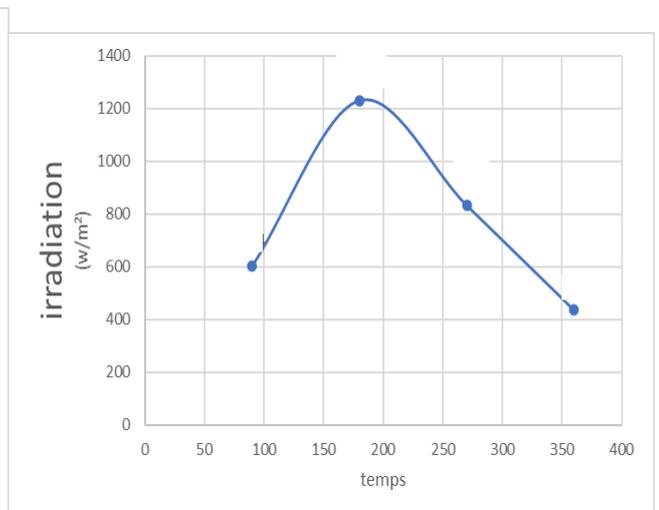
La figure 11 représente l’évolution du rayonnement solaire global sur un plan horizontal en fonction du temps pendant les journées des 10, 11 et 12 juillet 2021. Ce rayonnement reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $W/m^2$  à l’aide d’un Solari mètre standard ST-1307 de précision  $1 W/m^2$ .

De 07h30 à 12h30, on observe une augmentation de l’irradiation alors que de 12h30 à 17h30, on observe une baisse de cette irradiation. On note quelques fluctuations et baisses de puissance au niveau des graphes dues aux différents passages nuageux. La valeur maximale atteinte par le rayonnement est de  $1118 W/m^2$  pour la journée du 11 juillet 2021,  $1230 W/m^2$  pour la journée du 12 juillet 2021 et pour la journée 13 juillet 2021 la valeur est à l’ordre de  $747 W/m^2$ .

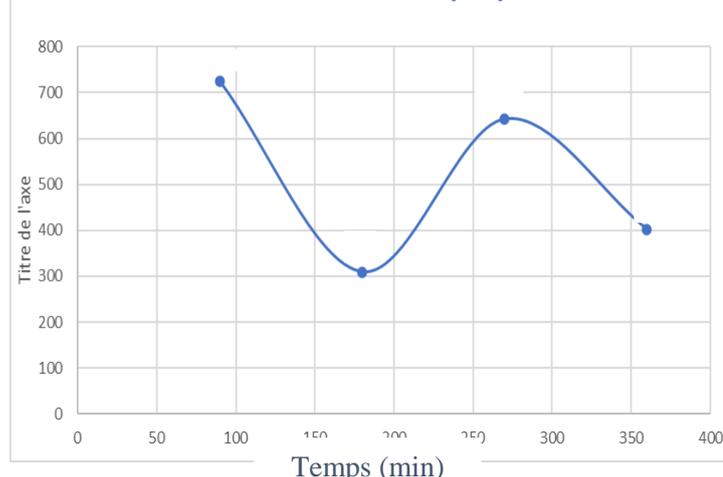
Irradiation du 11/07/2021



Irradiation du 12/07/2021



Irradiation du 13/07/2021



**Figure 10:** Rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal du 11 au 13/07/2021

### III.2.2 Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps

L'analyse des courbes montre que la vitesse de séchage est d'autant plus importante que la température de l'air asséchant est élevée notamment en début du processus de séchage (**figure 12**). L'accroissement de la température de l'air asséchant provoque une augmentation de la quantité de chaleur transférée par convection aux tranches de mangue. Il en résulte une élévation de sa température et donc de la concentration de vapeur saturante à sa surface. Par conséquent le gradient de concentration de vapeur d'eau à la surface des tranches de mangue et donc la vitesse de séchage, augmente avec la température de l'air asséchant. L'évolution au cours du temps de la vitesse de séchage montre l'existence de deux phases de séchage : Une première phase correspond au premier jour de séchage (**figure 12**) est caractérisée par une augmentation rapide au cours du temps de la vitesse de séchage. La fluctuation de vitesse remarquée vers 12h30 et 14h00 est due aux couvertes nuageuses. Une phase où la vitesse de séchage diminue pour tendre au cours du temps vers une même valeur (**figure 13 et figure 14**). La première phase de séchage correspond à une vitesse de séchage élevée. Celle-ci est obtenue par la teneur en eau initiale élevée de la mangue correspondant à l'eau libre du produit. L'extraction de cette eau libre de la mangue par l'action combinée des transferts de chaleur par convection entre la mangue et l'air asséchant et par conduction dans le produit nécessite une quantité de chaleur inférieure à celle qu'il faut fournir pour extraire l'eau liée de la mangue. C'est qui explique que la vitesse de séchage qui correspond au flux d'eau qui migre par diffusion de l'intérieur vers la surface de la mangue diminue au cours du temps.

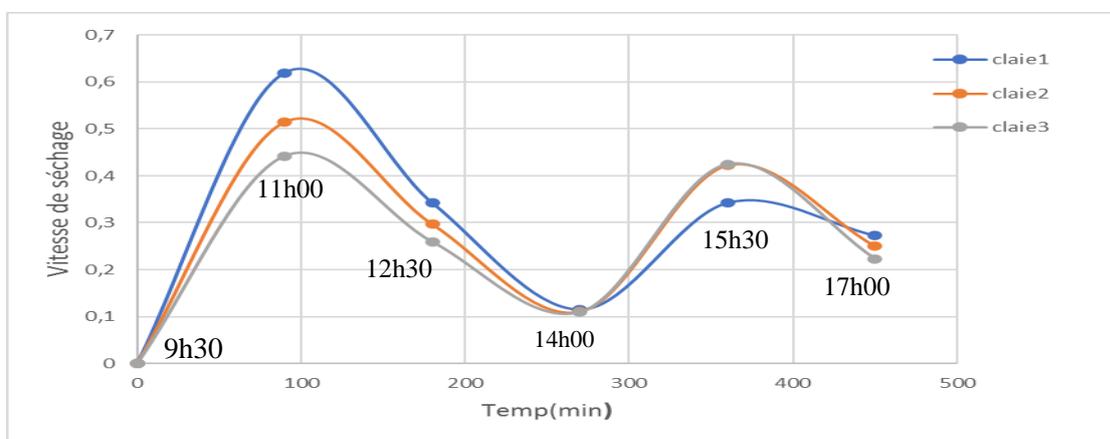


Figure 11: l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au premier jour de séchage

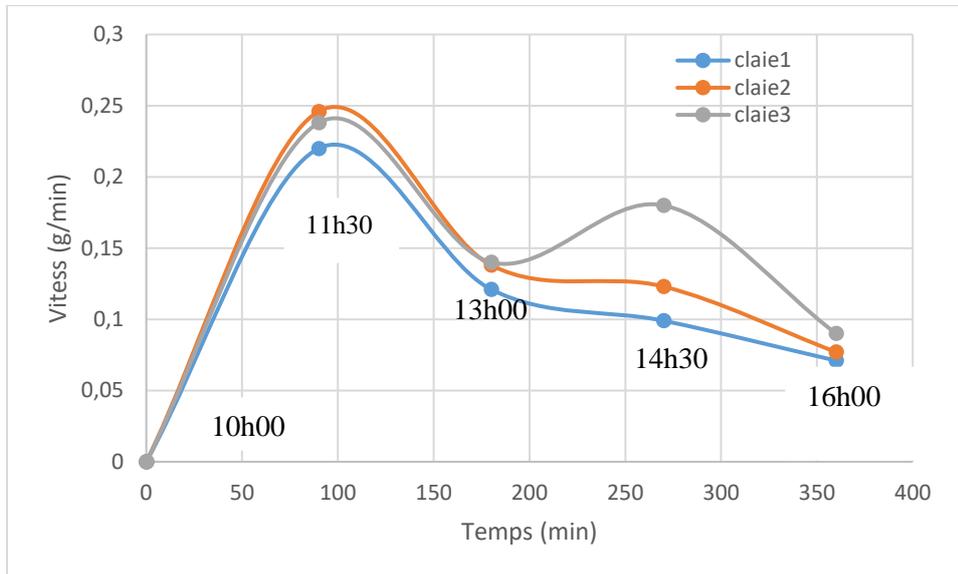


Figure 12: l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au deuxième jour de séchage

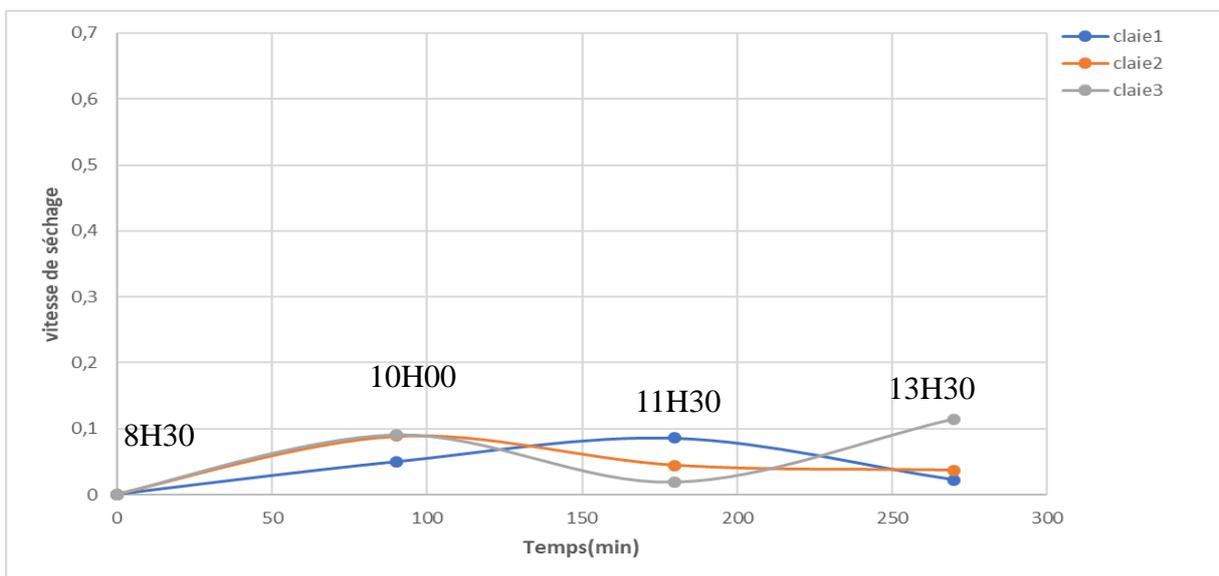
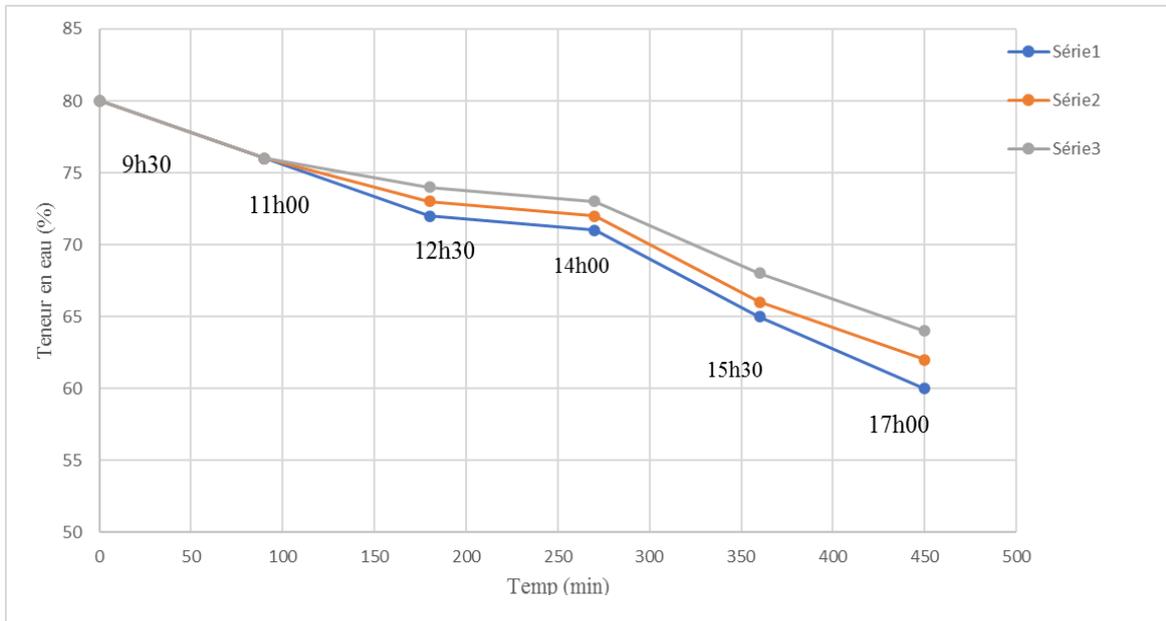


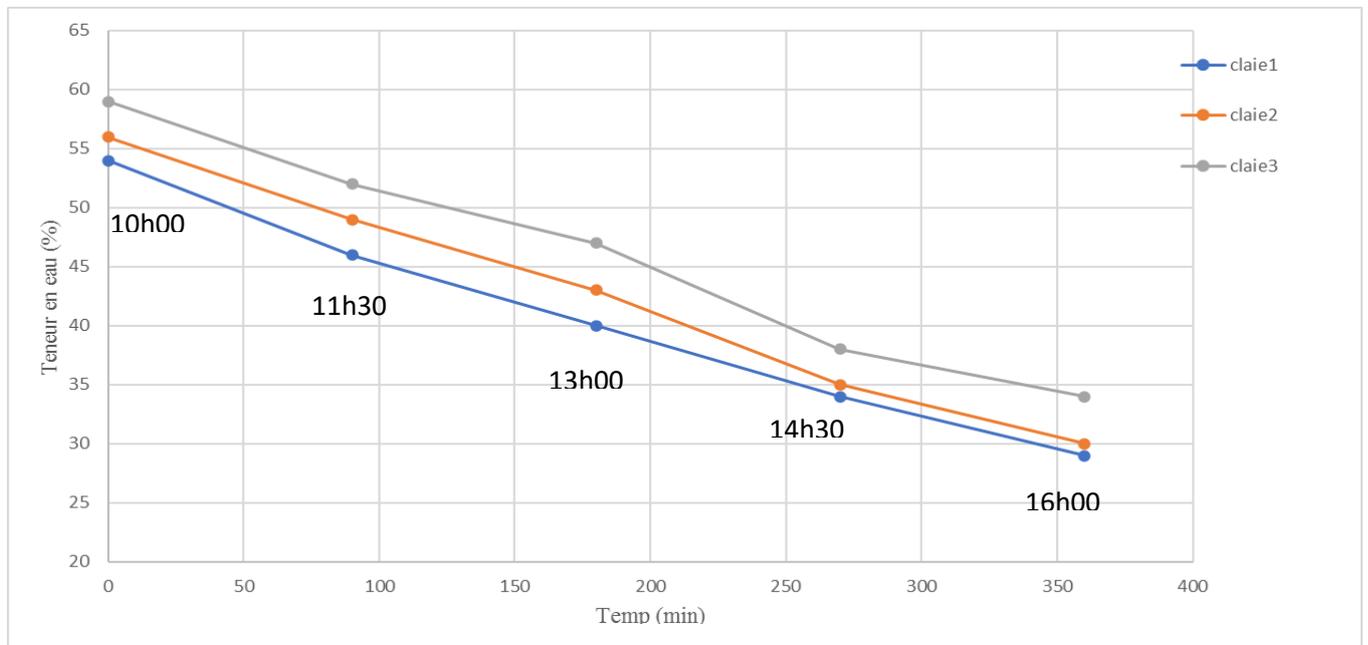
Figure 13: l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au troisième jour de séchage

### III.2.3 Évolution de la teneur en eau en fonction du temps

L'évolution de la teneur est obtenue d'après les expériences dans les figures suivantes :



**Figure 14:** l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au premier jour de séchage



**Figure 15:** l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au deuxième jour de séchage

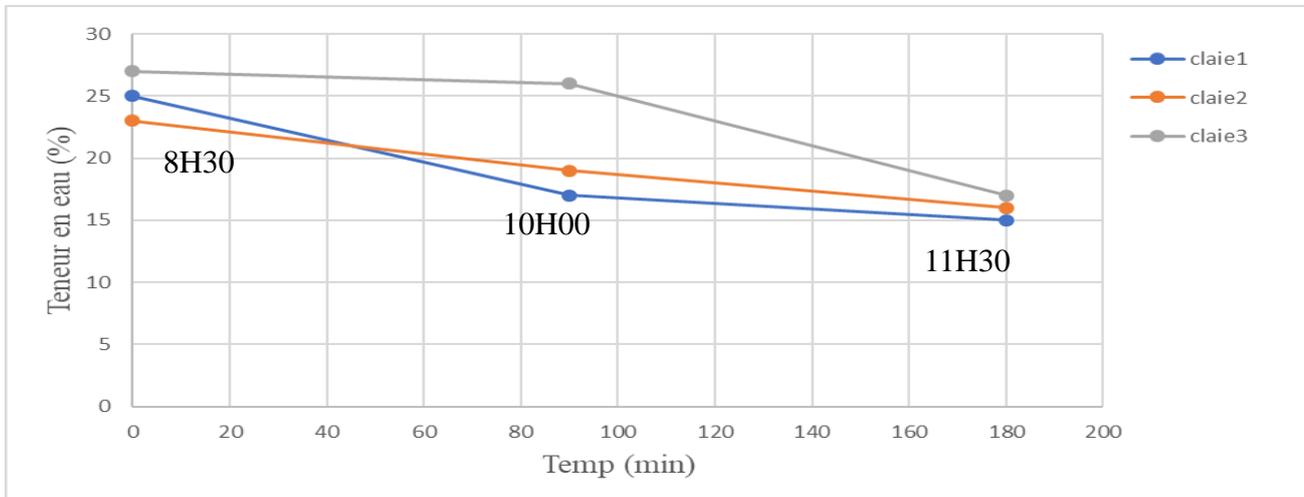


Figure 16: l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps au troisième jour de séchage

**Les figures (15, 16, 17)** donnent l'évolution en fonction du temps, de la teneur en eau dans le produit, au niveau des différentes claies du séchoir. Nous avons remarqué au fur et à mesure que l'air avance dans le séchoir, sa température diminue et son humidité augmente. Autrement dit, le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il régit une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air qu'à la surface du produit. Les effets de l'humidité de l'air agissent sur le produit pendant la nuit, entraînent une augmentation de l'humidité dans le produit. Cela explique un faible monté de la teneur en eau au niveau de la claie 2 dans **la figure 17**

#### III.2.4 L'influence de la température sur la cinétique du séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité du produit entre cet air et le produit humide [23]. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage [23]. Les figures suivantes donnent les profils de température suivants les trois claies durant les trois jours de séchage.

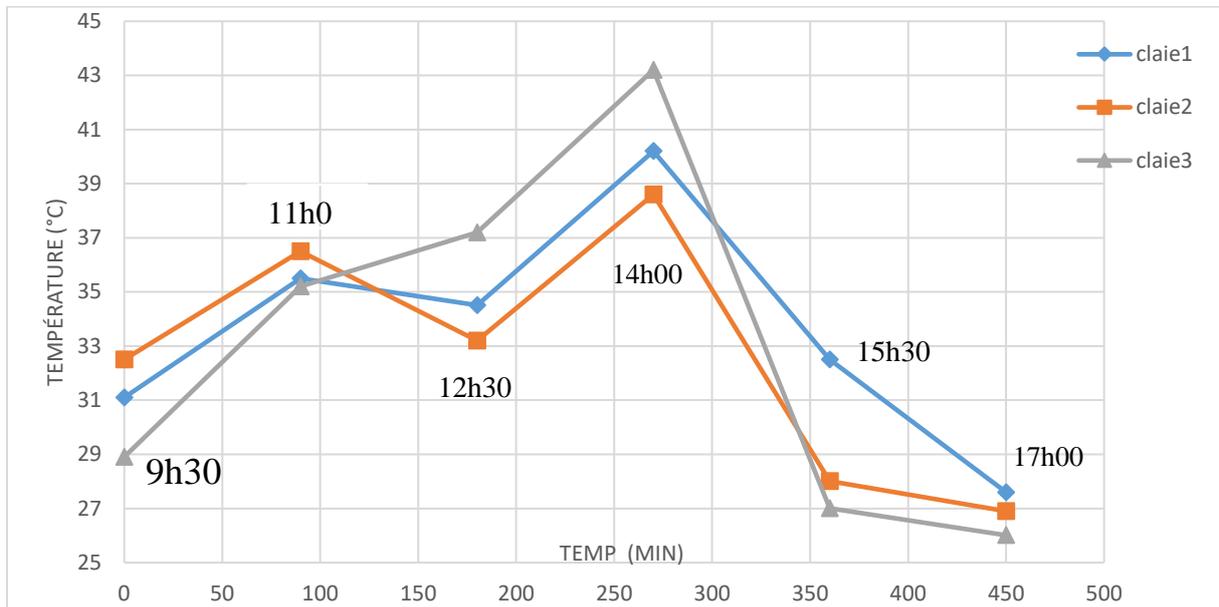


Figure 17 : Variation de la température de la mangue en fonction du temps au premier jour de séchage

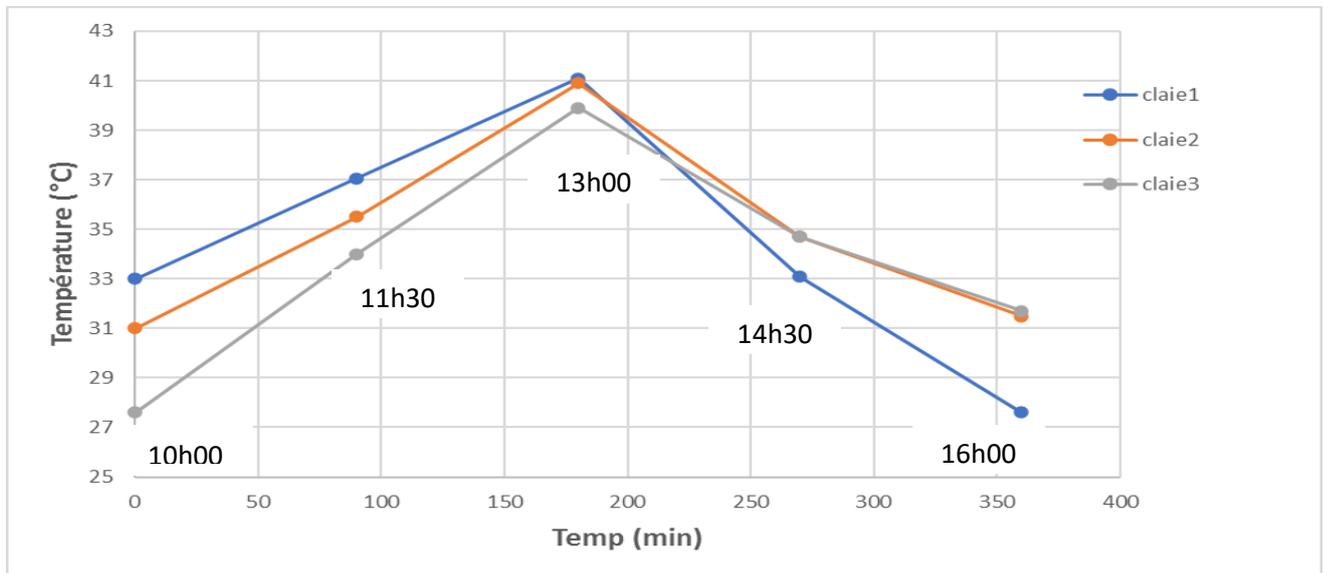


Figure 18: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au deuxième jour de séchage

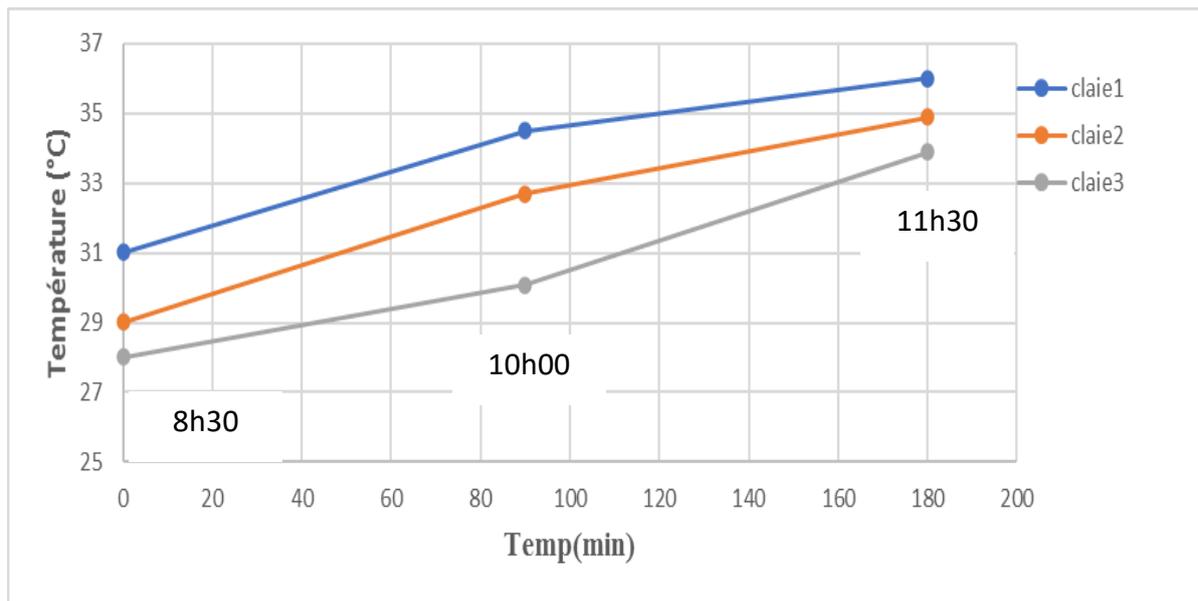


Figure 19: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au troisième jour de séchage

Les figures 18, 19 et 20 représentent la distribution des températures dans le séchoir solaire. On remarque sur ces figures que la température de l'air à l'entrée du séchoir varie entre 28,9°C et 43,2°C pour le premier jour et entre 27,6°C, 41,07°C pour le deuxième jour et 28,07°C, 38,8°C pour le troisième jour de séchage. L'augmentation de la température à l'intérieur de la chambre de séchage est due aux influences ajoutées du rayonnement solaire et effet de serre au niveau des capteurs solaires, et il atteint son maximum vers 14h00 au premier jour, à 13h00 deuxième jour et en fin à 11h00 au troisième jour. La fluctuation de température remarquée au niveau de la figure (11) est justifiée par les effets d'ombrage des nuages dans la journée du 11/07/2021 à 12h30. Les couvertes nuageuses ont un impact sur le taux d'irradiation au niveau des capteurs solaires, en diminuant la chaleur au niveau des claies.

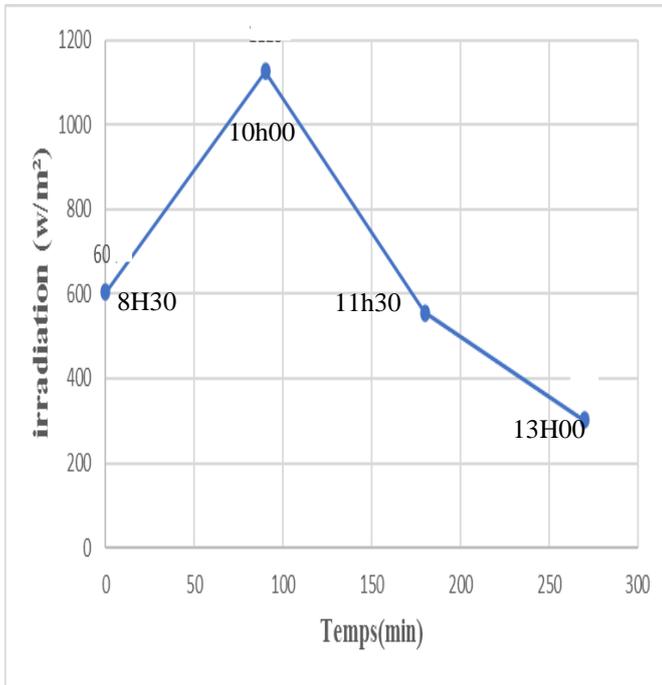
### III.3 Caractérisation expérimentale dans le cas du système à convection forcée

#### III.3.1 Évolution de la Température du Rayonnement solaire pour le séchage de la mangue (convection forcée)

La figure 12 représente l'évolution du rayonnement solaire global sur un plan horizontal en fonction du temps pendant les journées du 13 et 14 juillet 2021.

De 10h30 à 14h00, on observe une augmentation de l'irradiation alors que de 14h00 à 17h30, on observe une baisse de cette irradiation. La valeur maximale atteinte par le rayonnement est de 1125 W/m<sup>2</sup> pour la journée du 14 juillet 2021, de 975 W/m<sup>2</sup> pour la journée du 15 juillet 2021.

Irradiation du 15/07/2021



Irradiation du 14/07/2021

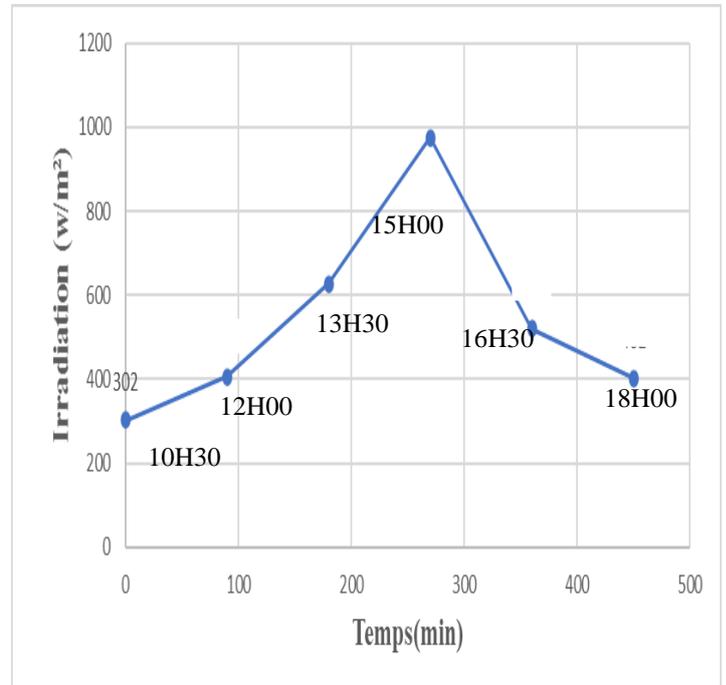


Figure 20: Rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal du 14 au 15/07/2021

### III.3.2 Évolution de la teneur en eau de la mangue en fonction du temps dans le cas du système forcé

La teneur en eau d'un produit est le rapport de la masse d'eau contenue dans ce produit sur la masse totale de ce même produit. Elle est exprimée en gramme d'eau pour 100 g de matière humide. Cette variation de teneur en eau est beaucoup plus rapide dans le cas du CSSF. Les résultats sont donnés dans les (figures 22 ,23) :

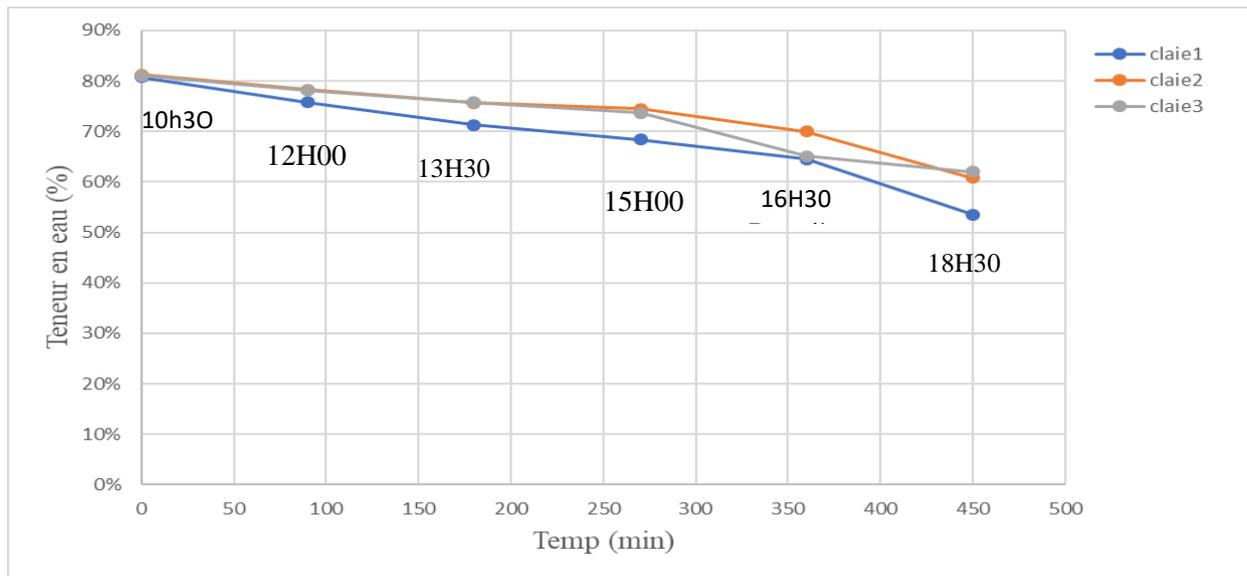


Figure 21: Variation de la teneur en eau en fonction du temps au premier jour de séchage

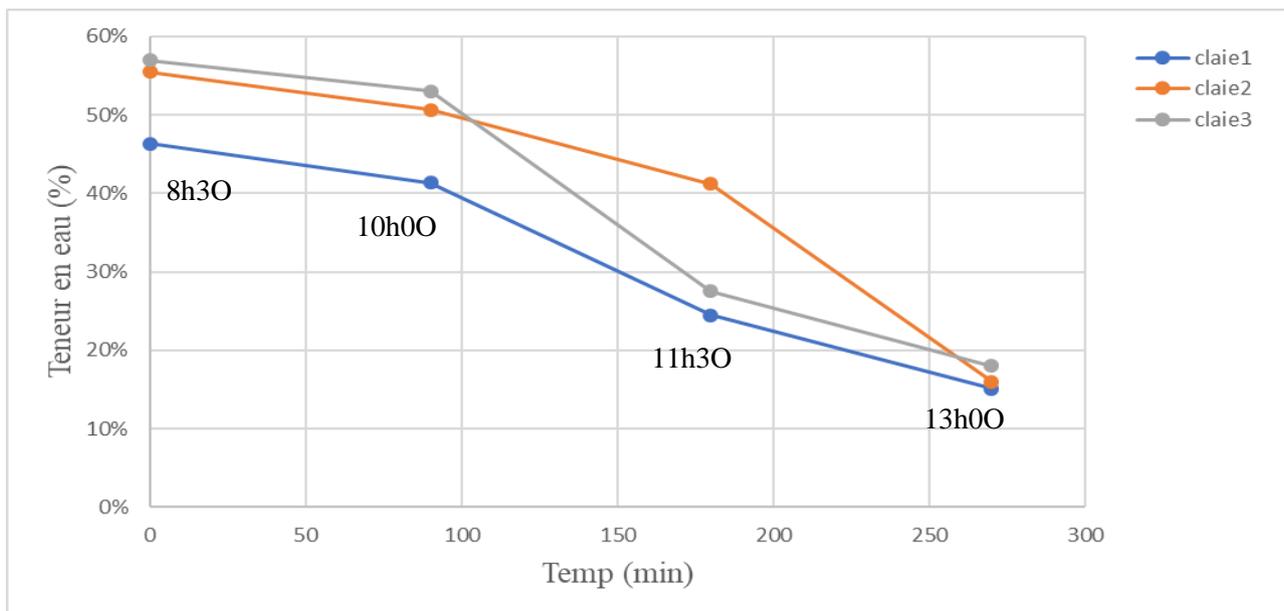


Figure 22 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps au deuxième jour de séchage

Les figures (22, 23) montrent que la variation de l’humidité des tranches de mangues de l’échantillon répartis sur les trois claies est presque identique. Toutefois cette humidité décroît progressivement. Cependant en fonction de la température de l’air et de la position des claies les pertes de masses diffèrent au cours du temps. L’utilisation du séchoir solaire à convection forcée entraîne une augmentation de l’air asséchant dans la chambre de séchage.

III.3.3 Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps (cas du système à convection forcée)

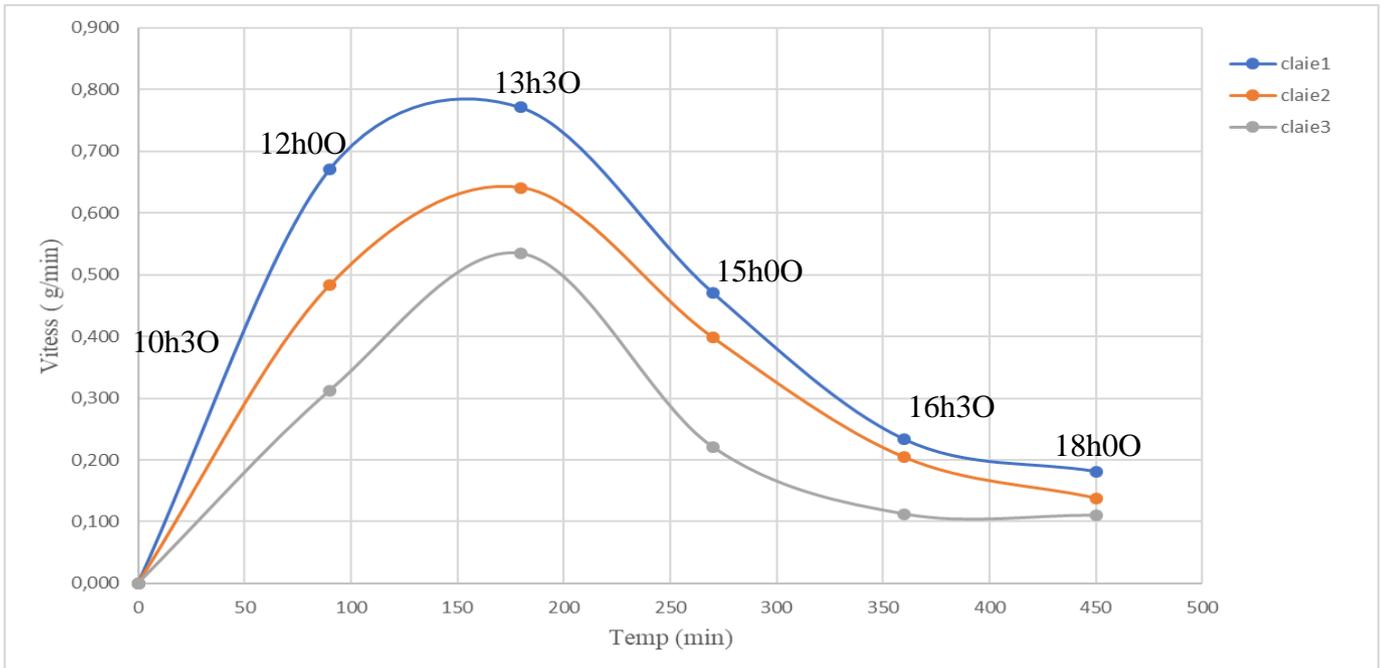


Figure 23: Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au premier jour de séchage

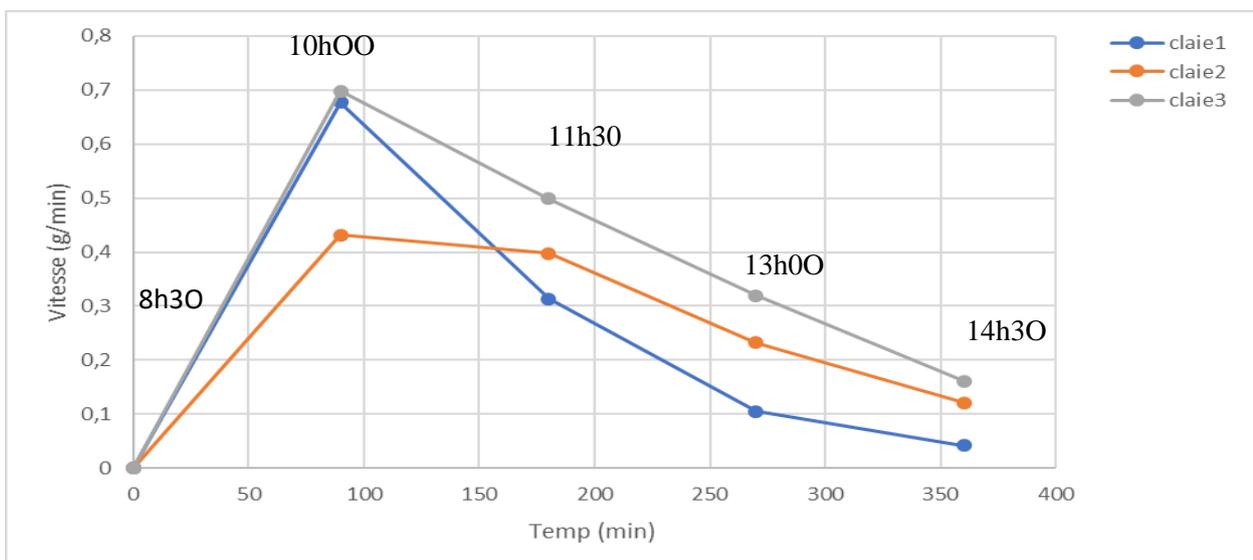


Figure 24 : Évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps au deuxième jour de séchage

L'analyse des figures 24 et 25 montre la vitesse de séchage est beaucoup plus rapide dans le cas du SSCF (figure 24 ,25). L'accroissement de la température de l'air asséchant provoque une augmentation de la quantité de chaleur transférée par convection aux tranches de mangue. Dans le cas du SSCF le débit d'air asséchant est beaucoup plus élevé, ce qui favorise une élévation de la concentration des vapeurs d'eau saturante (figure 24).

### III.3.4 l'influence de température de l'air de séchage sur la cinétique du séchage

La température de l'air asséchant influe rapidement sur la vitesse de séchage dans le cas du séchoir à convection forcé, mais aussi sur la température du produit comme le montre la figure 14.

Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes [24] étant donné que le transfert d'eau se réalise également sous deux formes : le transfert interne (il correspond à la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface) et le transfert externe (il correspond à l'élimination de la vapeur d'eau à la surface du produit par diffusion).

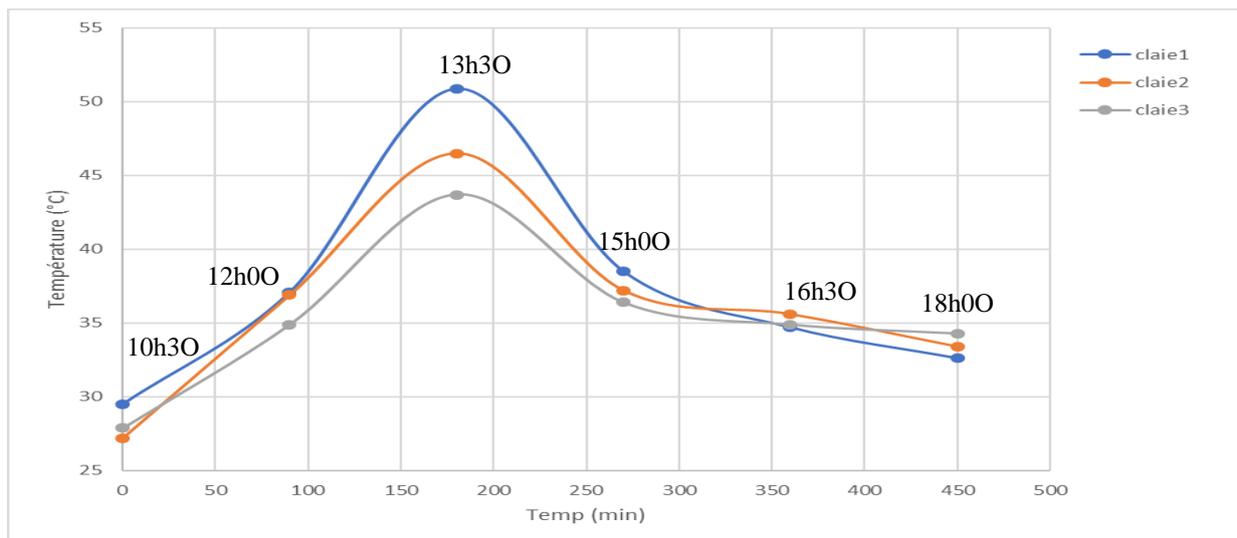


Figure 25: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au premier jour de séchage

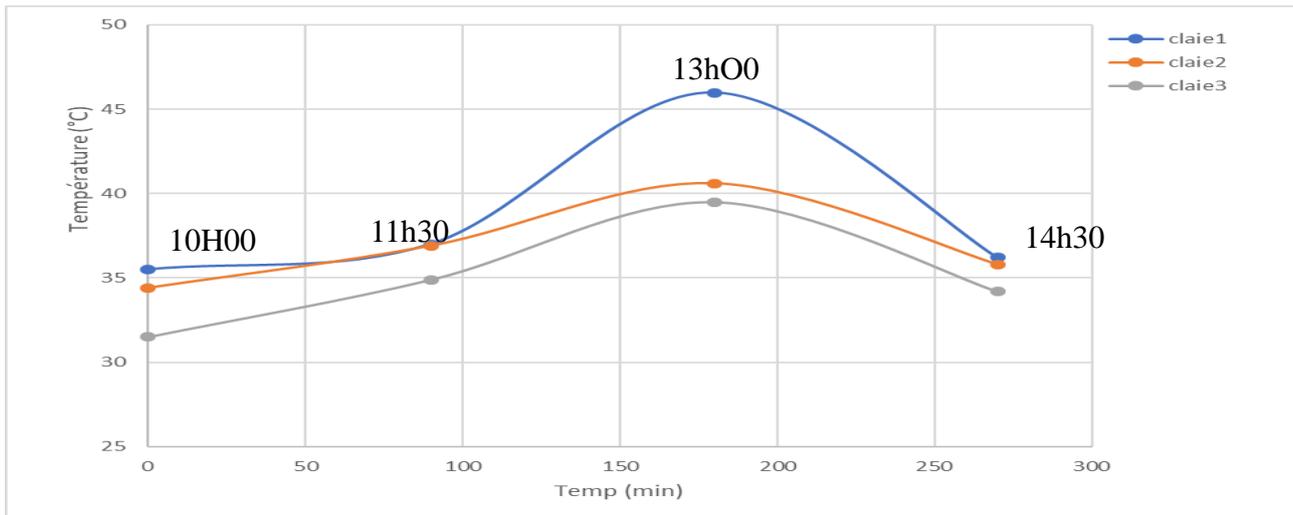


Figure 26: Variation de la température de la mangue en fonction du temps au deuxième jour de séchage

L'analyse de ces courbes montre que l'évolution de la température est presque identique sur les trois claies, l'augmentation de la température est beaucoup plus importante sur la claie 1 dans le cas des deux figures (26, 27) jusqu'à atteint son maximum vers 12h30 pour la **figure 26** et 13h30 pour la **figure 27**. Toutefois, en fin de journée le pic de température des mangues devient plus accentué pour les échantillons de la claie 1. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison de l'augmentation de la densité du flux solaire incident dans la matinée et de sa diminution dans l'après-midi, la température de l'air à la sortie du capteur est constamment croissante dans la matinée et décroissante dans l'après-midi.

### III.4 Analyse comparative entre un séchoir solaire à convection naturel et un séchoir solaire à convection forcé

Dans cette partie, nous allons déterminer, sur la base des résultats obtenus lors des essais de mesure, la charge de fonctionnement et le coût de l'investissement de ce séchoir et ensuite une élévation de prix de revient du Kg de mangue séché. Mais avant d'aborder cette étude nous allons étudier le coût et les dimensions du séchoir solaire à convection forcé conçu par la licence professionnelle du département de physique de l'université Assane Seck de Ziguinchor.

#### III.4.1 Descriptions du séchoir solaire à convection forcé puis à convection naturel

Les deux séchoirs ont la même description, sauf dans le cas du séchoir solaire à convection naturel, il est privé du système de ventilation.

✚ Description du séchoir SSCF et du SSCN

Les caractéristiques du séchoir sont :

- § Une chambre de séchage en bois (Lxlxh) constitué de trois claies
- § Un capteur solaire de surface
- § Un système de ventilation constitué de : (panneau solaire, batterie, deux ventilateurs de 12 V).
- § La capacité de charge moyenne est 461,51 g de produit frais par claie. Le chargement se fait à travers la porte d'accès de la chambre à partir des claies constituées d'un cadre en bois sur lequel on place les produits.
- § La durée de séchage est de 12 h pour le SSCF et 16,5 h pour le SSCN selon les conditions locales et les paramètres de séchage.

Ce modèle de séchoir a été conçu pour permettre le séchage des fruits et légumes. Son entretien se limite au renouvellement des claies et au nettoyage/ surveillance. Sa durée de vie est estimée à 7 ans.

### III.5 ANALYSE ECONOMIQUE

#### III.5.1 Le coût d'investissement

Il sera calculé en se référant au devis estimatif du séchoir conçu ici même à l'Université étant donné que l'enceinte de séchage sera pratiquement identique pour les deux séchoirs solaire (naturel et forcé). Dans le cas du système forcé, nous avons ajouté le système de ventilation.

A cet effet voici en récapitulatif le devis de fabrication du séchoir à convection forcée.

Tableau 4: Tableau récapitulatif du coût du séchoir solaire à convection forcée

Désignation	Prix total (F)
Séchoir solaire (SSCN)	250.000
Deux ventilateurs de 12 V	10.000
Un régulateur de tension	8.000
Un panneau solaire	35.000
Une batterie accumulation d'énergie	50.000
Un support du panneau d'inclinaison 15°	25.000
Des fils de connexion	2.000
Total	380.000

### III.5.2 La charge d'exploitation

#### a) Donnée économique

- La durée de campagne de séchage (correspond à la période de maturité de la mangue en Casamance) est de 6 mois et en moyenne, on sèche 15 cycles par mois pour le **SSCF**. Chaque cycle compte 2 jours soit 15 jours du mois et 90 jours de l'année ou 2160 heures de séchage par an.

Pour le cas du SSCN, on sèche 3 jours par cycle soit 10 jours du moi, 60 jours de l'année ou 1440 heures par an.

- Le prix d'achat de la mangue en moyenne est fixé à **50 F/Kg** et le transport est de 8 F/Kg en Casamance. [25]
- Le rendement de la production moyenne est de **1384,5/272,76** en moyenne c'est-à-dire on sèche **1384,5** g de masse fraîche pour obtenir **272,76** g de masse sèche.
- Les intrants (carton et sachets) sont estimés à 300 F/Kg.
- Le prix de vente de la mangue sèche est fixé à 4000 F le Kg. [26]

#### Hypothèses spécifiques

Tableau 5: Tableau de récapitulation de la production annuelle

////////////////////	Séchoir solaire à convection forcé	Séchoir solaire à convection naturel
Duré du cycle	12h	16,5h
Nombre de cycles par an	2160/12 = 180	1440/16,5 = 88
Quantité produit par cycle	1398,75 g produits frais	1370.34 g produits frais
Mangue sèches	276,75 g de masse sèche	268,77 g de masse sèche
Production annuelle	49.81 Kg	23,64 Kg

b) Evaluation des dépenses annuelles

Tableau 6: Tableau de la charge d'exploitation pour une année

Désignation	Séchoir à convection forcé				Séchoir à convection naturel			
	Quantité	Unité	Prix unitaire	Total	Quantité	Unité	Prix unitaire	Total
Matière première	498,15	kg	58	28892,7	415	kg	58	24070
Intrants	49,81	kg	300	14943	23,64	kg	300	7092
Entretien/Nettoyage	25000	U		25000	13000	U		13000
Main d'œuvre	49,81	kg	250	12452,5	23,64	kg	250	5910
Transport export	43,3347	kg	300	13000,4	20,5668	kg	300	6170,04
<b>Total</b>				<b>69.288,6</b>				<b>43.242</b>
Prix de revient (F/kg)	<b>1391,06</b>				<b>1829,19</b>			

c) Compte des résultats prévisionnels

Nous allons présenter le compte des résultats prévisionnels de l'activité de séchage sur 6 ans.

**Recette annuelle** = prix de vente du Kg\*(masse sèche total – masse totale sèche\*13%)

**RBE** = Recette – dépenses annuelle

Tableau 7: Tableau des résultats prévisionnels dans le cas du SSCN

	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE6	ANNEE7
Recettes		82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2
Recettes	250 000	43242	43242	43242	43242	43242	43242	43242
RBE	250 000	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2

**RBE : Résultats Brute d'Exploitation**

Tableau 8: Tableau des résultats prévisionnels dans le cas du SSCF

	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE 6	ANNEE 7
Recettes		173320	173320	173320	173320	173320	173320	173320
Recettes	380.000	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6
RBE	380.000	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4

d) Evaluation du coût d’amortissement des séchoirs en fonction des années

Le coût amortissement sera calculé en se référant sur le compte des résultats prévisionnels des deux séchoirs

**ACSSCN = RBE – le coût de la conception**

Tableau 8 : Tableau récapitulatif de l'amortissement du SSCF

	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE 6	ANNEE 7
Recettes		82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2	82267,2
Dépenses	250.000	43242	43242	43242	43242	43242	43242	43242
RBE	250.000	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,2	39025,5
ACSSCN		-210974,8	-171949,6	-132924,4	-93899	-54873,8	-15848,4	23999,7

**ACSSCN : Amortissement Cumulé du Séchoir Solaire à Convection Naturelle**

**ACSSCF = RBE – le coût de la conception**

Tableau 9 : Tableau récapitulatif de l'amortissement du SSCF

	ANNEE 0	ANNEE 1	ANNEE 2	ANNEE 3	ANNEE 4	ANNEE 5	ANNEE 6	ANNEE 7
Recettes		173320	173320	173320	173320	173320	173320	
Dépenses	380.000	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	69288,6	
RBE	380.000	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	104031,4	
ACSSCF		-275.968,6	-171.937,2	- 67.905,8	36.125,6	140.157,2	244.188,6	348.220

**ACSSCF : Amortissement Cumulé du Séchoir Solaire à Convection Forcée**

Le prix de revient est donc estimé à 1391,06 F/kg (**tableau 5**) de mangues séchées pour le SSCF et 1829,19 F/kg (**tableau 5**) pour le cas du SSCN, soit 1,3 fois plus grand que celui du SSCF. On voit donc que le SSCF est préférable à celui du SSCN pour deux raisons :

- § Le prix de revient moins cher
- § La durée du cycle est plus courte donc capacité de production ou débit de production est grande par rapport à celui du SSCN.

Cependant, le SSCN garantit un meilleur la qualité du produit séché. La mise en marche est facile et la seule surveillance est la permutation régulière des claies afin de permettre un séchage homogène.

Avec la conception des séchoirs, l'adaptation du SSCF permettra d'obtenir un rendement meilleur : diminution de la durée du cycle et une augmentation de la capacité de production.

La production annuelle nous permettra de calculer le revenu annuel, plus la production annuelle est importante plus le résultat brut d'exploitation est important. Le RBE annuelle du SSCF s'élève à 104031,4 F et 39025,2 F pour le SSCN. En se référant sur le RBE et le coût des deux séchoirs, l'amortissement du SSCN est atteint au-delà de la sixième année (**tableau 8**). Contrairement au SSCF avec un coût plus élevé son amortissement est obtenu à partir de la troisième année (**tableau 9**).

### Conclusion partielle

Le séchoir tel que présenté (SSCN), présente peu d'intérêt en Casamance. Plusieurs paramètres le démontrent :

Le temps de séchage par cycle est trop long ; il est estimé à 16h30min par cycle. Par rapport à la qualité du produit séché. Le SSCF donnent des produits de bonne qualité, avec un temps de séchage plus court 12 heures par cycle. À cela il faut ajouter le coût élevé du système de ventilation et le coût d'amortissement.

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Le problème des changements climatiques causé par l'utilisation des énergies conventionnelles nous amène à s'orienter vers de nouvelles stratégies à savoir l'exploitation d'énergie renouvelable notamment l'énergie solaire. À l'état actuel, le secteur fruitier est confronté à d'énormes pertes de produits agroalimentaires.

Ainsi l'un des principaux défis mondiaux est de pouvoir assurer la sécurité alimentaire d'une population mondiale en croissance.

Cette étude nous a permis d'une part de comprendre le fonctionnement du séchoir solaire à convection naturelle et forcée et déterminer certains de ces caractéristiques essentielles telles que la cinétique du séchage et de certains aspects des séchoirs solaires tel que le rendement et la performance et d'autre part de lutter contre les pertes de mangue en exploitant l'énergie solaire.

Les essais réalisés nous ont permis de comprendre les caractéristiques de l'air à l'entrée du séchoir. La capacité atteinte en moyenne est de 1390 g de tranche de mangue fraîche par cycle de séchage. Ce séchoir nous a permis atteindre un rapport de séchage de 16h30min ce qui est largement suffisant pour une conservation pendant plusieurs mois.

Malgré quelque difficulté technique liée au fonctionnement du SSCN. Les essais se sont bien déroulés. Les produits obtenus sont d'une très bonne qualité. Comparé au SSCF le séchage par convection naturelle offre une qualité meilleure.

Le séchoir solaire à convection naturelle offre une meilleure qualité et mais avec une moins bonne capacité de production. Ce pendant son prix de revient est de 1829,19 F/kg est beaucoup plus élevé que celui du SSCF qui est de 1391,06 F/kg de mangue séchés.

Malgré les avantages que le séchoir solaire à convection naturelle offre, sa durée du cycle de séchage, son coût, son prix de revient élevé limitent sa diffusion dans certains pays comme le Sénégal. Le système, tel qu'il est utilisé n'est pas rentable.

Au terme de ce travail, j'ai pu acquérir des compétences sur le séchage solaire de certains produits agroalimentaires. Ainsi le séchage solaire constitue une solution à la réduction des pertes de matières premières agricole, à la valorisation de ces dernières et à la création d'emplois par la mise en place d'unité de transformation. Toutefois la maîtrise des paramètres

## Conclusion générale

de séchage est importante pour la réussite du processus de séchage. Cependant le respect des normes et la qualité du produit final joue un rôle important tant au niveau de la clientèle qu'au niveau de la maîtrise de la technologie et dans la conquête de marchés extérieurs. Par contre, la limitation majeure de l'utilisation des séchoirs solaires vient de la nature discontinue de l'énergie solaire. Cette dernière est un apport énergétique dont l'intensité dépend du lieu, de l'heure du jour, de la saison et des conditions météorologiques. En conséquence, il est souvent nécessaire d'intégrer un système de stockage pour réduire les effets de la discontinuité et améliorer l'efficacité des séchoirs solaires.

En d'autres termes le soleil n'étant disponible que durant la journée, il serait intéressant de raccorder le séchoir avec un système de stockage d'énergie (ballon de stockage) permettant de stocker et de restituer l'air chaud durant la nuit.

## Référence et Bibliographie

### Références et Bibliographies

[1] : **ETOUNDI, PEYOU et TUTCHAMO (2007)**. CONCEPTION ET REALISATION DU SÉCHOIR SOLAIRE CONTINU, projet de mémoire ENSET de Douala, 233 pages (consulté le janv. 02, 2022).

[2] : <https://intelligences.info/article-1175-pourquoi-le-sngal-doit-miser-sur-le-solaire.html> Vue le 22/10/2020 à 11h

[3] : **H. HOUBOU. (2004)**. Étude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaire, **Mémoire de master**, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie

[4] : ANDRE JOFFRE. BE9164.Ingenieur Art et Métier PDG de TESCOL SA : Energie solaire thermique dans le bâtiment, Chauffe-eau solaire, 255 pages

[5] : **Bonazzi C. BimbenetJ. (2003)**. Séchage des produits alimentaires : Principes. Page 7

[6] : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-iso-18787/produits-agricoles-et-alimentairesdetermination-de-l-activite-de-l-eau/article/871164/fa181567>

[7] : **DEGLA A. et SIOUED R. (2015)** Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour. **Mémoire de master**, Université Kasdi Marbah OUARGLA, Algérie.

[8] : **DJOMNING, EBONGUE et YOUSOUFA (2017)**. Réalisation d'un séchoir frigorifique pour les produits agricoles mince, projet de mémoire ENSET de Douala

[9] : ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture -20/06/2006. Page 2

[10] : AMAR B. (2010) Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Mémoire de master, Université Mentouri – CONSTANTINE, Algérie.

[11] : **N. Berthomieu, (1943)**. FICHE SUR LES DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES A CONVECTION NATURELLE ET FORCEE, p. 13.

[12] : **Top Infos.1998**. Les Mangues. Spécial Mangues, 04/12/1998 –Fiche variétale, 6 pages.

[13] : **Laroussilhe (DE), F.1980**. Le Manguier. Techniques Agricoles et Productions Tropicales, 29. Ed **Maisonneuve et Larose**. Paris, 312 pages.

[14] : **Braz, J. (2004)**. Panorama du marché international de la mangue. Cas de la filière d'exportation du Brésil. **Mémoire Master of Science" n°68** ; CIHEAM-Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. 143 pages.

[15] : Article Sénégal export, production fruitière du Sénégal publié le 12 Octobre 2016 Consulté le 21/11/2021 à 12h30mn

## Référence et Bibliographie

[16] : **KASSE M. (2015)** Amélioration de la conservation des mangues 4ème gamme par l'utilisation d'un enrobage, d'un traitement antimicrobien et du conditionnement sous atmosphère modifiée. **Thèse de doctorant**, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Dakar.

[17] : <https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/fruits-exotiques-et-tropicaux/mangue/carte-identite>

[18] : **Joas J, Lechaudel M.** (2008). A comprehensive integrated approach for more effective control of tropical fruit quality. *Stewart Postharvest Review*, 4 : 1-14.

[19] : <https://infoetudes.com/presentation-universite-assane-seck-de-ziguinchor/>

[20] : **NORDEY T.** (2014), Analyse expérimentale et modélisation de l'hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues. Thèse de doctorant, Université d'Avignon et des pays

[21] : **livre sécher les produits alimentaires - Mode de comptabilité : Sécher des Produits Alimentaires.** Techniques, Procédés, Équipements. (**GRET, 1995**), 344 pages.

[22] : **J.-J. B. CATHERINE BONAZZI.** (2003) « Séchage des produits alimentaires », *Techniques de l'Ingénieur*, 377 pages (consulté le déc. 15, 2021).

[23] : **Guide pratique, Le séchage des mangues par Michel Rivier, Jean-Michel Méot, Thierry Ferré et Mathieu Briard,** Éditions Quæ, CTA (2009).

[24] : Ouvrage de Jean-François Rozis, GERES (Groupe énergie renouvelable et environnement) avec l'appui d'Alain Guinebault (GERES), auteur de la première édition (« le point sur le séchage solaire ») « (sécher des produits alimentaire) » (1995), 344 pages.

[25] : <http://www.hubrural.org/Senegal-Production-en-fruits-et.html?lang=fr>

[26] : <https://www.carvifood.com/produit/mangue-sechee-1000g/>

## Annexes

### Annexes

#### ANNEXE1

Température des tranches de mangue de mangue en fonction du temps dans le cas du système Naturelle			
Numéros de claie	1	2	3
Température (°C)	33	31	29
	37	36	34
	32,5	33	37
	34	32,8	43
	33	29	27
	29	31,5	26
	33,8	36	27
	37	41	34,5
	41,6	32	39,8
	33	31,5	32
	28	29	31,8
	31	32	28
	34	34	30
	36	35,5	32,5

#### ANNEXE2

Température des tranches de mangue de mangue en fonction du temps dans le cas du système forcée			
Numéros de claie	1	2	3
Température (°C)	29,4	28,5	26,1
	35	36	34
	52,4	47,5	44
	28,5	37,3	36
	36	35,5	35
	32,9	33	34,9
	35	34,2	32
	38,9	38	35
	47	41,7	39,09
	37,5	37	36,9

#### ANNEXE 3 : Température à l'intérieur de la chambre de séchage

Température ambiante à l'intérieur du séchoir (en °C) durant le processus de séchage dans le SSCN

45	47	50	55	44	43	45	47	50	45	34	45	51,7	53
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	------	----

#### ANNEXE 4 : Température à l'intérieur de la chambre de séchage

Température ambiante à l'intérieur du séchoir (en °C) durant le processus de séchage dans le SSCF

47	49	57	55	41	43	49	48	50	45
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----