

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE

De fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master
en Génie Mécanique, Option : Énergétique

Thème :

Etude et réalisation d'un séchoir couplé à un capteur
solaire à air

Encadré par :

M^r. MEKHLOUF Said

Réalisé par :

M^{lle}. OUACHEHI Dyhia

M^{lle}. LOUALI Souhila

Soutenu devant le jury composé de :

Président : M^r. FERROUK Mohamed UMMTO

Examineur : M^r. SALHI Faouzi UMMTO

Rapporteur : M^r. MEKHLOUF Said UMMTO

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous commençons par remercier notre dieu le tout puissant de nous avoir procuré volonté, courage et patience pour la réalisation de notre travail.

Nos remerciements profonds et haute considération aussi à :

- Mr.MAKHLOUF ; notre promoteur, pour avoir accepté de diriger ce modeste travail. Honorées d'avoir travaillé avec lui et tiré un immense profit de son savoir, de ses conseils utiles et de ses discussions fertiles.
- L'équipe du hall de technologie à Oued-Aissi.
- L'équipe du laboratoire MCI sis au département Génie mécanique.
- L'équipe du laboratoire Génie Civil.
- Les enseignants du département Biologie et Agronomie, pour le temps accordé et les informations fournies. Dont Mr BENGANA, Mr AMROUCHE, Mr KADI, Mlle MALLIL et Mr SEBAN.
- Mr MENOUEUR pour son orientation et ses recommandations.
- Mr HAMZAoui pour son écoute et ses conseils.
- Aux membres du jury qui examineront et évalueront notre travail.
- A toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet particulièrement KAOUDJT Hayat, FLISSI Yasmine, Mr KOUDACHE Massinissa, GUERIB Belaid, Billal HADJABER, BEN ADI Hamza, Karim MEZAGUER, OUCHKOUNE Kaouthar, MOUAICI Salim, AMOUR Karim.

Dédicaces

Comme dans chaque dédicace dédiée, remercier le bon Dieu est chose qui ne peut être sautée Grâce à lui j'ai eu courage et volonté mais surtout santé pour être là où j'en suis maintenant, à vous mon Dieu, Merci.

Etant humaine, je ne peux vivre en solitude mais étant une jeune fille appartenant déjà à une famille ; une famille qui a secoué ciel et terre pour mon bien être le plus profond, je ne peux que lui être reconnaissante jusqu'à mon éternité.

Papa, j'aurais aimé partager ce moment avec toi, voir dans ton regard la lueur de fierté en visualisant la femme forte que j'ai choisi d'être, mais t'as pris la vie de l'au-delà j'espère que tu me vois papa parce que je suis fière d'être ta filée adorée, je te remercie papa que j'aime tant qui me manque tant.

Maman, mon héroïne, ma sauveuse, mon exemple dans cette vie éphémère, les mots ne décriront pas assez la reconnaissance et l'amour ainsi que l'affection et l'admiration que j'ai pour toi, merci Maman.

Hey frangins, ne vous inquiétez surtout pas vous faites partis aussi parce que vous êtes somme de l'homme qui manquait à ma vie et vous avez pris souvent ma défense malgré nos disputes, nous sommes des parties complémentaires.

A ma très chère et unique sœur, celle qui me fait inspirer, merci pour ton encouragement permanent et ton soutien moral, comme on le dit : Dieu a donné une sœur au souvenir et il l'a appelée espérance.

Je n'ai que peu d'amis, mais ils sont tous exceptionnels. Et vous (Souhila, Yasmine et Hayet), encore plus que les autres, Qu'importe ce que je fais, ce que je traverse, vous êtes toujours présentes à mes côtés. Que je sois grognonne, male peignée, que je sois malade ou que je fasse le mauvais choix, je sais que vous êtes là et que vous ne me jugez pas. Je n'ai jamais rien à demander, vous devancez toujours mes attentes. Votre amitié est une véritable chance.

A toute ces personne que je n'ai pas citée, ma réussite vous est dédiée corps et âme, car chacun de vous a façonné une des parties de mon caractère et de mes choix de vie.

Et finalement, je dédie aussi ce travail et ma réussite à ma propre personne. Oui, parce que j'ai donné le meilleur de moi-même pour trouver ma voie mais surtout je me remercie de n'avoir jamais baissé les bras quelque soit la difficulté, même celle qui a pu me mettre à néant.

Dyhia

Dédicaces

En signe de reconnaissance, remerciement et respect je tiens à dédier ce modeste travail à :

Toi papa, maître de mes rêves et de premiers pas ; tu as toujours été pour moi le chemin vers demain, mon repère plein de lumière, mon guide mon grand frère et l'homme dont j'ai toujours été fière.

Maman, tu es pour moi synonyme de tendresse, force et patience... amour, respect et courage tu m'as transmis comme bagage. Tu m'as tout appris sauf à vivre sans toi ; quoi que je dise serait peu pour exprimer mon amour pour toi yema.

A vous mes adorables et chères sœurs (Djidji, Katia, Messad, Tyha), que serait ma vie sans vous ; toujours à mes côtés, même quand vous êtes au plus loin de moi (thelamth khas oulachiket), vous me comblez d'amour, consolez mes chagrins, corrigez et pardonnez mes erreurs . Vous êtes mes fleurs comblant mon bonheur.

Frangin, créature nuisible tu me rends dingue et tu ne cesses de m'énervé... mais de toi je ne peux me défaire puisque pour moi t'es capable de ruiner toute personne qui oserait toucher un cheveu de moi. Nous deux c'est pour le meilleur et pour le pire. Je t'aime énormément profite-en car je ne risque peut-être pas de te le répéter.

A mes neveux; Myriam, Manel, Aksil et Aylan, mes plus beaux cadeaux.

A mes beaux-frères, merci pour ce que vous êtes et ce que vous faites.

A toute ma famille ; exceptionnellement doudouche et tonton Kel, Vous êtes pour moi un cadeau du ciel.

Mes amis, ma seconde famille. Pour tous ces moments agréables, pour vos gestes adorables, vous remplissez ma vie de souvenirs indélébiles et êtes toujours à la hauteur; partagez mes rires, mes ires et me tendez la main pour que je ne tombe guère. Merci à vous, particulièrement à mes chères Hayet, Lynda, Yasmine, Lydia et Dyhia (l'amie et meilleur binôme de toute la vie).

A toute personne m'ayant donnée un coup de main ou encouragée même avec de simples mots et de loin.

Sou

La créativité est contagieuse, faites la tourner

Albert Einstein

NOMENCLATURE

Caractères	Signification	Unités
h	coefficient de convection	$W/m^2.K$
h_p	Coefficient global de pertes du capteur	$W/m^2.K$
$h_{c,p-c}$	le coefficient d'échange convectif entre deux surfaces parallèles	$W/m^2.K$
$h_{c,c-a}$	Coefficient d'échange convectif dû au vent	$W/m^2.K$
$h_{r,p-c}$	Coefficient d'échange radiatif entre la paroi absorbante et la couverture	$W/m^2.K$
$h_{c,p-a}$	Coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air extérieur	$W/m^2.K$
$h_{r,p-b}$	Coefficient d'échange radiatif entre la paroi et le bas	$W/m^2.K$
$h_{r,c-a}$	Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et l'air extérieur	$W/m^2.K$
$h_{c,p-b}$	Coefficient d'échange convectif entre la paroi et le bas	$W/m^2.K$
n	numéro du jour à partir du premier Janvier.	-
q_{cf}	Débit calorifique du fluide caloporteur	$W/°C$
u	vent la vitesse moyenne du vent	m/s
v	Vitesse de l'air	m/s
C	Chaleur spécifique	$J/kg\ °C$
$C_{p\ pr}$	Capacité calorifique massique du produit	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
$C_{p\ a}$	Chaleur massique de l'air de séchage	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C	Concentration volumique de l'eau	kg_{eau}/m^3
D_m	Débit massique de l'air de séchage	$kg.s^{-1}$
$h_{a,pr}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et le produit	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{a,p}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air de séchage et la paroi interne	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_{vfpr}	Coefficient d'échange par convection entre l'air et le produit	$W/m^2\ K$
H_r	Humidité relative	%
$L_{v(T_h)}$	Chaleur latente de vaporisation du produit à la température humide de l'air de séchage	$J.kg^{-1}_{eau}$
L_{vap}	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	$J.kg^{-1}_{eau}$
L_v	Chaleur latente d'évaporation de l'eau	$J.kg^{-1}_{eau}$
M_{pr}	Masse du produit	kg
M_s	Masse sèche	kg
M_h	Masse humide	kg

m_a	Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir	kg.s^{-1}
m_e	Débit d'eau évaporée	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
m_{prs}	Masse du produit sec	kg
m_s	Masse anhydre de l'échantillon de produit	kg
M_{pr}	Masse du produit à sécher	kg
P	Pression atmosphérique	Pa
P_{ev}	Puissance d'évaporation de l'eau contenue dans le produit	$\text{kJ.kg}^{-1}_{\text{eau}}.\text{s}^{-1}$
P_{vp}	Pression de vapeur d'eau à la surface du produit	Pa
P_{vs}	Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé	Pa
P_{vsat}	Pression de la vapeur saturante	Pa
Φ_m	Flux de matière	$\text{kg/m}^2.\text{s}$
X	Teneur en eau du produit	m^2
S_{pr}	Surface d'échange du produit	
S_{fpr}	Surface d'échange entre l'air et le produit	m^2
S_v	Surface entre deux claies	m^2
t	Le temps	s
T	La température	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Température de séchage	K
T_p	Température de la paroi interne de l'enceinte de séchage	K
T_{a*}	Température d'entrée de l'air de séchage	K
T_a	Température de l'air	K
T_{pr}	Température des produits	K
Δt	Pas de temps	S
X	Teneur en eau initiale du produit	$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$
X_0	Teneur en eau initiale	% MS
W_a	Teneur en eau de l'air de séchage	$\text{kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{as}}^{-1}$

Caractères grecques		
ε	coefficient d'émission	-
α	coefficient d'absorption	-
λ	Conductivité thermique	W/m.K
ρ	Masse volumique	Kg/ m ³
ζ	taux de transmission	-
Φ	flux de chaleur transmis par conduction	W/m ²
μ	Viscosité dynamique de fluide	Pa.s
Φ_{sa}	Flux solaire absorbé	W/m ²
Φ_p	Flux perdu par la paroi absorbante	W/m ²
Φ_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	W/m ²
Φ_{st}	Flux stocké dans le capteur	W/m ²
$\Phi_{c,p-c}$	Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture	W/m ²
$\Phi_{r,p-c}$	Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture	W/m ²
$\Phi_{c,c-a}$	Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur	W/m ²
$\Phi_{r,c-c}$	Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.	W/m ²
$\Phi_{c,p-b}$	Flux échangé par convection-conduction entre la paroi et le bas	W/m ²
$\Phi_{r,p-b}$	Flux échangé par rayonnement entre la paroi et le bas	W/m ²
$\Phi_{r,c-a}$	Flux échangé par rayonnement entre la couverture et l'air extérieur	W/m ²

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I-1 : Vu d'un capteur solaire non vitré. [11]	4
Figure I-2 : Description d'un capteur solaire non vitré. [11]	4
Figure I-3 : Capteur plan vitré. [24]	5
Figure I-4 : Capteur à tubes sous vide. [23]	6
Figure I-5 : Schéma éclaté d'un capteur solaire plan. [8]	7
Figure I-6 : Types de transferts dans le séchage. [2]	9
Figure I-7 : Représentation schématique d'un corps solide. [1]	9
Figure I-8 : Courbe de séchage. [3]	12
Figure I-9 : Séchage a l'air libre. [5]	14
Figure I-10 : Le principe d'un échoir solaire direct. [6].....	15
Figure I-11 : Le principe d'un échoir solaire indirect. [6]	16
Figure I-12 : Le principe d'un séchoir solaire mixte. [6]	17

Chapitre II : Etude théorique

Figure II-1 : Capteur solaire thermique. [11]	19
Figure II-2 : séchoir solaire.	19
Figure II-3 : Transmission lumineuse et facteur solaire. [8]	22
Figure II-4 : L'effet de serre.	23
Figure II-5 : Ecoulement d'un fluide en régime laminaire.	29
Figure II-6 : Ecoulement d'un fluide en régime turbulent.	30
Figure II-7 : réflexion, transmission et absorption du rayonnement.	31
Figure II-8 : Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert.	33

Chapitre III : Etude expérimentale

Figure III-1 : Opération de perçage.	42
Figure III-2 : Support d'assemblage.	43
Figure III-3 : Assemblage des canettes.	43
Figure III-4 : Tubes peints en noir mate.	44

Figure III-5 : Collecteur de sortie d'air.	45
Figure III-6 : Chicane emballé avec de l'aluminium.	45
Figure III-7 : Le boîtier.	46
Figure III-8 : Images représentatives de l'isolation thermique du boîtier.	47
Figure III-9 : joint en plastique.	48
Figure III-10 : Les extracteurs d'aspiration.	49
Figure III-11 : Emplacement des extracteurs.	49
Figure III-12: Images représentative du prototype réalisé.	49
Figure III-13 : Le boîtier.	50
Figure III-14 : Isolation thermique de l'intérieur du séchoir.	51
Figure III-15 : Les claies.	51
Figure III-16 : Support de claies.	52
Figure III-17 : piment rouge après l'avoir nettoyé et coupé.	53
Figure III-18 : l'ail et la banane au moment de la pesée.	53
Figure III-19 : Produit disposé dans les pétries.	53
Figure III-20 : balance et étuve utilisés.	54

Chapitre IV : Résultats et discussions.

Figure IV-1 : Pesée des 04 échantillons de piment rouge en fonction du temps.	58
Figure IV-2 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps t.	59
Figure IV-3 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.....	60
Figure IV-4: Pesée des 07 échantillons du piment rouge piquant en fonction du temps.	
Figure IV-5 : Variation de la masse totale en fonction du temps.	63
Figure IV-6 : Evolution de la teneur en eau dans le piment piquant en fonction du temps.....	63
Figure IV-7 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.	64
Figure IV-8 : Pesée de l'ail en fonction de temps.	65
Figure IV-9 : Variation de la teneur en eau de l'ail au cours de séchage.	66
Figure IV-10 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.	66
Figure IV-10 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.	67
Figure IV-12: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.	68
Figure IV-13 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.	69

Figure IV-14 : Pesée du piment rouge doux par étuve en fonction du temps.	71
Figure IV-15 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps du temps.	71
Figure IV-16 : Pesée de l'ail durant 04 jours de séchage dans l'étuve en fonction du temps.	73
Figure IV- 17: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.....	73
Figure IV-18 : Pesée du piment piquant durant 03 jours de séchage dans l'étuve en fonction du temps.	75
Figure IV-19 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.	76
Figure IV-20 : Variation de la masse en Kg des quatre produits.	76
Figure IV-21 : Variation de la teneur en eau des quatre produits en Kg eau/Kg ms. ..	77
Figure IV-22 : Variation de la vitesse de séchage des quatre produits.	78

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
Généralités sur le capteur solaire, séchoir solaire et le séchage.	
I. Introduction.....	2
I.1. Capteur solaire	2
I.1.1. Fonctionnement et types de capteurs solaires thermiques	2
I.1.2. Description d'un système de conversion thermique.	2
I.1.3. Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	3
I.1.4. Types de capteurs solaires plans	3
I.1.4.1. Capteurs plans non vitrés	3
I.1.4.2. Capteurs plans vitrés	4
I.1.4.3. Capteurs à tubes sous vide	5
I.1.5. Différents éléments d'un capteur solaire plan	6
I.1.5.1. Plaque en verre	6
I.1.5.2. Fluide caloporteur	6
I.1.5.3. Absorbeur	6
I.1.5.4. Isolant.....	7
I.1.6. Orientation optimal d'un capteur solaire.	7
I.2. Séchoir solaire	8
I.2.1. Qu'est ce que le séchage ?	8
I.2.2. Mécanisme de séchage.....	8
I.2.3. Différents mode de séchage	10
I.2.3.1. Séchage par conduction.....	10
I.2.3.2. Séchage par convection.....	10
I.2.3.3. Séchage par rayonnement	10
I.2.3.4. Séchage par micro-ondes	10
I.2.3.5. La lyophilisation.....	11
I.2.3.6. Par séchage solaire.	11
I.2.4. Les trois phases de séchage.....	11
I.2.5. Caractéristiques de l'air de séchage	12

A) Teneur en eau (Humidité)	13
B) Humidité absolue	13
C) Humidité relative	13
I.2.6. Le séchage solaire	14
I.2.6.1. Séchage a l'air libre.....	14
I.2.5.2. Séchoir solaire	15
A) Séchoir solaire direct	15
B) Les séchoirs solaires indirects	16
c) Séchoir solaire mixte.	16
I.3. Recommandations.....	17
Conclusion.....	18
Chapitre II : Etude théorique	
II. Introduction	19
II.1. Caractéristiques techniques du capteur solaire et du séchoir solaire	19
II.1.1. L'absorbeur	20
II.1.2. La couverture transparente.....	21
II.1.3. L'isolation thermique.....	24
II.1.3.1. Partie avant de l'absorbeur	24
II.1.3.2. Parties arrière et latérale	24
II.1.4. Le fluide caloporteur	25
II.1.5. Le boîtier.....	26
II.1.6. Claies pour disposer les aliments agro-alimentaires.....	27
II.2. Rappels sur les éléments d'échanges thermiques	27
II.2.1. Transfert de chaleur par conduction	27
II.2.2. Transfert de chaleur par convection	28
II.2.2.1. En convection naturelle.....	29
II.2.2.2. En convection forcée.....	30
II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement	31
II.3. Bilan thermique global de la paroi absorbante	31
II.4. Expression du coefficient global de pertes	32
II.6. Efficacité du séchoir	39
II.5. Rendement du capteur.	40

Conclusion.....	41
Chapitre III : Etude expérimentale	
Matériels et méthodes.	
III. Introduction	42
III.1. Les buts recherchés par cette réalisation	42
III.2. Fabrication du prototype étudié.....	42
III.3. Les différentes étapes de réalisation.....	43
III.3.a. Le capteur solaire.....	43
III.3.a.1. Absorbeur.....	43
III.3.a.1.1. Préparation des cannettes	43
III.3.a.1.2. Assemblage	44
III.3.a.1.3. Traitement de surface des tubes	45
III.3.a.2. Fabrication des collecteurs.....	47
III.3.a.3. Réalisation du boîtier	48
III.3.a.4. Isolation.....	49
III.3.a.5. Couverture transparente	49
III.3.a.6. Le système de ventilation.....	50
III.3.b. Séchoir solaire	52
III.3.b.1. Fabrication du boîtier.....	52
III.3.b.2. L'isolation thermique.....	53
III.3.b.3. Les claies	53
III.3.b.4. Support.....	54
III.4. Expériences	54
III.4.1. Séchage par séchoir solaire	54
III.4.1.1. Description de l'expérience	55
III.4.2. Le séchage par étuve	56
Conclusion.....	58
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV. Introduction	59
IV.1. Résultats des expériences et discussion	59
IV.1.1. Premier essais Le 09 et 10 octobre 2019.....	59
IV.1.1.a. Séchage du piment rouge doux.....	56

IV.1.1.b. Séchage du piment rouge piquant.....	60
IV.1.1.c. Séchage de l’ail.....	64
IV.1.1.d. Séchage de la banane.....	67
IV.1.2. Essais du 20 au 24 octobre 2019, séchage par étuve.....	70
IV.1.2.a. Séchage du piment rouge doux.....	70
IV.1.2.b. Séchage de l’ail.....	72
IV.1.2.c. Séchage du piment rouge piquant.....	74
IV.2. Interprétation et discussion des résultats obtenus	77
IV.2.1. Au niveau dispositif	77
IV.2.2. Au niveau des produits agricoles	78
Conclusion.....	82
Conclusion générale	83

Liste des tableaux

Chapitre II : Etude théorique

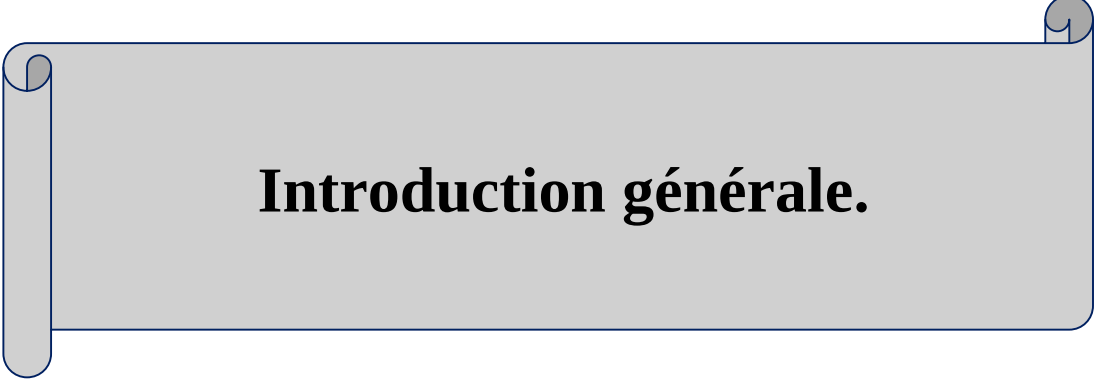
Tableau II-1 : Le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ϵ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur. [8]	21
Tableau II-2 : Caractéristiques thermo physiques de matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur de capteurs solaires plans.	21
Tableau II-3 : Conductivité thermique de quelques matériaux.	22
Tableau II-4 : Propriétés thermo-physiques de l'air.	25

Chapitre III : Etude expérimentale

Tableau III-1 : Caractéristiques des canettes.	44
Tableau III-2 : Caractéristiques des collecteurs.	46
Tableau III-3 : Caractéristiques du boîtier.	47
Tableau III-4 : Caractéristiques de l'isolation.	47
Tableau III-5 : Caractéristique de la couverture transparente.	48
Tableau III- 6 : Caractéristiques techniques du boîtier.	50
Tableau III-7 : Caractéristiques d'isolation.	51
Tableau III-8: Caractéristiques techniques du support.	52

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV-1 : Pesées du piment rouge doux en chaque écart de temps.	57
Tableau IV-2 : Pesée du piment rouge piquant en 3 jours de séchage	61
Tableau IV-3 : Pesée de l'ail en 3 jours de séchage.	65
Tableau IV-4 : Pesée de la banane en 3 jours de séchage.	67
Tableau IV-5 : Pesé du piment rouge doux en 04 jours de séchage par étuve.	70
Tableau IV-6 : Pesée de l'ail par étuve durant 04 jours de séchage.	72
Tableau IV-7 : Pesée du piment rouge piquant en 04 jours de séchage dans l'étuve. .	74



Introduction générale.

Introduction générale

Un problème généralement posé en agroalimentaire est celui de la conservation des denrées agricoles. En effet, placées dans des conditions d'ambiance, celles-ci entrent dans une phase de putréfaction irréversible, d'autant plus rapide que l'environnement est malsain. La conservation consiste alors à trouver des moyens de ralentir autant que possible les transformations internes à l'origine du pourrissement. Deux méthodes sont généralement employées :

- ✓ **Le froid intense** : consiste à placer les denrées dans une ambiance saine, d'hygrométrie convenable et à basse température. Ici, c'est la basse température qui ralentit la putréfaction ;
- ✓ **Le séchage** : consiste à soustraire du produit une partie de son eau, qui est un grand catalyseur des réactions de pourrissement.

La grande différence entre ces deux procédés de conservation se trouve dans l'aspect final du produit au moment de la conservation. Par congélation, on a un produit plus proche de son aspect initial que par séchage. Par contre, la congélation exige une mobilisation de machine et d'énergie durant toute la période de conservation, ce qui n'est pas le cas du séchage, où cette mobilisation est faite ponctuellement et une fois pour toute.

Il apparaît donc là tout l'intérêt économique du séchage. Le challenge étant alors de pouvoir offrir au consommateur un produit séché ayant gardé la majorité, sinon toutes ses propriétés nutritionnelles et organoleptiques. C'est dans ce sens que les techniques de séchage à faible température sont prometteuses.

D'où l'intérêt qu'il y a aujourd'hui à développer des technologies de séchage de plus en plus performantes pourquoi pas en exploitant une énergie économique, écologique et inépuisable dont notre pays n'en manque pas qui est le soleil.

Ce travail s'inscrit donc dans cette ligne, et a pour thème : «Etude d'un séchoir couplé à un capteur à air ». Il s'agira ici de spécifier, de concevoir et de réaliser un tel séchoir.

Dans un premier temps, des généralités viendront fixer les idées sur le capteur solaire qui jouera un rôle essentiel puis le séchoir, le séchage et le processus de conception.

Ensuite, une étude théorique simplifiée permettra d'analyser et d'expliquer quelques notions thermiques relatives à notre projet.

A base de modèles de calcul simplifiés, le dimensionnement des composants du séchoir suivra.

Puis alors, on présentera les grands points de la phase de montage et l'essai de première mise en route et finirons cette partie par discuter tout résultat obtenu.

Enfin, une conclusion qui englobera une interprétation générale des résultats permettra de clôturer ce travail.

Introduction

En Algérie, l'énergie solaire reçue annuellement est colossale. En été 2019 le pays a été classé premier comme plus chaud à l'échelle mondiale atteignant une température moyenne de 53.3°C. Contrairement aux énergies fossiles, le soleil est une source d'énergie inépuisable, renouvelable, écologique et gratuite qui permet d'effectuer plusieurs opérations, dont le procédé de séchage.

Des travaux de recherche ont été réalisés sur les systèmes de séchage solaire direct, indirect et mixte pour remplacer les systèmes traditionnels et améliorer leur rendement. Dans ce même principe nous avons confectionné un dispositif permettant d'exploiter l'énergie d'insolation et d'optimiser le processus de séchage avec le moindre coût.

Composé d'un capteur solaire à air et d'une unité de séchage, le séchoir est donc indirect. Mais avant de passer à la partie conception et réalisation, nous allons d'abord déterminer, dans ce chapitre les généralités de chacun de ces deux essentiels éléments.

I.1. Capteur solaire

Un capteur solaire est un dispositif servant à réaliser à partir du rayonnement solaire un gain d'énergie thermique utile au chauffage d'air ou de l'eau. Il peut être du type capteur plan ou à concentration. Les capteurs à concentration utilisent un réflecteur de forme particulière permettant de focaliser les rayons solaires tombant sur la surface absorbante à des températures plus hautes que les capteurs plans. Cependant pour les applications se limitant uniquement au séchage solaire, les capteurs solaires plans offrent des élévations de températures satisfaisantes et ont un coût plus faible. Ce dernier est constitué essentiellement d'une surface absorbante peinte en noir, qui absorbe le rayonnement solaire et le transmet thermiquement à un fluide caloporteur qui est généralement l'air ou l'eau. En séchage solaire l'air utilisé comme fluide caloporteur circule généralement à travers un conduit qui joue le rôle d'un absorbeur.

I.1.1. Fonctionnement et types de capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires constituent des dispositifs qui transforment l'énergie produite par le soleil sous forme de rayonnement direct et diffus en énergie utile pour l'activité humaine. Cette transformation est possible grâce à ses différentes composantes associées en montage complet ou mobile selon le type de capteur. Chaque composante joue un rôle important dans le processus de transformation de l'énergie et nécessite d'être explorée afin de mieux maîtriser sa fonction.

I.1.2. Description d'un système de conversion thermique

Les dispositifs de conversion thermique sont essentiellement composés de différentes parties : une surface permettant de collecter le rayonnement solaire, un canal de circulation d'air caloporteur pour l'accumulation et transport de l'énergie, un fluide caloporteur qui est généralement de l'eau ou de l'air, un matériau isolant pour minimiser les déperditions thermiques vers l'extérieur du capteur et enfin un tuyau en aluminium permettant d'évacuer l'air chaud vers le milieu extérieur.[1]

I.1.3. Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan

Pour ce type de capteur, la tôle est généralement utilisée comme absorbeur. La tôle sous l'effet des rayons solaire s'échauffe et va réémettre des rayons infrarouges de grandes longueurs d'onde :

-) Côté supérieur, les rayons infrarouges seront piégés par le vitrage qui leur paraît opaque. La distance tôle (absorbeur) –vitre doit alors être dimensionnée pour limiter au mieux les pertes par conduction convection dans la couche d'air emprisonnée.
-) Côté inférieur, les rayons infrarouges vont chauffer le fond du capteur ; l'air circulant entre la tôle et le fond du caisson va acquérir des calories par convection au contact de ces deux surfaces. [2]

Ces modèles de capteurs solaires peuvent être classés en capteurs «sans couverture transparente » et en capteurs à « couverture transparente ».

I.1.4. Types de capteurs solaires plans

I.1.4.1. Capteurs plans non vitrés

Ce sont des capteurs simples de grande surface de collecte produisant des températures relativement basses (figure I.1). Ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et de l'eau sanitaire. Un modèle de ces capteurs est présenté sur la figure I.2. [2-3]



Figure I-1 : Vue d'un capteur solaire non vitré. [4]

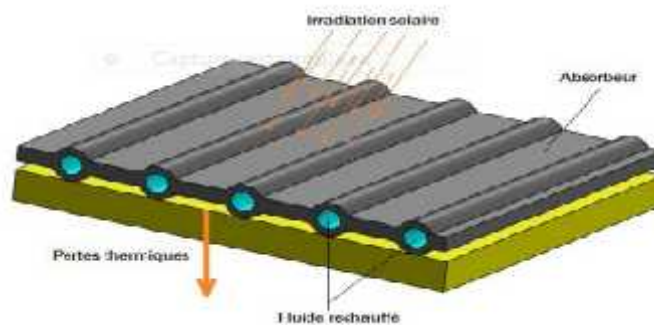


Figure I-2 : Description d'un capteur solaire non vitré. [5]

I.1.4.2. Capteurs plans vitrés

Le type de capteur le plus utilisé est le capteur plan vitré. Il comprend un coffre isolant sur lequel est fixée une vitre. A l'intérieur sont disposés des absorbeurs noirs destinés à capter l'énergie solaire. Un liquide caloporteur circulant dans des tuyauteries en contact avec l'absorbeur prélève les calories reçues du soleil. La vitre située sur la face avant et l'isolant permettent de réduire les déperditions de chaleur. L'absorbeur peut être recouvert d'un revêtement sélectif qui limite le rayonnement vers l'extérieur et améliore ses performances.

Ce type de capteur est bien adapté à la production de l'eau chaude sanitaire et au chauffage des bâtiments en métropole... (Températures d'eau chaude généralement comprises entre 30 et 60°C). [3]

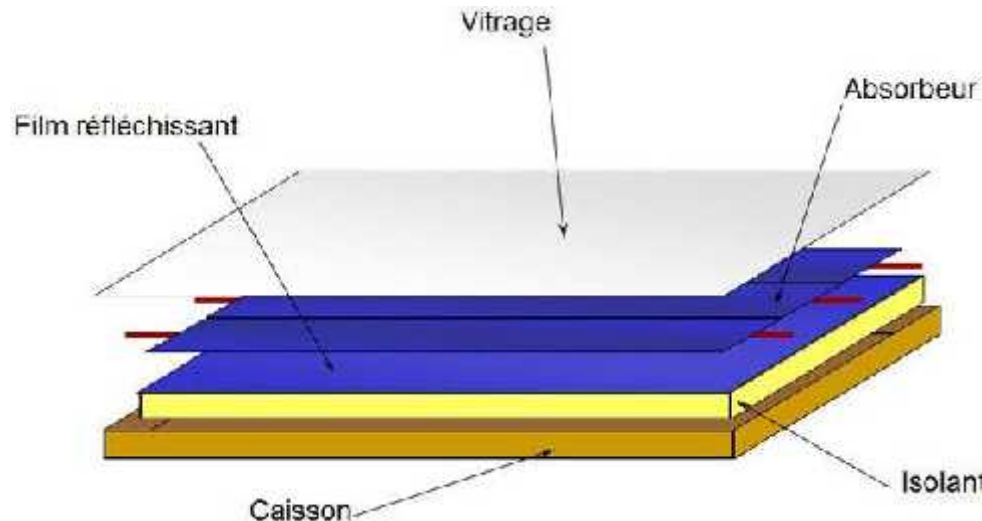


Figure I-3 : Capteur plan vitré. [6]

Les capteurs solaires plans à air "à couverture transparente" les plus utilisés sont :

- Les capteurs solaires à air passe-avant : L'air à chauffer circule dans le conduit entre la couverture transparente et la plaque absorbante. Elle lèche ainsi la plaque chauffée par effet de serre. Le terme passe-avant signifie donc que l'air passe au dessus de l'absorbeur.
- Les capteurs solaires à air passe-arrière : Une couche d'air sépare l'absorbeur de la couverture transparente et l'air caloporteur circule entre l'arrière de l'absorbeur et l'isolation inférieure. Les capteurs solaires à air passe-arrière ont généralement un rendement plus élevé que ceux à air passe-avant.
- Les capteurs solaires à air multi-passes : L'air circule sur les deux faces de l'absorbeur suspendu, augmentant la surface d'échange. L'avantage de ce type de capteur est que l'absorbeur est peint en noir donc reçoit plus d'énergie.

I.1.4.3. Capteurs à tubes sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel.

Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué de rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête comme illustre la figure (I-4). L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré et atteint des pressions de vide autour de 10^{-3} mbar. Cela crée des conditions d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection, pour atteindre des températures plus élevées. Dans les tubes à passage direct, le fluide s'écoule à travers l'absorbeur. Ces capteurs sont classés en fonction de leurs nœuds de liaison-matériaux ; par exemple verre-métal ou verre-verre et par l'agencement des tubes (concentriques ou tube en U). [2-3]

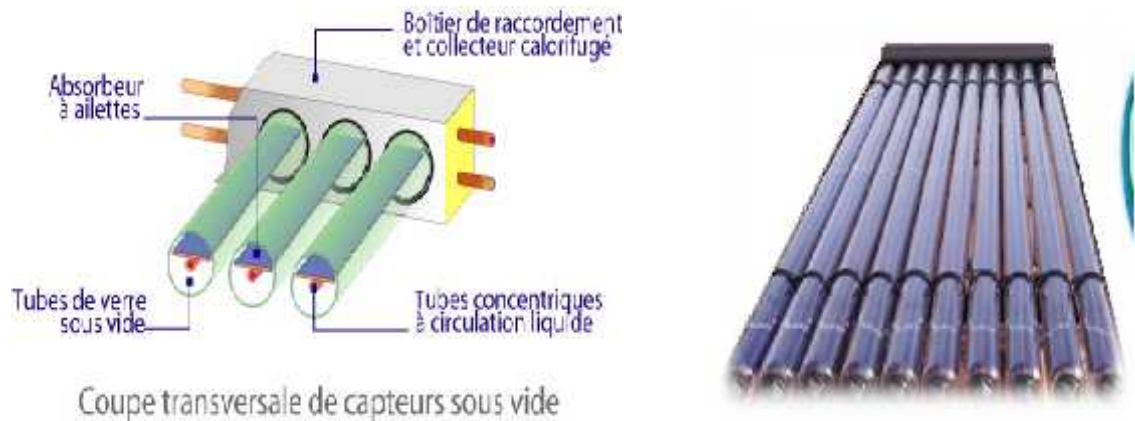


Figure I-4 : Capteur à tubes sous vide. [2-3]

I.1.5. Différents éléments d'un capteur solaire plan

Le capteur plan est un système composé essentiellement de 4 parties : [4]

I.1.5.1. Plaque en verre

C'est l'un des facteurs important pour la quantité d'énergie absorbée par le capteur. Le matériau utilisé doit avoir la qualité suivante :

- 🚩 Forte transmission dans le domaine du visible du spectre électromagnétique,
- 🚩 Faible transmission (opacité) à l'infrarouge de grandes longueurs d'onde afin de pouvoir piéger les rayons réfléchis par l'absorbeur,
- 🚩 Faible absorptivité,
- 🚩 Forte stabilité aux températures de fonctionnement.

I.1.5.2. Fluide caloporteur

La chaleur stockée par le capteur est acheminée vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur présentant une grande capacité et d'échange de chaleur. Pour leur très faible coût, l'eau et l'air sont souvent utilisés comme fluide caloporteur.

I.1.5.3. Absorbeur

La fraction d'énergie du rayonnement solaire incident absorbée par le capteur plan dépend en grande partie de l'absorptance de la surface absorbante, donc de la nature de l'absorbeur. Le matériau d'absorption doit avoir à la fois :

- ✓ Une forte absorptance du rayonnement solaire,
- ✓ Une faible émissivité thermique,
- ✓ Une bonne conductivité thermique,
- ✓ Une faible masse volumique,

- ✓ Une stabilité thermique à la gamme de température d'opération.

Les canettes noircies (matériau absorbant) sont généralement utilisées comme absorbeur à cause de leur simplicité, disponibilité et de leur faible coût de revient.

I.1.5.4. Isolant

Le capteur solaire emmagasine de l'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Cependant pour rendre maximal cette énergie, il faut utiliser un matériau suffisamment isolant afin de minimiser les pertes vers l'extérieur. La figure I-5 présente un modèle décrivant les différentes parties du capteur.

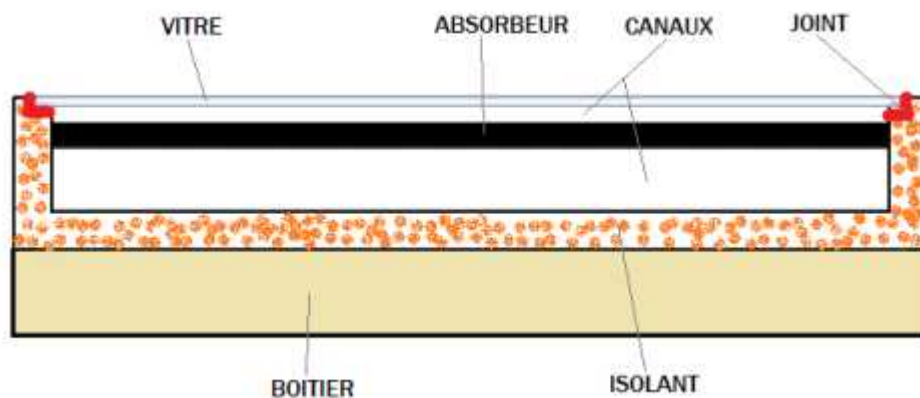


Figure I-5 : Schéma éclaté d'un capteur solaire plan.[5]

I.1.6. Orientation optimal d'un capteur solaire

Tout capteur solaire à air doit tenir compte de l'insolation du site car l'énergie absorbée augmente avec le degré d'insolation. Il est donc nécessaire de relier la chaleur utile du capteur à l'enceinte de séchage. Pour augmenter le rendement de captation, la surface absorbante doit être perpendiculaire aux rayonnements au midi solaire d'une journée type de la période pendant laquelle l'opération de séchage a lieu. Selon le site, le capteur doit être alors orienté vers le nord ou le sud, avec une inclinaison par rapport à l'horizontale. L'inclinaison idéale d'un capteur au midi solaire d'un jour donné pour un site défini peut être obtenue à partir de la relation suivante : [4]

$$\beta = (\phi - \delta) \text{ et } \delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{2 + n}{3} \right)$$

Où δ est l'angle de déclinaison, n le numéro du jour dans le mois et ϕ la latitude du site.

I.2. Séchoir solaire

I.2.1. Qu'est ce que le séchage ?

C'est un procédé d'extraction de l'humidité de la matière sous une action thermique qui évapore l'eau superficielle. Celle-ci sera remplacée par l'eau intérieure par le phénomène de diffusion jusqu'à atteindre un certain niveau d'équilibre.

Le séchage d'un produit biologique entraîne souvent différentes modifications dont il faut tenir compte :

- Des modifications biochimiques : oxydation, dénaturation des protéines, destructions de vitamines, etc.
- Pertes relatives d'arômes,
- De modifications physiques et mécaniques.

Au cours du séchage, l'eau contenue dans le matériau disparaît peu à peu dans l'air ambiant sous l'action de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et sa diffusion à l'intérieur du matériau. [6]

Ces phénomènes sont sous la dépendance des caractéristiques du gaz (air ou vapeur surchauffée) environnant à savoir :

- Sa température.
- Son humidité relative.
- Sa vitesse.
- Sa pression.
- Débit.

I.2.2. Mécanisme de 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 se 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 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.

La vitesse de séchage est liée directement à celle de ces deux transferts, le Solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. [5]

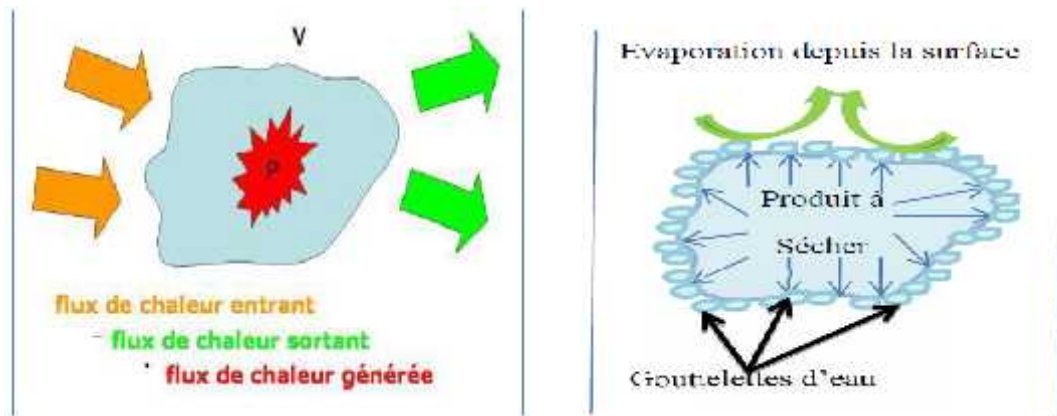


Figure I-6 : Types de transferts dans le séchage. [5]

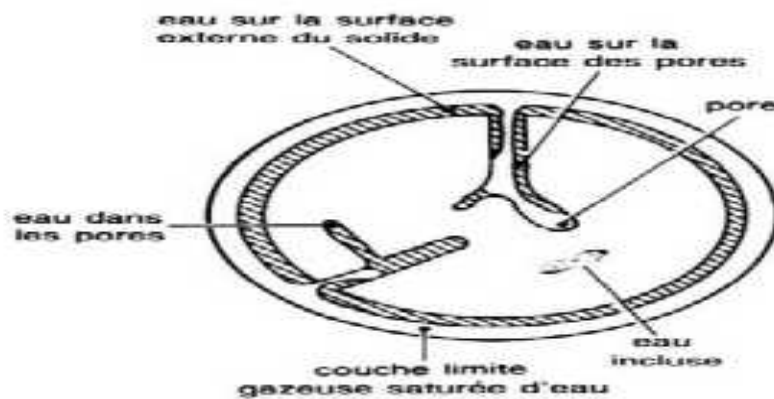


Figure I-7 : Représentation schématique d'un corps humide. [6]

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 produit 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. Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux:[7]

-) L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau;
-) La capacité de l'air environnant (appelée aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de

vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté;

-) La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir sécher de manière suffisamment rapide (pour éviter le pourrissement du produit) mais pas trop vite (une croûte risque alors de se former en surface) à trop haute température (le produit se dénature, noircit).

I.2.3. Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur.[7]

I.2.3.1. Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.

I.2.3.2. Séchage par convection

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que:

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

I.2.3.3. Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces (500 μ m). La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures et des pellicules photographiques.

I.2.3.4. Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

I.2.3.5. La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace, c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur.

I.2.3.6. Par séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire. Les différents modes de séchage cités ci-dessus, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle mondiale). De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement.

I.2.4. Les trois phases de séchage

Quel que soit le mode de séchage, le produit humide passe par trois phases de séchage, comme il est montré sur la figure I-8 :[3]

❖ La période de mise en température [AB]

Elle est souvent très courte et se caractérise par une vitesse de séchage croissante et correspond à la montée en température du produit jusqu'à une température d'équilibre. Lorsque le produit reçoit autant de chaleur de l'air qu'il doit en fournir à l'eau, il est alors en phase de sa vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte de suite puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse et une inertie thermique relativement importante. 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 période de vitesse de séchage constante [BC]

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

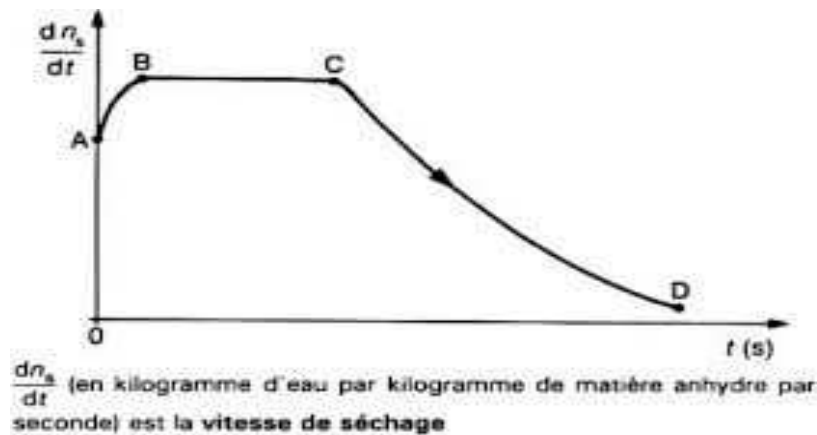


Figure I-8 : Courbe de séchage. [3]

❖ Phases de ralentissement du séchage [CD]

Elle correspond à l'évaporation de l'eau liée. L'eau libre, qui migrait de l'intérieur vers l'extérieur du produit pour être alors transformée en vapeur d'eau, a complètement disparu en fin de phase II. Il ne reste plus dans le produit que de l'eau liée, plus accrochée au produit. L'eau ne s'évapore plus 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 ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du produit, plus le transfert d'eau est difficile. A ce stade la température du produit augmente et tend vers celle de l'air à l'entrée si la température et le débit restent les mêmes qu'avant.

I.2.5. Caractéristiques de l'air de séchage

a) Teneur en eau (Humidité)

Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau. On peut donc distinguer dans tout produit de masse totale m :

-) Une masse m_e d'eau
-) La masse restante $m_s = m - m_e$ appelée masse anhydre ou masse sèche.

On définit l'humidité ou teneur en eau du produit (en base sèche) par :

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad \dots \text{I-1}$$

L'humidité d'un produit peut aussi être définie par la teneur en eau en base humide :

$$X_h = \frac{m_e}{m} \quad \dots \text{I-2}$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{x}{m-x} \quad \text{et} \quad X = \frac{x}{m+x} \quad \dots \text{I-3}$$

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche, lorsque l'on parle de teneur en eau. [6]

B) Humidité absolue

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{M}{M} \quad [\text{kg}_v \cdot \text{kg}_{as}^{-1}] \quad \dots \text{I-4}$$

C) Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

La mesure de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative d'équilibre est un élément clé pour le contrôle de la qualité des produits sensibles à l'humidité.

Des risques de croissance microbienne et de migration de l'eau apparaissent lorsqu'un produit contient un surplus d'eau. En résultent un changement de consistance et réduction de la durée de conservation. Les fabricants de produits alimentaires ou pharmaceutiques doivent, par exemple, pouvoir prouver que l'activité de l'eau, à l'intérieur d'un produit, est suffisamment basse pour qu'aucune bactérie ne puisse s'y développer.

$$H_r = \frac{p}{P} \times 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad \dots \text{I-5}$$

Avec: $-P_{vp}$: La pression de vapeur du produit à sécher.

$-P_{vs}$: La pression de vapeur saturante.

L'humidité relative peut être donnée en fonction de l'activité de l'eau, par la relation suivante :

$$H_r = a_w \cdot 100 \quad a_w : \text{l'activité de l'eau}$$

L'activité de l'eau (a_w) est un critère de croissance des microorganismes, de la libération de toxines et du développement du brunissement des enzymatiques et de non enzymatiques.

L'activité de l'eau variante entre 0 et 1, dépend de la composition du produit, de la teneur en eau et de la température.

Un corps hygroscopique est un corps qui a tendance à absorber l'humidité de l'air par absorption ou par adsorption. [7]

I.2.6. Le séchage solaire

I.2.6.1. Séchage à l'air libre

Dans ce procédé, l'énergie solaire est utilisée pour chauffer directement les produits qui sont placés sur une plateforme. Ils sont laissés jusqu'à ce qu'ils soient asséchés atteignant la teneur en humidité souhaitée. Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement. L'énergie absorbée par la surface des cultures est convertie en énergie thermique et augmente la température de la culture.

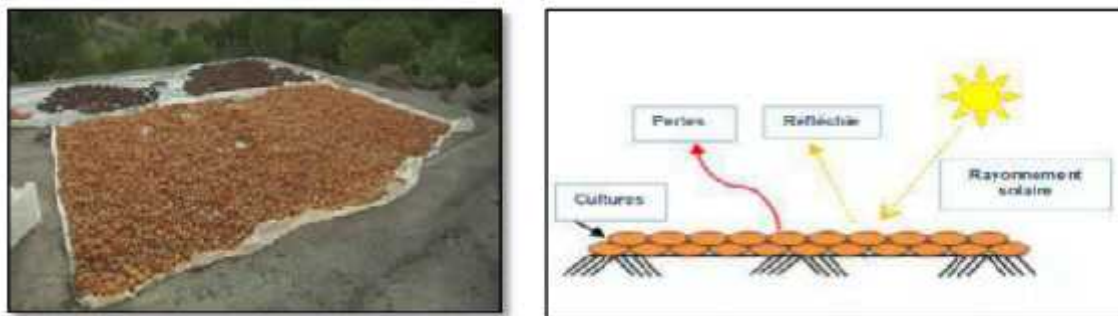


Figure I-9 : Séchage à l'air libre. [5]

Le temps de séchage étant très long. Les cultures doivent rester à l'extérieur pendant de longues périodes, habituellement de 10 à 30 jours, en fonction de sa nature et des conditions météorologiques du site. Pendant la période de séchage, les produits sont soumis à toutes les modifications météorologiques et aux attaques naturelles, comme les insectes, la grêle, etc.

Les études ont montré que les pertes agricoles peuvent augmenter jusqu'à 40 % de la production totale des récoltes. Pour ces raisons, le séchage solaire à l'air libre ne répond pas aux normes de qualité internationales et ne peut donc pas être vendu sur le marché international.

Pour éviter ces problèmes, Everitt et Stanley ont développé pour la première fois l'idée de séchoir solaire en 1976. C'était une boîte ayant une couverture transparente pour transmettre la lumière. Le but principal de cette invention était de fournir un nouveau procédé capable de surmonter les inconvénients cités. Actuellement, de nombreux chercheurs ont apporté plusieurs améliorations à la technologie de séchage solaire avec circulation naturelle et forcée. [2]

I.2.5.2. Séchoir solaire

Le séchage solaire est souvent différencié du séchage à l'air libre par l'utilisation d'équipements (cabinet de séchage, capteur solaire ...) pour capter le rayonnement solaire afin d'exploiter l'énergie reçue pour le séchage. Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : les séchoirs passifs (convection naturelle) et les séchoirs actifs (convection forcée). Sous chaque catégorie, trois familles de séchoirs solaires sont identifiées en fonction de la façon dont l'énergie du rayonnement solaire arrive au produit à sécher, à savoir, les séchoirs solaires directs, indirects et mixtes.

Les séchoirs solaires passifs (à convection naturelle) utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'air qui a tendance à monter vers le haut pour sortir à travers une cheminée. L'écoulement de l'air est assuré grâce à la différence de la température d'air à travers le séchoir.

Dans les séchoirs solaires actifs (ou à convection forcée), le déplacement de l'air est assuré mécaniquement en utilisant des ventilateurs ou des soufflantes pour forcer l'air à circuler à travers le séchoir. Ce type de séchoir nécessite un coût de production et d'investissement relativement plus élevé comparé au cas du séchoir passif.[2]

A) Séchoir solaire direct

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud . La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage.

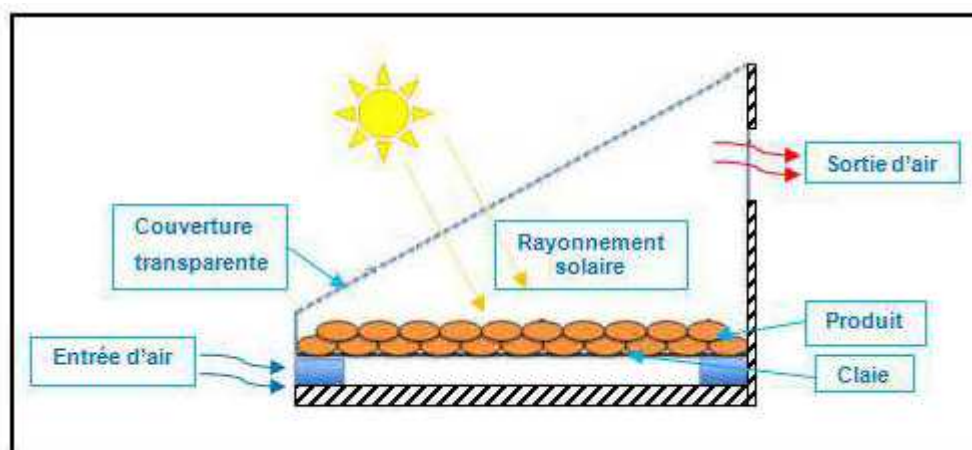


Figure I-10 : Le principe d'un séchoir solaire direct. [6]

B) Les séchoirs solaires indirects

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. 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. [2]

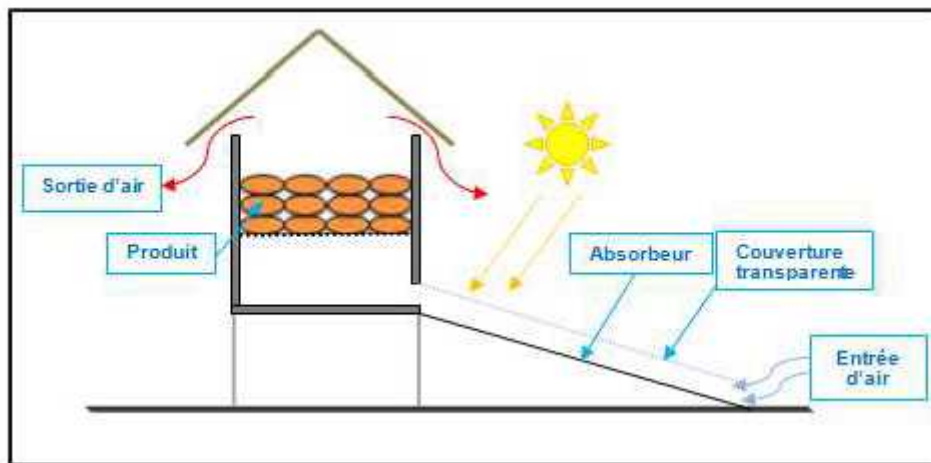


Figure I-11 : Le principe d'un échoir solaire indirect. [6]

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.

C) Séchoir solaire mixte

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires directes sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents. [1]

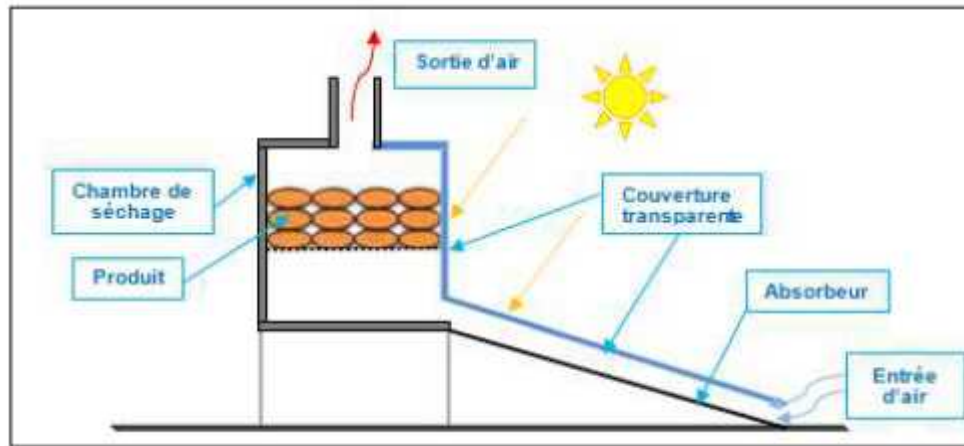


Figure I-12 : Le principe d'un séchoir solaire mixte. [6]

I.3. Recommandations [16]

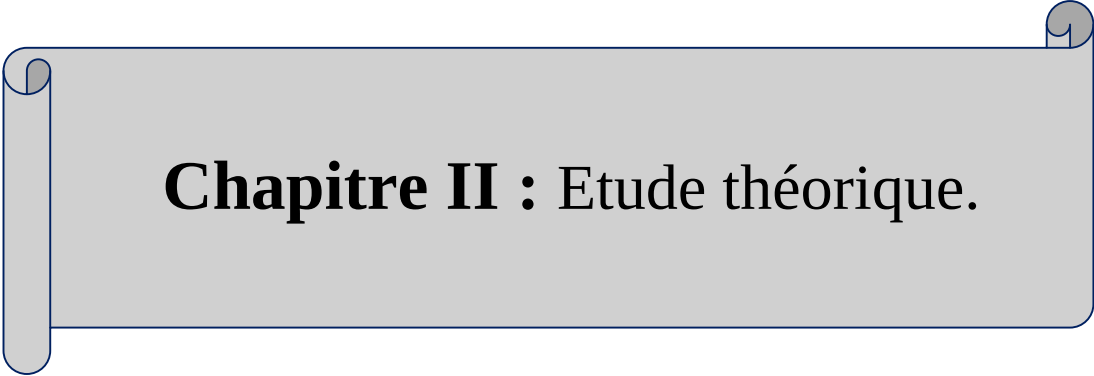
Pour une meilleure qualité de séchage on recommande de :

- Travailler dans la propreté
- Identifier et analyser les problèmes et risques avant qu'ils ne se produisent
- Planifier et prendre des actions préventives afin de les éviter.
- Se former constamment et s'informer.
- Chercher le conseil des experts.
- Apprendre à être à l'écoute de tous ceux qui sont en relation avec nos activités, notamment les clients.
- Miser tout sur la qualité et mieux vaut perdre un marché plutôt que de réussir de vendre un produit de mauvaise qualité.

Conclusion

Le séchage des aliments améliore leur durée de vie, minimise les pertes durant le stockage et diminue leur coût de transport. Dans le but de bien 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 conserver la qualité du produit séché telles que sa couleur, saveur et sa valeur nutritionnelle



Chapitre II : Etude théorique.

Introduction

L'étude des séchoirs ne nous permettra pas de rédiger une liste exhaustive des types de séchoir mais du moins nous amènera à citer et expliquer les termes et notions de l'opération de séchage ainsi s'étaler dans la thermique et exposer différentes connaissances et règles concernant notre dispositif afin de passer à la modélisation et conception de ce type qu'on a choisi.

II.1. Caractéristiques techniques du capteur solaire et du séchoir solaire

Le système de couplage d'un capteur solaire et d'un séchoir solaire est essentiellement équipé d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique, de claies, extracteur et de boîtier. [5]

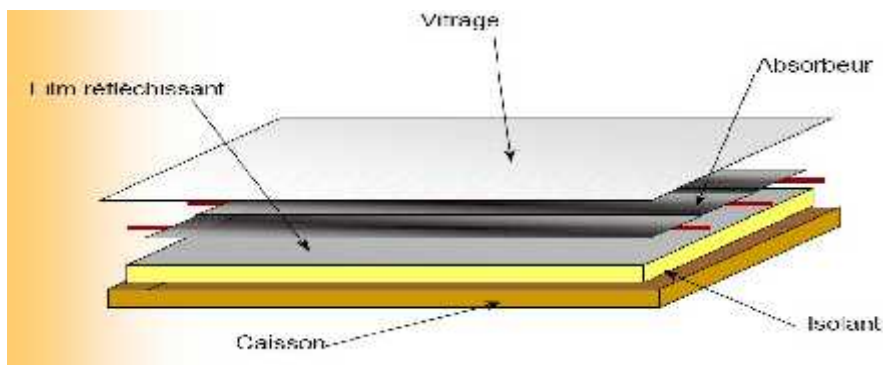


Figure II-1 : Capteur solaire thermique. [11]



Figure II-2 : Chambre de séchage.

II.1.1. L'absorbeur

L'absorbeur est le cœur du capteur solaire, car c'est précisément lui qui doit emmagasiner la plus grande portion possible du rayonnement solaire qui lui parvient à travers le vitrage, convertir celle-ci en chaleur avec le moins de pertes possible dans le registre infrarouge. L'absorbeur idéal ou parfait serait ce que l'on nomme un corps noir, c'est-à-dire un matériau qui récolte toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sous forme de lumière visible, sans en réfléchir aucune partie, tout en étant capable de réémettre la totalité du flux reçu. Et les longueurs d'onde du rayonnement reçu et du rayonnement émis ne seraient pas forcément les mêmes. Dans le cas de la lumière solaire visible, la restitution se ferait sous forme de chaleur, donc par des infrarouges. Un tel absorbeur reste fictif et peu de matériaux présentent toutes les qualités requises. [5]

L'absorbeur est choisi selon les caractéristiques suivantes :

-) Un bon coefficient d'absorption ;
-) Une bonne conductivité thermique ;
-) Une bonne résistance à la corrosion.

Deux coefficients déterminent les caractéristiques d'un absorbeur :

-) α : coefficient d'absorption
-) ε : coefficient d'émission

Pour un meilleur captage de rayonnement solaire on doit avoir un coefficient d'absorption élevé (de 0 à 100 %) et simultanément un coefficient d'émission ε le plus faible possible (de 0 à 100 %, l'idéal étant 0 %).

Support et traitement	α : coefficient d'absorption	ε : coefficient d'émission
Acier nickel noir sur nickel	0,95	0,07
Acier et chrome noir sur nickel	0,95	0,09
Acier et chrome noir	0,91	0,07
Cuivre et chrome noir	0,95	0,14
Acier galvanisé et chrome noir	0,95	0,16
Cuivre et cuivre noir	0,88	0,15
Acier et oxyde de fer	0,85	0,08
Aluminium et oxyde de manganèse	0,70	0,08
Acier et couche organique sur chrome noir	0,94	0,20
Peinture noire époxy	0,95	0,18
Peinture blanche époxy	0,25	0,91

Peinture noire mate	0,90	0,95
---------------------	------	------

Tableau II-1 : Le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ϵ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur.

Dans le cas des métaux, on utilise comme absorbeur le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium. Certaines de leurs caractéristiques thermo physiques sont données dans le tableau ci-dessous.

Métal	Conductivité thermique λ W/m.K	Chaleur massique C_p J/kg.K	Masse volumique ρ kg/m ³	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ 10 ⁻⁶ m ² /s
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Tableau II-2 : Caractéristiques thermo physiques de matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur de capteurs solaires plans.

II.1.2. La couverture transparente

L'énergie solaire nous parvient principalement sous forme de rayonnement visible et le vitrage du capteur plan se doit donc d'être le plus transparent possible pour permettre à cette lumière d'atteindre au mieux l'absorbeur situé juste derrière lui. Mais ce n'est pas là sa seule fonction, car outre sa transparence, une autre propriété intéressante du verre consiste à être quasiment opaque au rayonnement infrarouge, celui produit par l'échauffement de l'absorbeur noir, du fait de la longueur d'onde plus grande. C'est le phénomène de l'effet de serre observé est connu depuis fort longtemps. Il est mis à profit dans tous les capteurs solaires vitrés, qu'ils soient à air ou à eau d'ailleurs. Le verre est donc bien un véritable piège à chaleur. Ce processus complexe permet facilement d'obtenir des températures élevées dont la chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture. [20]

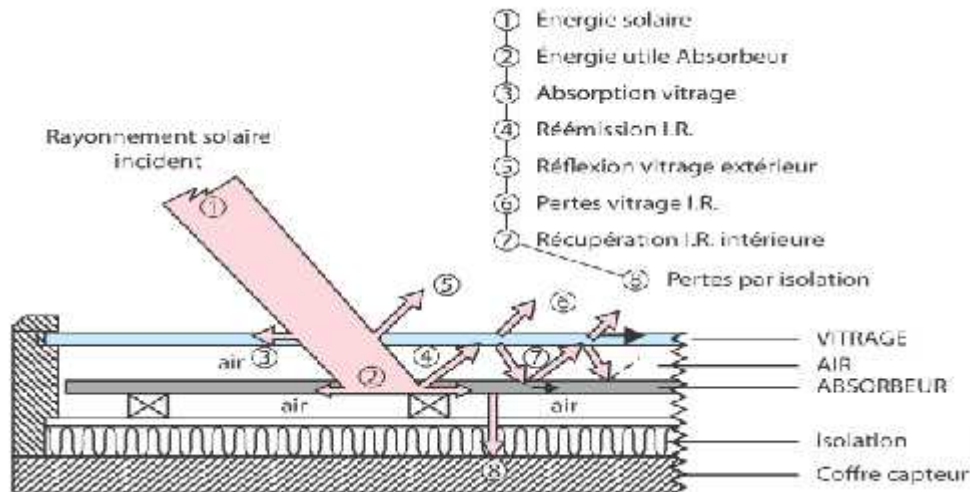


Figure II-3 : Transmission lumineuse et facteur solaire.

Le tableau au dessous donne les propriétés thermo-physiques de la vitre.

Propriétés physiques	Symboles	Valeurs
Masse volumique (kg.m^{-3})	ρ_v	1375
Capacité calorifique massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Cp_v	840
Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	λ_v	0,0263
Coefficient d'absorption du vitrage	α_v	0,05
Coefficient de transmission du vitrage	τ_v	0,95
Épaisseur de la vitre (m)	e_v	0,005

❖ Effet de serre :

L'effet de serre est provoqué par une paroi transparente (ou translucide) disposée sur une enceinte close. La paroi transparente permet une bonne pénétration du rayonnement solaire mais présente un barrage aux rayonnements infrarouges induits. L'effet de serre atmosphérique est provoqué par l'atmosphère qui sert de paroi transparente. Ce phénomène empêche le refroidissement brutal de la terre pendant la nuit. Le renforcement de l'effet de serre atmosphérique par l'émission excessive de certains gaz comme le dioxyde de carbone et le méthane est en train de modifier le climat. S'il n'y avait pas d'effet de serre atmosphérique, la température à la surface de la terre serait de -18°C au lieu des $+15^\circ\text{C}$ de moyenne actuelle. En comparaison, sur Mars où il n'y a pas de gaz à effet de serre, la température moyenne est de -50°C ; sur Vénus, où l'atmosphère est presque exclusivement composée de gaz carbonique, la température moyenne est de $+420^\circ\text{C}$. [23]



Figure II-4 : L'effet de serre.

Les couvertures transparentes sont habituelles pour la majorité en verre mais on peut trouver aussi des produits de synthèse tel que le polycarbonate et le polyester armé... le verre doit :

- ✓ le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.
- ✓ il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- ✓ il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

Selon la nature et l'épaisseur du vitrage ainsi que l'angle d'incidence et la nature du rayonnement (direct ou diffus) la qualité du verre est caractérisée par son rendement optique et au taux de transmission.

Actuellement, un nouveau verre, dit « antireflet », équipe certains capteurs. Ce verre a un taux de transmission de l'ordre de 96 % et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

De quoi le verre est-il composé ?

Les verres ont pour compositions :

- un corps vitrifiant, la silice, introduit sous forme de sable (70 à 72 %).
- un fondant, la soude, sous forme de carbonate et sulfate (environ 14 %).
- un stabilisant, la chaux, sous forme de calcaire (environ 10 %).
- divers autres oxydes tels que l'alumine, la magnésie, améliorant les propriétés physiques du verre, notamment la résistance à l'action des agents atmosphériques.

- pour certains types de vitrage, l'incorporation de divers oxydes métalliques permet la coloration.

Le coefficient de dilatation mesure l'augmentation relative du volume du verre lorsque l'on ne fait varier qu'un seul paramètre, en général la température ou la pression.

II.1.3. L'isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes : [11]

II.1.3.1. Partie avant de l'absorbeur :

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2 à 3 cm.

II.1.3.2. Parties arrière et latérale :

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture.

En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques, on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres, car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible conductivité thermique.
- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

Désignation	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	Température maximale d'utilisation	Observation
Laine de verre	0.034 à 0.053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de verre	0.057	123	150	Sensible à l'humidité
Bois	0.13 à 0.4	123	150	
Liège exposé	0.045	100		
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
Polyuréthane	0.035	35	85	Moulé comprimé

Tableau II-3 : Conductivité thermique de quelques matériaux.

II.1.4. Le fluide caloporteur

Les fluides caloporteurs les plus utilisés dans les applications énergétiques sont :

-) **L'air** : comme agent de transport de calories, a un grand avantage par son abondance et sa gratuité et par l'absence des problèmes de gel et de corrosion. Ce qui donne au capteur une longue durée de vie et moins de travaux d'entretien. Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie, il faut utiliser des volumes d'air très importants.

Propriétés physiques	Symboles	Valeurs
Masse volumique (kg.m ⁻³)	ρ_a	1,293
Capacité calorifique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	C_p	1012
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	λ_a	0,0242
Viscosité dynamique (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	μ_a	$1,95.10^{-5}$
Vitesse du vent (m/s)	V_{vent}	2

Tableau II-4 : Propriétés thermo-physiques de l'air.

-) **L'eau** : Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique élevée mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas de température élevée pose

des problèmes. La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil du temps diminue la quantité de chaleur échangée.

II.1.5. Le boîtier

Le coffre fabriqué habituellement en aluminium ou en bois, enveloppe l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

Le coffre ou cadre doit permettre de garantir sa fixation sur la couverture tout en lui permettant de se bouger librement. Le vitrage est généralement posé avec un joint.

II.1.6. Claies pour disposer les aliments agro-alimentaires

Faites en acier galvanisé percées en plusieurs trous, les claies sont pour supporter la charge du produit prévu ainsi qu'assurer le contact entre l'air et le produit.

II.2. Rappels sur les éléments d'échanges thermiques

L'existence d'un écart de température entre deux systèmes, fait intervenir un échange d'énergie connu couramment sous le nom de « transfert de chaleur ».

La diversité des opérations thermiques industrielles est considérable : traitement thermique, cuisson, séchage. Ces opérations thermiques nécessitent une source de production de chaleur puis le transfert de cette chaleur vers l'objet à traiter. [10]

La transmission de la chaleur peut s'exécuter :

- par conduction,
- par convection,
- par rayonnement.

II.2.1. Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur dans un milieu solide, sans déplacement significatif de matière, sous l'influence d'une différence de température. [3]

En tout point d'un milieu s'applique une équation dite « équation de chaleur » qui traduit le mécanisme local du transfert, elle lie les grandeurs suivantes : la température T , le temps t et les variables d'espace (x,y,z) .

L'équation de la chaleur est donnée sous une forme unidimensionnelle par :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} \quad \dots \text{II-1}$$

Où « a » est la diffusivité thermique du matériau.

La théorie de la conduction se base sur l'hypothèse de FOURIER ; liant linéairement la densité du flux thermique et le gradient de température :

En tout point d'un milieu isotrope, la densité du flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température.

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{g} (T) \quad \dots \text{II-2}$$

La forme algébrique de cette équation est la suivante :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial}{\partial} \quad \dots \text{II-3}$$

Avec : Φ (W) Le flux de chaleur transmis par conduction et S (m²) Aire de la section de passage du flux de chaleur.

II.2.2. Transfert de chaleur par convection

Ce mode de transfert ne peut donc pas se produire dans les solides qui sont rigides mais uniquement dans les fluides liquides ou gazeux.

Le flux de chaleur émis entre une paroi solide et un fluide est défini par une équation est appelée **loi de Newton** :

$$\Phi = h s (T_p - T_{\infty}) \quad \dots \text{II-4}$$

Φ : le flux échangé par convection [W].

h : coefficient de convection [W/m².K].

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide [m²]

T_p : température de la paroi solide [K]

T_{∞} : température du fluide [K]

La transmission de chaleur par convection peut être naturelle ou forcée :

-Convection forcée : lorsque le mouvement du fluide est provoqué par des facteurs extérieurs imposés (pompe, ventilateur, vent ...).

Convection libre ou naturelle : lorsque le mouvement du fluide est dû aux variations de densités qui sont elles mêmes dues aux variations de température au sein du fluide. [3]

II.2.2.1. En convection naturelle

Dans le cas de la convection naturelle le flux est une fonction des caractéristiques du fluide ; de la longueur de la paroi et l'écart de la température. [24]

L'écoulement se fait naturellement. Il est dû à la différence de densité des différentes zones du fluide. Ce phénomène est très courant et s'appelle convection naturelle.

) Nombre de GRASHOF

$$\text{Nombre de Grashof : } G_r = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \quad \dots \text{II-5}$$

L: Dimension linéaire caractéristique de la surface d'échange (ex. Côté d'un carré, diamètre d'un tube) en (m).

β_d : Coefficient de dilatation volumique de fluide (K^{-1})

Exemple : Air : $\beta_d = 1/T$

20°C $\beta_d = 0,00341297$

60°C $\beta_d = 0,003003$

90°C $\beta_d = 0,00275482$

ΔT : Écart de température paroi fluide (en K)

g : accélération de pesanteur ($9,81m/s^2$)

ρ : Masse volumique de fluide en kg/m^3

μ : viscosité dynamique de fluide en Pa .s

Le nombre de GRASHOF est à la convection naturelle ce que le nombre de REYNODLS l'est à la convection forcée.

Pour le nombre de Grashof on peut faire la différence entre les deux types suivants :

- Convection laminaire : $G_r.P_r < 10^9$
- Convection turbulente : $G_r.P_r > 10^9$

) Expression du NUSSELT

Les relations du nombre de NUSSELT dans ce cas sont de la forme :

$$N_u = c (G_r P_r)^m \quad \dots \text{II-6}$$

II.2.2.2. En convection forcée

Le processus de cette convection est le même que celui de la convection naturelle. La différence est que le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante du gradient de température. [24]

En introduisant l'analyse adimensionnelle on déduit une relation entre trois nombres :

$$Nu = f (Re, Pr)$$

Ou : Nombre de Nusselt : $Nu = \frac{h D}{\lambda}$...II-7

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$...II-8

- ✓ h : coefficient d'échange globale
- ✓ C_p : chaleur spécifique du fluide
- ✓ μ : viscosité dynamique du fluide
- ✓ λ : conductivité thermique du fluide
- ✓ D : diamètre de la conduite.

Pr le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide

Nu le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

➤ Régime d'écoulement

En régime laminaire, l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes entre deux filets de fluides adjacents.

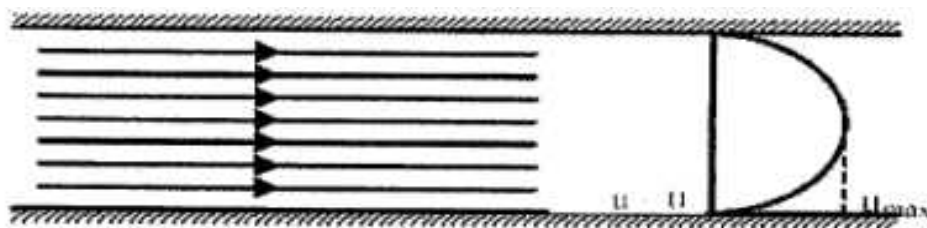


Figure II-5 : Ecoulement d'un fluide en régime laminaire.

En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel : L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la chaleur transférée par conduction est généralement négligeable par rapport à celle transférée par convection.

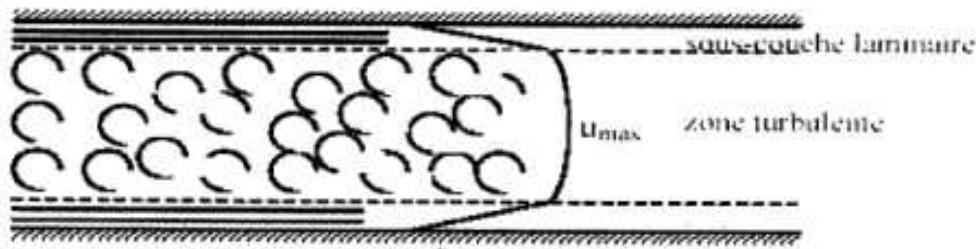


Figure II-6 : Ecoulement d'un fluide en régime turbulent.

R_e le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide qui est donné par la relation suivante : [5]

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Avec : V : vitesse moyenne du fluide
 ρ : masse volumique du fluide
 D : diamètre de la conduite
 μ : viscosité dynamique du fluide.

Pour :

- ✓ $R_e < 2000$ écoulement laminaire
- ✓ $2000 < R_e < 3000$ écoulement intermédiaire (Transition)
- ✓ $R_e > 3000$ écoulement turbulent.

II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est un phénomène se caractérisant par un échange d'énergie électromagnétique, sans que le milieu intermédiaire ne participe nécessairement à cet échange. Par exemple, le rayonnement solaire est capable d'échauffer la terre bien que le milieu traversé soit à une température plus basse que la terre, [6]

Lorsqu'un rayonnement arrive sur un corps opaque, celui-ci peut être :

- transmis,
- absorbé,
- réfléchi,

dans des proportions variables selon la nature du corps.

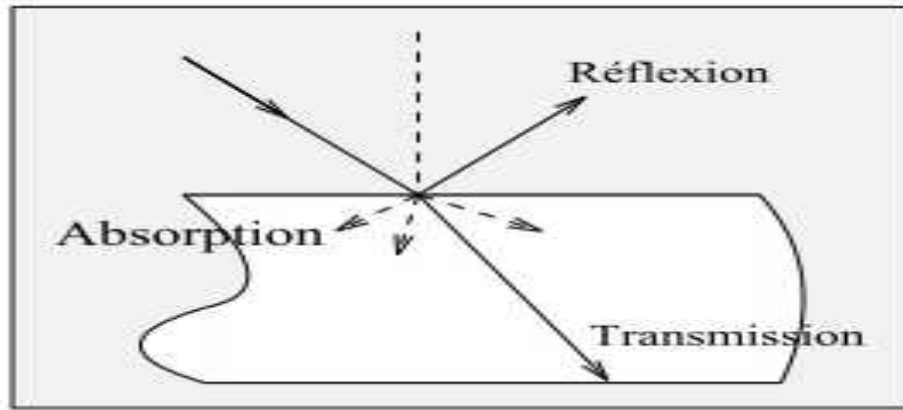


Figure II-7 : réflexion, transmission et absorption du rayonnement.

Chaque surface dont la T° excède 0°K (-273°C) est capable d'émettre un rayonnement.

L'intensité du rayonnement se définit comme: [8]

$$R = \varepsilon \cdot \delta \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad \dots\text{II-9}$$

Avec :

- ε : le coefficient d'émissivité (CE - entre 0.9 et 0.99 en fonction de la surface émettrice),
- δ : la constante de Stefan-Boltzman (qui est de : $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).
- T : la température du corps émetteur

Un corps qui absorbe intégralement le rayonnement qu'il reçoit est un corps noir. La formulation de l'existence spectrale (ou émittance spectrale) du corps noir $M^0(\lambda, T)$ est issue de la loi de Stefan-Boltzman (luminance énergétique spectrale) :

$$M^0 = \delta \cdot T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad \dots\text{II-10}$$

II.3. Bilan thermique global de la paroi absorbante

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\Phi_{as} = \Phi_p + \Phi_u + \Phi_{st} \quad (\text{W}) \quad \dots\text{II-11}$$

Où : Φ_{as} : Flux solaire absorbé

Φ_p : Flux perdu par la paroi absorbante

Φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

Φ_{st} : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\Phi_{st} = M_f \cdot c_f \frac{d}{dt} \quad (W) \quad \dots II-12$$

Où : M_f Masse en fluide du capteur, définie par : $\sum m_i \cdot c_i = M_f \cdot c_f$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteur

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\Phi_{sa} = T_{cs} \cdot \alpha_{ps} \cdot G(i, \gamma) \cdot S \quad \dots II-13$$

Où : Φ_{sa} Flux solaire absorbé par la surface exposée [W]

$G(i, \gamma)$ Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur [$W \cdot m^{-2}$]

α_{ps} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

T_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

S : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\Phi_u = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad (W) \quad \dots II-14$$

Où : q_{cf} Le débit calorifique du fluide caloporteur ($W \cdot ^\circ C^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique.

T_{fe} Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur.

T_{fs} Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\Phi_{p \rightarrow} = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad (W) \quad \dots II-15$$

Où : h_p Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} Température moyenne de la paroi absorbante

T_a Température de l'air extérieur

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut, en première approximation, être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3 T_1 + T_2}{4} + \Delta T \quad (^\circ\text{C}) [5] \quad \dots\text{II-16}$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT qui existe entre le fluide et la paroi absorbante.

II.4. Expression du coefficient global de pertes

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert peuvent être schématisés comme indiqué sur la Figure (II-8) : [2]

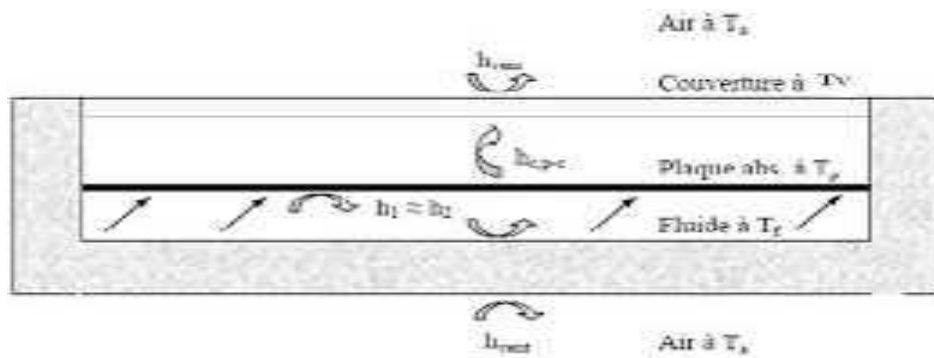


Figure II-8 : Schématisation des flux convectifs dans un capteur couvert.

) Pertes thermiques vers le haut :

Les pertes thermiques vers le haut peuvent s'écrire :

$$\Phi \uparrow = \Phi_{c,p-c} + \Phi_{r,p-c} = \Phi_{c,c-a} + \Phi_{r,c-c} \quad (\text{W}) \quad \dots\text{II-17}$$

Où :

- $\Phi_{c,p-c}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture
- $\Phi_{r,p-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture
- $\Phi_{c,c-a}$: Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur
- $\Phi_{r,c-c}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur.

Chacun de ces flux peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\Phi_{c,p-c} = h_{c,p-c} (T_{pm} - T_{cm}) . S \quad \dots\text{II-18}$$

Où $h_{c,p-c}$ est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air.

$\Phi_{c,p-c}$ peut être calculé en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance les séparant est faible devant leur largeur et leur longueur) grises et opaques (hypothèse de la couverture opaque au rayonnement IR), ces hypothèses permettent d'écrire :

$$\Phi_{c,p-c} = \sigma \frac{T_p^4 - T_c^4}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{1}{\alpha} - 1} \quad [5] \quad \dots \text{II-19}$$

Que l'on peut aussi écrire :

$$\Phi_{r,p-c} = h_{r,p-c} (T_{pm} - T_{cm}) . S \quad \dots \text{II-20}$$

Avec:

$$h_{r,p-c} = \sigma \frac{(T_p^4 - T_c^4) - (T_l^4 - T_l^4)}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{1}{\alpha} - 1} \quad [5] \quad \dots \text{II-21}$$

Avec : α_{pi} Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR

α_{ci} Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR.

$\Phi_{c,c-a}$ qui dépend principalement de la vitesse du vent peut se calculer par :

$$\Phi_{c,c-a} = h_{c,p-a} (T_{cm} - T_a) . S \quad \dots \text{II-22}$$

Le coefficient de convection étant calculable par la corrélation suivante où u_{vent} est la vitesse moyenne du vent :

$$h_{c,c-a} = h_{vent} = 5.7 + 3.8 u_{vent} \quad (W.m^{-2} . ^\circ C^{-1}) \quad \dots \text{II-23}$$

$$\Phi_{r,c-a} = \sigma \alpha_{ci} (T_{cm}^4 - \epsilon_a T_a^4) S = \sigma \alpha_{ci} (T_{cm}^4 - T_{ciel}^4) S \quad \dots \text{II-24}$$

Où :

- ϵ_a Emissivité de l'atmosphère calculable par les relations.
- T_{ciel} Température équivalente du ciel
- T_{cm} Température moyenne de la couverture.

Que l'on peut mettre sous la forme :

$$\Phi_{r,c-a} = h_{r,c-a} (T_{cm} - T_a) S$$

$$\text{Avec : } h_{r,c-a} = \frac{\sigma \alpha_{ci} (T_{cm}^4 - T_a^4)}{(T_{cm} - T_a)} \quad [5]$$

Le flux perdu vers le haut par la plaque absorbante peut alors s'écrire :

$$\Phi_{pt} = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c}) \cdot (T_{pm} - T_{cm}) S = (h_{vent} + h_{r,a-c}) \cdot (T_{cm} - T_a) S$$

Soit encore :

$$\Phi_{pt} = \frac{(T_p - T_c)}{\frac{1}{h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}}} * S = \frac{(T_c - T_a)}{\frac{1}{h_{c,a-c}} + \frac{1}{h_{r,a-c}}} * S = \frac{(T_p - T_a)}{\frac{1}{h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{c,a-c}} + \frac{1}{h_{r,a-c}}} * S \quad [5]$$

) Pertes thermiques vers le bas :

Les pertes thermiques vers le bas peuvent s'écrire : [5]

$$\Phi_{pt} = \Phi_{c,p-b} + \Phi_{r,p-b} = \frac{T_b - T_a}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_v}} * S$$

Où :

- $\Phi_{c,p-b}$: Flux échangé par convection-conduction entre la paroi et le bas
- $\Phi_{r,p-b}$: Flux échangé par rayonnement entre la paroi et le bas
- e_i, λ_i : Epaisseur et conductivité thermique de l'isolant.

Les deux flux échangés par la paroi absorbante avec le bas du capteur peuvent s'écrire : [5]

$$\Phi_{c,p-b} = \frac{T_p - T_b}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} * S \approx \frac{T_p - T_b}{2 h_i} * S$$

car $h_1 \approx h_2 = h_i$ = coefficient de convection fluide/paroi.

Et : $\Phi_{r,p-b} = h_{r,p-b} (T_{pm} - T_b) * S$

avec : $h_{r,p-b} = \sigma \frac{(T_p^2 - T_b^2) - (T_p - T_b)}{\frac{1}{\alpha_p} + \frac{1}{\alpha_b}}$

Avec : α_{bi} Coefficient d'absorption du fond du capteur par rapport au rayonnement IR.

On en déduit:

$$\Phi_{pt} = \frac{(T_p - T_b)}{\frac{1}{h_{c,p-b}} + \frac{1}{h_{r,p-b}}} * S = \frac{T_p - T_b}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_v}} * S = \frac{(T_p - T_b)}{\frac{1}{h_{c,p-b}} + \frac{1}{h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_v}} * S$$

) Pertes thermiques totales : [5]

On obtient finalement :

$$\Phi_p = \Phi_{pt} + \Phi_{pb} = \frac{(T_l - T)}{\frac{1}{h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_v} + \frac{1}{h_{r,a-c}}} + \frac{(T_l - T)}{\frac{1}{h_{c,p-b}} + \frac{1}{h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h_v}}$$

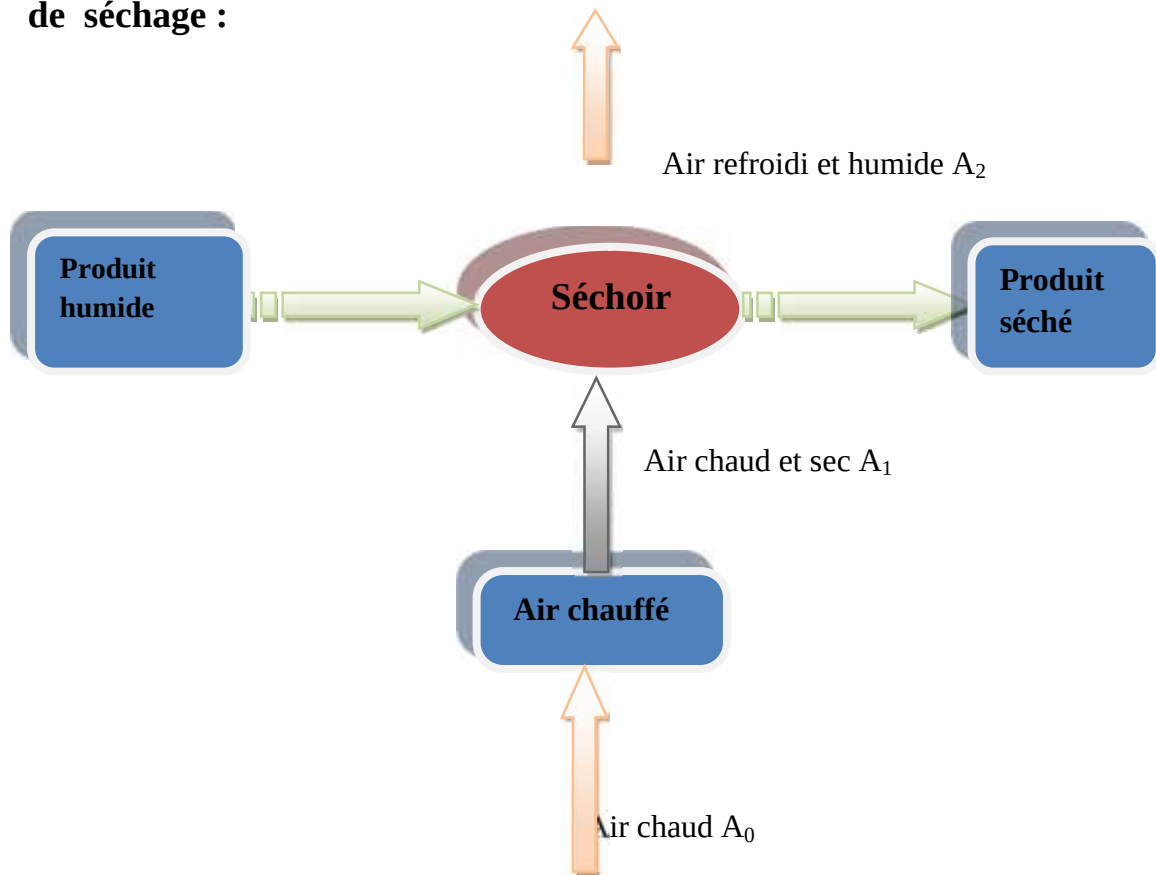
Que l'on peut mettre sous la forme :

$$\Phi_p = h_p (T_{pm} - T_a) S$$

Avec:

$$h_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_v} + \frac{1}{h_{r,a-c}}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-b} + h_{r,p-b}} + \frac{e_i}{\lambda_i S} + \frac{1}{h}} \quad \dots \text{II-24}$$

II.5. Les échanges thermiques et massiques au niveau de la chambre de séchage :



Les hypothèses simplificatrices suivantes sont utilisées : [15]

- ⌋ Les échanges de chaleur entre l'air de séchage et l'extérieur sont négligeables (paroi de l'enceinte de séchage adiabatique).
- ⌋ Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés,
- ⌋ Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés,
- ⌋ l'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits (air sec et vapeur d'eau),
- ⌋ L'écoulement de l'air est supposé unidirectionnel et uniforme.
- ⌋ Les produits à sécher sont considérées comme indéformables et suffisamment humides,

) la température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit.

Les équations qui régissent les échanges thermiques et massiques au niveau de la chambre de séchage se traduisent par :

Bilan thermique

Le bilan thermique de l'air s'écrit :[7]

$$m_a \cdot C_{pa} (T_{a^*} - T_a) = h_{a,pr} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) + h_{a,p} \cdot S_v (T_a - T_p) \quad \dots II-25$$

Avec :

m_a : Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir, (kg.s^{-1})

C_{pa} : Chaleur massique de l'air de séchage, ($\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_{a^*} : Température d'entrée de l'air de séchage, (K)

T_a : Température de l'air, (K)

$h_{a,pr}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et le produit, ($\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

S_{pr} : Surface d'échange du produit, (m^2)

T_{pr} : Température des feuilles de la menthe verte, (K)

$h_{a,p}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air de séchage et la paroi interne, ($\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

S_v : Surface entre deux claies, (m^2)

T_p : Température de la paroi interne de l'enceinte de séchage (K).

Le bilan thermique des produits à sécher s'écrit :

$$m_{pr} \cdot C_p \cdot \frac{d}{dt} = h_{a,pr} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) - P_{ev} \quad \dots II-26$$

L'énergie reçue par les produits est utilisée pour évaporer l'eau qu'ils contiennent. Dans le cas particulier d'un produit mince, il est possible de négliger le terme de stockage. Dans ce cas, on obtient :

$$P_{ev} = h_{a,pr} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) \quad \dots II-27$$

Avec :

m_{pr} : Masse du produit à sécher, (kg)

Cp_{pr} : Capacité calorifique massique du produit, ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

P_{ev} : Puissance d'évaporation de l'eau contenue dans le produit. ($\text{kJ.kg}^{-1}\text{eau.s}^{-1}$)

$$P_{ev} = L_v(T_{pr}) \cdot m^*_{(Ta,wa)} \quad \dots\text{II-28}$$

Avec :

L_v : Chaleur latente d'évaporation de l'eau ($\text{J.kg}^{-1}\text{ eau}$)

$$L_v(T_{pr}) = 4186.5 (597 - 0.56 T_{pr}) \quad \dots\text{II-29}$$

En négligeant l'inertie thermique des produits, la température de surface des produits est égale à la température humide de l'air.

$$L_v(T_h) = 4186.5 (597 - 0.56 T_h) \quad \dots\text{II-30}$$

La masse d'eau évaporée par unité de temps (kg_{eau}) * m est donnée par :

$$m^* = m_s \left(-\frac{d}{d} \right) \quad \dots\text{II-31}$$

Avec :

m_s : est la masse sèche des feuilles de menthe, (kg_{ms})

$\left(-\frac{d}{d} \right)$: est la vitesse de séchage, ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}^{-1}_{ms} \cdot \text{s}^{-1}$) donnée par :

$$\left(-\frac{d}{d} \right) = \frac{X(t-\Delta) - X(t)}{\Delta} \quad \dots\text{II-32}$$

$X(t)$: est la teneur en eau du produit ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{Kg}^{-1}_{ms}$) ;

Δt : est le pas de temps (s).

Bilan massique de l'eau

La masse d'eau contenue dans l'air et celle échangée avec l'extérieur pendant l'intervalle de temps Δt est donnée par la relation :

$$W_{a(t)} = W_{a(t-\Delta t)} + \frac{m}{D} \left(\frac{X(t-\Delta) - X(t)}{\Delta} \right) \quad \dots\text{II-33}$$

avec :

W_a : Teneur en eau de l'air de séchage ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{as}}^{-1}$)

m_{prs} : Masse du produit sec (kg_{ms})

D_m : Débit massique de l'air de séchage ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

Connaissant la teneur en eau de l'air de séchage, l'humidité relative est déterminée par :

$$H_{r(t)} = \frac{P \cdot W(t)}{P + (0.6 + W(t))} \quad \dots \text{II-34}$$

avec :

P : Pression atmosphérique (Pa)

P_{vsat} : Pression de la vapeur saturante (Pa).

II.6. Efficacité du séchoir

Pour le séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, l'efficacité est donnée par l'expression suivante : [13]

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{m f(X - X_L) / (X + 1)}{(I A + P) \cdot t} \cdot 100$$

L_v : Chaleur latente de vaporisation (J/kg)

I : puissance solaire (W/m^2)

P_f : énergie électrique consommée par le ventilateur (W)

II.7. Rendement du capteur

La performance thermique d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané, défini par : [8]

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{I A}$$

-] η : rendement instantané du capteur plan.
-] $\dot{m}$: Débit d'air massique [kg/s]
-] C_p : Chaleur spécifique [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
-] T_e et T_s respectivement la température de l'air à l'entrée et la sortie du capteur [K].
-] A_c : Surface de l'absorbeur [m^2]
-] I_G : Densité de flux solaire global incident [W/m^2].

Conclusion

Ce chapitre a permis d'élaborer les modèles théoriques relatifs au capteur ainsi que le séchoir solaires en détaillant leurs différents composants, leurs fonctionnements et les différentes corrélations permettant d'obtenir un meilleur rendement du procédé de séchage suite au couplage des deux organes.

Chapitre III : Etude expérimentale.

Matériels et méthodes

.

Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation du prototype d'un séchoir couplé à un capteur solaire étudié, dont nous allons préciser avec détails les différentes étapes de réalisation et d'assemblage de tous les éléments constitutifs.

La présente conception concerne un modèle expérimental d'un séchoir et d'un capteur thermique en vue de leur utilisation dans un processus de séchage des différents produits (agroalimentaires, pharmaceutiques,...etc).

Le choix des différents matériaux a été fait en fonction de :

- ✓ Leur impact positif sur l'environnement (récupération des cannettes jetées dans la nature et tableau en bois).
- ✓ Leur disponibilité sur le marché.
- ✓ Leur possibilité technique de fabrication.

III.1. Les buts recherchés par cette réalisation

- Production économique, abordable et rapide des aliments agroalimentaires.
- Une meilleure qualité des produits séchés.
- Subvenir aux besoins quotidiens en énergie qu'on puise (la chaleur).
- Mettre un frein ou tout au plus réduire la consommation des énergies fossiles.
- Réduire la pollution atmosphérique par l'utilisation d'une énergie propre.
- Sensibiliser le citoyen pour l'amener à suivre cet exemple et faire des rénovations.
- Participer au respect de l'environnement en réduisant les déchets jetés dans la nature.

III.2. Fabrication du prototype étudié

Notre objectif est de réaliser un séchoir solaire écologique à base de bois de récupération qui sera ensuite couplé à un capteur solaire thermique déjà réalisé, nous allons concevoir un boîtier bien isolé thermiquement sur lequel on percera deux ouvertures; une en haut du boîtier dans laquelle on placera un extracteur d'air afin de renouveler l'air de l'enceinte et l'autre sur coté servant d'aspirer l'air sortant du capteur solaire.

Le dispositif expérimental est réalisé au niveau du Département de Génie Mécanique ainsi que le Hall technologique de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou à Oued-Aissi.

III.3. Les différentes étapes de réalisation

III.3.a. Le capteur solaire

Le capteur solaire contient les éléments suivants : [8]

- Absorbeur (des conduits réalisés par l'assemblage de cannettes).
- Deux collecteurs d'air.
- Un boîtier (en bois).
- Isolation (polystyrène).
- Une couverture transparente (un double vitrage).
- Un système de ventilation (extracteurs).

III.3.1.a.1. Absorbeur

L'absorbeur réalisé diffère des autres absorbeurs classiques, présentant une fine plaque plane généralement en aluminium ou en cuivre qui transmet la chaleur absorbée aux tubes caloporteurs.

IL est constitué de neuf tubes d'une longueur de 1 mètre. Chaque ensemble de 3 tubes constituent un circuit unique et chaque circuit est réalisé avec de mêmes cannettes :

Le premier est construit à base de cannettes de bière.

Le deuxième avec des cannettes de jus.

Le troisième avec des cannettes de soda.

Après récupération et nettoyage des différentes cannettes, on a procédé de la manière suivante : [8]

III.3.a.1.1. Préparation des cannettes

La cannette est l'élément qui compose les conduits. Elle doit d'abord subir une modification de sa forme initiale pour présenter un cylindre ouvert des deux côtés (découpe du dessous et du couvercle), par l'opération de perçage, comme l'illustrent les deux figures suivantes :



(A)



(B)

Figure III-1 : Opération de perçage.

Ensuite préparé un support fait de deux morceaux de bois plats cloués entre eux afin d'empiler les canettes (figure III-2). Le but est de maintenir les canettes aussi droites que possible pendant le séchage de la colle.



Figure III-2 : Support d'assemblage.

III.3.a.1.2. Assemblage

C'est l'étape qui consiste à assembler les canettes pour réaliser les trois (3) tubes pour chaque circuit de l'absorbeur. Les canettes sont emboîtées les unes dans les autres et sont fixées à l'aide d'un mastic de silicone. (Le paragraphe juste après, présente quelques informations sur cette colle). [8]



Figure III-3 : Assemblage des canettes.

❖ Quelques informations sur le mastic de silicone

Le mastic de silicone « Sikaflex PRO-11FC », est un mastic à base de colle polyuréthane de fixation souple, utilisé en menuiserie, couverture, électricité, sanitaires, joints étanches. Il adhère sur du verre, de l'acier, du PVC, du zinc, et sur aluminium...il résiste aux chocs, vibrations, variations de température et résiste aux UV, à l'eau, et aux intempéries.[8]

III.3.a.1.3. Traitement de surface des tubes

Afin d'obtenir une surface plus absorbante, les canettes sont peintes en noir mate, vu que la couleur noire absorbe le maximum de rayonnement solaire, comme le montre la figure suivante :



Figure III-4 : Tubes peints en noir mate.

Le tableau suivant résume les caractéristiques de la canalisation :

canettes en aluminium	Dimension		Caractéristiques physiques			
	Longueur (m)	Diamètre Intérieur (m)	Volume	Conductivité Thermique	Absorptivité (peinture noire)	Emissivité (peinture noire)
canettes de la bière	0,160	0,046		204 (W/m.K)	0,97	0,88
canettes de jus	0,125	0,043		204 (W/m.K)	0,97	0,88
canettes de soda	0,105	0,046		204 (W/m.K)	0,97	0,88

Tableau III-1 : Caractéristiques des canettes.

III.3.a.2. Fabrication des collecteurs

Les collecteurs utilisés sont en bois, couverts de feuilles d'aluminium, pour protéger le bois des facteurs extérieurs (humidité, écart de température...etc) et pour permettre une excellente étanchéité.

La méthode de fabrication consiste à couper des planches en bois en faisant des rectangles assemblés à l'aide d'une colle spéciale bois et des vis. Là où les tubes sont encastrés, on les perce à l'aide d'une perceuse.[8]

La figure suivante nous montre le collecteur :



Figure III-5 : Collecteur de sortie d'air.

A l'intérieur des collecteurs, un emplacement de chicanes a été fait pour pouvoir orienter l'air. Afin de pouvoir réaliser les essais envisagés pour ces capteurs et opter pour le circuit de l'air le mieux adapté. Celles-ci sont faites de manière mobile à l'aide de joints en caoutchouc. Elles sont réalisées en bois (contre plaqué dont l'épaisseur est de 0.5 cm et une surface de $(0,9 \times 0,9\text{cm}^2)$ emballées dans une feuille d'aluminium pour la protection du bois et une réflexion du flux radiatif sur les parois, comme la montre la figure ci-dessous : [8]



Figure III-6 : Chicane emballé avec de l'aluminium.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques du collecteur :

Matériau	Dimension			
	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Epaisseur (m)
Bois	0,67	0,10	0,095	0,01

Tableau III-2 : Caractéristiques des collecteurs.

III.3.a.3. Réalisation du boîtier

Le boîtier (en bois) est l'enceinte des éléments du capteur. Il enveloppe l'isolant ainsi que les tubes et les collecteurs. Sur sa partie supérieure, se fixe une couverture transparente ; son rôle principal est de préserver l'intégralité des éléments et de les accorder pour former un seul élément et faciliter ainsi sa manipulation (déplacement, orientation...etc). [8]



Figure III-7 : Le boîtier.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques du boîtier : [8]

Matériau	Dimension			
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Hauteur
Boîtier en bois	1,37(m)	0,805(m)	0,02(m)	0,21(m)

Tableau III-3 : Caractéristiques du boîtier.

III.3.a.4. Isolation

L'isolation thermique du capteur est assurée par une couche de polystyrène expansé de 8 cm d'épaisseur plaquée sur la surface arrière et 5 cm d'épaisseur sur les deux côtés.

L'ensemble est ensuite protégé à l'aide des feuilles d'aluminium pour réfléchir les radiations qui s'échappent entre les tubes et sur les côtés des canalisations.

L'isolation avant est assurée par un double vitrage ordinaire avec une lame d'air isolante, qui réduit sensiblement les fuites thermiques convectives et radiatives vers l'extérieur. [8]



Figure III-8 : Images représentatives de l'isolation thermique du boîtier.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de l'isolant :

Matériau	Epaisseur	Conductivité
Polystyrène (1)	0,05 (m)	0,04 (W/m K)
Polystyrène (2)	0,08 (m)	0,04 (W/m K)

Tableau III-4 : Caractéristiques de l'isolation.

III.3.a.5. Couverture transparente

La couverture transparente permet le passage d'une grande partie du rayonnement solaire (de 80% à 95%, selon le verre utilisé) et elle est opaque aux infrarouges émis par la surface absorbante (canettes) ; ce qui crée l'effet de serre.

Dans notre cas, la couverture est réalisée avec deux vitres ordinaires de 4 mm d'épaisseur qui ont un bon coefficient de transmission lumineux. Le double vitrage est porté sur un cadre en aluminium avec une lame d'air de 4 (mm), afin de minimiser les pertes de chaleur.

L'utilisation des joints en plastique a été faite pour protéger le verre du phénomène de dilatation qui est dû aux variations de température. [8]



Figure III-9 : joint en plastique.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de la couverture transparente :

Matériau	Dimension			Emissivité
	Longueur	Largeur	Épaisseur	
Verre ordinaire (double vitrage)	1,31 (m)	0.75 (m)	5 (mm)	0,83

Tableau III-5 : Caractéristique de la couverture transparente.

III.3.a.6. Le système de ventilation

Les extracteurs sont placés sur la paroi externe du collecteur de sortie. De préférence mettre un petit ventilateur pour chaque élément ; cela équilibre mieux le passage d'air dans chaque circuit. [8]

Après la sortie des trois ventilateurs, on à percé un trou (sur la paroi du boitier), dans lequel on a fixé un raccord en aluminium pour orienter et canaliser l'air chaud vers la sortie du capteur.



Figure III-10 : Les extracteurs d'aspiration.



Figure III-11 : Emplacement des extracteurs.

Une fois toutes les étapes franchies, les éléments sont assemblés pour constituer le prototype comme l'indique la figure III-12.



Figure III-12: Images représentative du prototype réalisé.

III.3.b. Séchoir solaire

Le séchoir ou la chambre de séchage est le 2ème élément qui permettra d'effectuer notre étude, ce dernier est constitué de :

- Le boîtier
- L'isolation thermique
- Claies
- Support

III.3.b.1. Fabrication du boîtier

Caisson réalisé à partir du bois des tableaux de classe récupérés au niveau du département Génie Mécanique, après avoir pris les dimensions et tracés les tableaux nous avons formés quatre (04) plaques de 1 m sur 0.5 m et deux plaques de 0.5 m sur 0.5 m, les barres servant de support au tableau ont été récupérées pour en faire des fixateurs entre les planches composant le caisson.

Après avoir tout assemblé et obtenu un boîtier, nous avons troué à différent diamètre 2 trous; le premier de diamètre 0.18 m en haut pour y placer l'extracteur d'air servant à renouveler l'air de l'enceinte, le second de diamètre 0.09 m sur la paroi droite du boîtier qui servira de passage pour la conduite d'air chaud venant du capteur solaire.

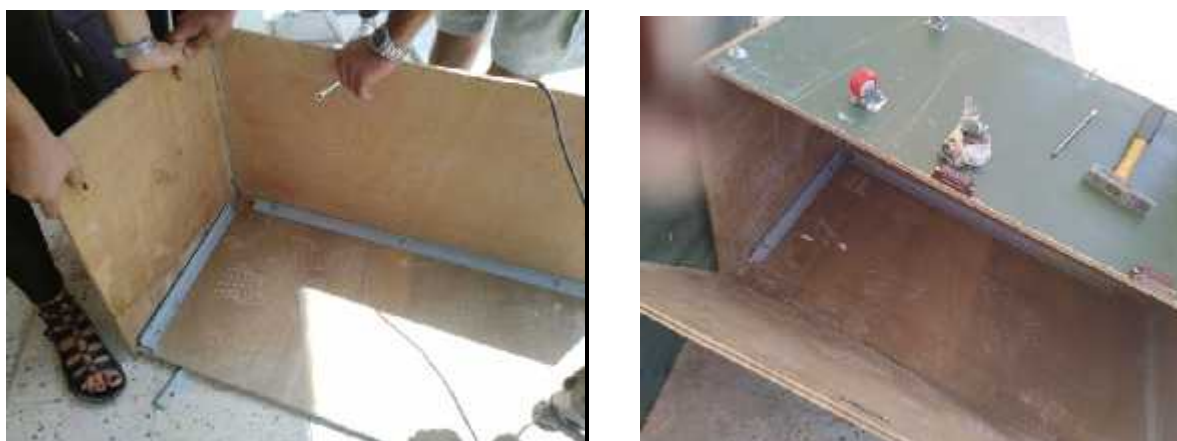


Figure III-13 : Le boîtier.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques du boîtier :

Matériau	Dimensions			
	Longueur	Largeur	Epaisseur	Hauteur
Boîtier en bois	1 m	0.5 m	0.01 m	0.5 m

Tableau III- 6 : Caractéristiques techniques du boîtier.

III.3.b.2. L'isolation thermique

L'intérieur du four a été isolé en assemblant du polystyrène avec de l'aluminium, des plaques de polystyrène de 0.02 m d'épaisseur qu'on a couvertes avec des feuilles d'aluminium sur lesquelles par la suite on a ajouté des plaques de cette même matière afin de bien protéger l'ensemble et réfléchir le rayonnement.



Figure III-14 : Isolation thermique de l'intérieur du séchoir.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de l'isolant :

Matériau	Epaisseur	Conductivité
Polystyrène	0.02 m	0.04 w/m.k

Tableau III-7 : Caractéristiques d'isolation.

III.3.b.3. Les claies

Deux plateaux en Acier galvanisé (0.60m sur 0.40m) vont servir de claies pour déposer les aliments à sécher et pour un meilleur résultat nous avons opté au perçage de ces derniers et ce, en nous dirigeant au Hall Technologie sis a Oeud-Aissi. En utilisant les perceuses disponibles au sein du Hall, nous avons pu percer les plateaux à différents diamètres ; 0.007m pour le premier (l'opération a duré 45min) et 0.010m pour le second (durée de 1h15min).



Figure III-15 : Les claies.

III.3.b.4. Support

Un support usé a été récupéré et modifié afin d'obtenir un dispositif servant à placer les claies de manière à ce qu'il y ait un espace adéquat pour un passage d'air uniforme.



Figure III-16 : Support de claies.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques du support :

Matériau	Dimensions			
	Longueur	Largeur	Hauteur	Espace entre claies
Acier	0.65 m	0.40m	0.30 m	0.15m

Tableau III-8: Caractéristiques techniques du support.

III.4. Expériences

III.4.1. Séchage par séchoir solaire

Pour tester l'efficacité de notre dispositif, nous avons mené quelques expériences sur des produits alimentaires dont le piment rouge (piquant et doux), l'ail et la banane. Nous avons donc eu recours à déterminer différents paramètres qui interviennent lors de l'opération de séchage qui sont comme suit :

- La température ambiante
- Température de la chambre de séchage
- Les vitesses de séchage
- La teneur en eau
- Variation de la masse
- L'activité de l'eau dans le produit.

III.4.1.1. Description de l'expérience

Nous avons doté notre dispositif d'un capteur de température fixé à l'intérieur de la chambre de séchage et un thermocouple qui a permis de mesurer les températures au niveau de différents points de notre système (entrée et sortie du capteur, vitre et l'absorbeur).

Avant de passer au mesurage de ces différents paramètres nous avons d'abord préparé les aliments à sécher et ce en les lavant et coupant en différentes tailles (lamelles, tranches et complètes), après une première pesée avant de procéder au séchage nous avons déposé les aliments sur les claies, après avoir bien sûr nettoyé le matériel ensuite à l'intérieur du séchoir répétant l'opération de pesée durant la journée à divers écarts de temps.

Nos essais ont été élaborés dans des conditions climatiques différentes pendant sept (07) jours.



Figure III-17 : piment rouge après l'avoir nettoyé et coupé.



Figure III-18 : l'ail et la banane au moment de la pesée.

III.4.2.2. Le séchage par étuve

Afin de bien sécher les produits jusqu'à stabilisation de la masse, nous avons procédé à un séchage par étuve et ceci se fait par le flux rayonnant de la résistance chauffante pour l'extraction totale de l'eau dans le produit.

Comme nous l'avons fait précédemment avec notre séchoir solaire, la pesée a été faite régulièrement à un quart d'heure (15min) d'écart avec une balance de 10^{-4} de précision et une température constante de 60°C . Après les avoir posés dans des boîtes de pétrie pour l'hygiène et la facilité de la pesée.



Figure III-19 : Produit disposé dans les pétries.



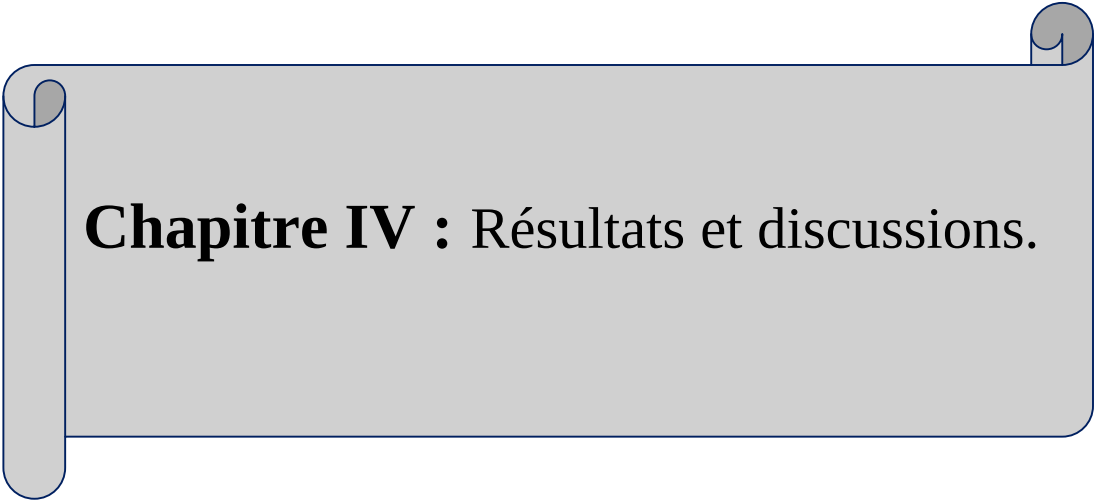
Figure III-20 : balance et étuve utilisés.

Tableau des coûts :

Matériaux	Quantité	Coût par unité
Bois	Récupéré	/
Clous	15	8 da
Charnières	3	40 da
Peinture	4 bombes	350 da
Polystyrène	2 plaques	160 da
Aluminium feuille	6 feuilles	150 da
Aluminium plaque	7 plaques	300 da
Chatterton aluminium en	11 rouleaux	160 da
Extracteur	1	1100 da
Variateur	1	450 da
Plateaux en acier	2	220 da
Support en acier	Récupéré	/
Un cutteur	1	25 da
Pinceau	1	65 da
La colle	2 boites	280 da
Capteur température de	1	500 da
Tapis R flex	1	
Prix total :		10160.00 DA

Conclusion

Dans ce troisième chapitre, notre travail s'est étalé sur deux parties ; la conception puis la mise en marche du dispositif et ceci en détaillant toute procédure en chaque étape suivie lors de la réalisation de ce dernier ainsi aux expériences faites avec. La suite consiste à en tirer tout résultat obtenu, le discuter et par la suite conclure l'efficacité de notre projet.



Chapitre IV : Résultats et discussions.

Introduction

Comme cité précédemment, ce dernier chapitre consiste à discuter tout résultat obtenu lors des expériences faites durant quelques jours de soleil. Avant de conclure, nous allons mentionner toute observation remarquée le long des tests et ce au niveau des températures, des pesées et de la texture du produit, pour au final arriver à évaluer le matériel conçu.

IV.1. Résultats des expériences et discussions

IV.1.1. Premier essai Le 09 et 10 octobre 2019

Journée ensoleillée (ciel dégagé) durant toute la journée à une température ambiante variante entre [26°C et 30°C].

IV.1.1.a : Séchage du piment rouge doux

Début de l'opération de séchage à 11h15min, avec une température de séchage de 45 à 55°C.

Tableau IV-1 : Pesées du piment rouge doux en chaque écart de temps.

Temps	Echantillon 1 (g)	Echantillon 2 (g)	Echantillon 3 (g)	Echantillon 4 (g)	Masse totale
T=0	7	4	5	6	22
1h	5.7	3.2	4.1	4.9	17.9
2h	4.8	2.5	3.1	4.1	14.5
3h	4.1	1.9	2.6	3.5	12.1
4h	3.6	1.3	1.9	2.9	9.7
5h	3.3	1.0	1.6	2.6	8.5
6h	2.9	1.0	1.4	2.5	7.8
7h	2.6	0.9	1.3	2.4	7.2
8h	2.4	1.0	1.3	2.4	7.1
9h	2.2	1.1	1.3	2.4	7

Jours	Heure	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse de l'air (km/h)
Journée 09/10/2019	8h	14.3	91	0
	11h	21	69	7
	14h	28.5	48	0
	17h	24.5	43	19
Journée 10/10/2019	8h	19.7	83	0
	11h	27.5	42	0
	14h	28.3	49	7
	17h	22.9	63	15

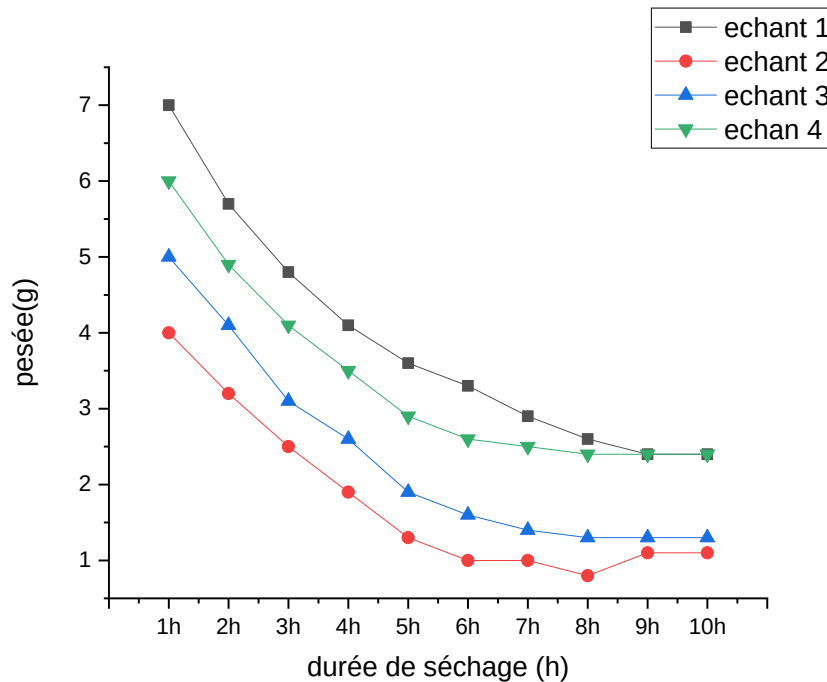


Figure IV.1 : Pesée des 04 échantillons de piment rouge en fonction du temps.

Après avoir tracé la courbe de la perte de masse, nous allons effectuer le calcul de **la teneur en eau**, puis représenter la courbe correspondante.

La teneur en eau en base sèche est donnée par la relation suivante :

$$X_{(t)} = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \text{ avec : } m_e = m - m_s$$

- ✓ m_e : masse d'eau du produit.
- ✓ m_s : masse sèche du produit en gramme de matière sèche.
- ✓ m : la masse totale du produit.

Pour ce premier essai, la teneur en eau est calculée en chaque une heure de séchage :

$$X_{(t=0)} = \frac{2.7}{7} = 2.14 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{g}_{\text{ms}}$$

$$X_{(t=1h)} = \frac{1.9-7}{7} = 1.5571$$

$$X_{(t=2h)} = \frac{1.5-7}{7} = 1.0714$$

$$X_{(t=3h)} = \frac{1.1-7}{7} = 0.7285 \quad \dots \text{etc}$$

De la même manière, nous avons obtenu la valeur de la teneur en eau en chaque point.

La courbe ci-dessous nous donne l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps

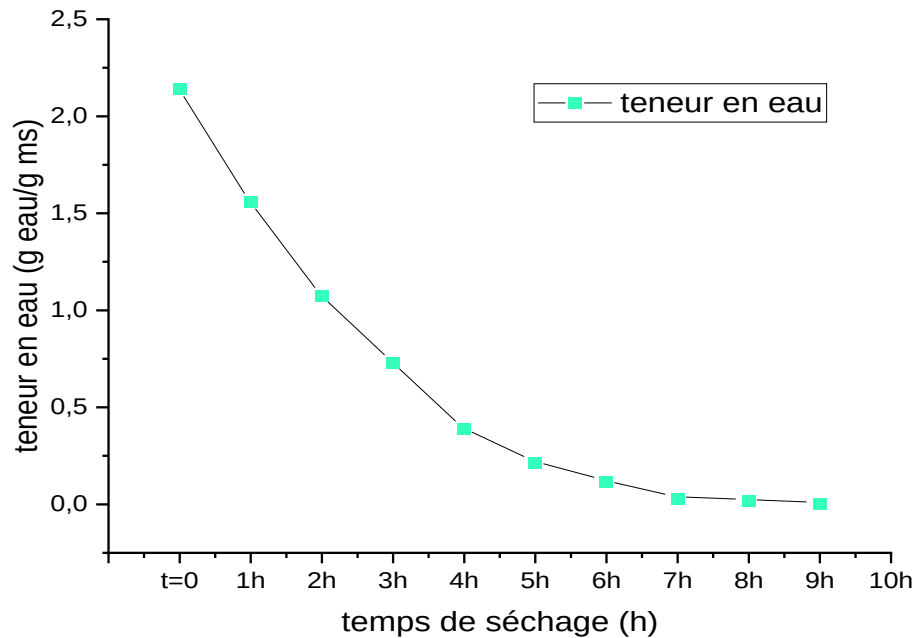


Figure IV-2 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps t.

La vitesse est un terme existant lors d'un moindre mouvement, différents paramètres peuvent la déterminer. Dans ce cas la variation de la teneur en eau ou de la masse en fonction du temps suffisent pour tracer la courbe de l'évolution de la vitesse de séchage au cours du temps.

Elle est donnée par : $\frac{d}{d}$

Avec : $dm_0 = m_0 - m_1$

$dm_1 = m_1 - m_2$

$dm_2 = m_2 - m_3 \dots \text{etc}$

La différence de la masse totale en fonction du temps des 04 échantillons est représentée dans ce tableau suivi d'une courbe.

Ecart de temps	Différence de masse (dm)
$\Delta t = t_1 - t_0$	$Dm_1 = m_0 - m_1 = 4.1$
$\Delta t = t_2 - t_1$	$Dm_2 = m_1 - m_2 = 3.4$
$\Delta t = t_3 - t_2$	$Dm_3 = m_2 - m_3 = 2.4$
$\Delta t = t_4 - t_3$	$Dm_4 = m_3 - m_4 = 1.2$
$\Delta t = t_5 - t_4$	$Dm_5 = m_4 - m_5 = 0.7$

$\Delta t = t_6 - t_5$	$Dm_6 = m_5 - m_6 = 0.6$
$\Delta t = t_7 - t_6$	$Dm_7 = m_6 - m_7 = 0.1$
$\Delta t = t_8 - t_7$	$Dm_8 = m_7 - m_8 = 0.1$

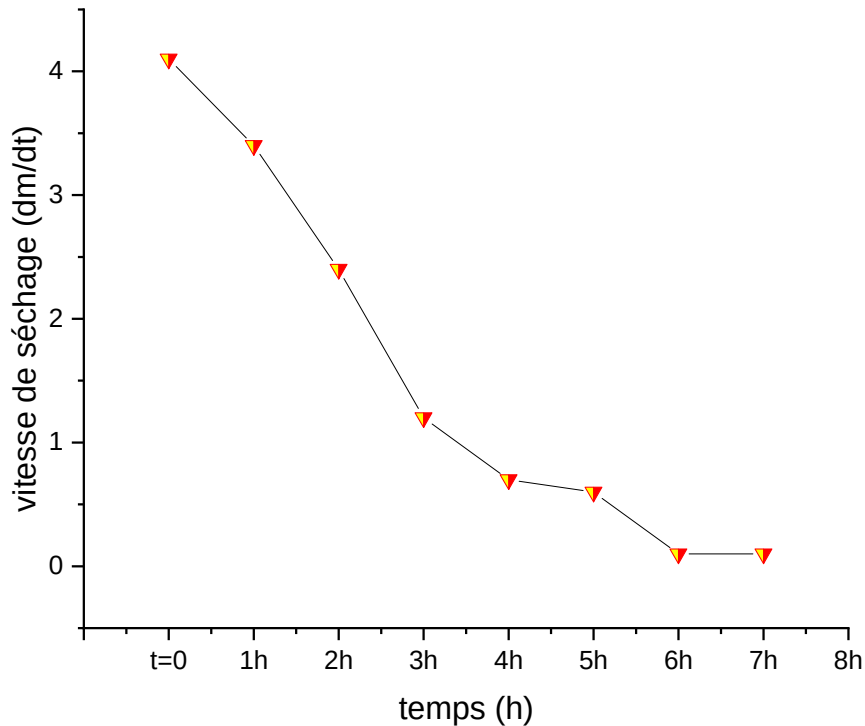


Figure IV-3 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

IV.1.1.b. Séchage du piment rouge piquant

Durant les deux journées du 14 et 15 octobre le temps était ensoleillé avec un ciel nuageux. Quant à la journée du 16 octobre, le ciel était plutôt dégagé. La température ambiante pendant ces 3 jours variait entre [23°C et 35°C].

- ✓ Début de l'opération de séchage du 14 octobre : 10 h.
- ✓ Début de l'opération de séchage du 15 octobre : 9 h.
- ✓ Début de l'opération de séchage du 16 octobre : 10h.

Pour ce deuxième séchage, la température variant entre 45 et 60°C, nous avons séché le piment rouge piquant.

Tableau IV-2 : Pesée du piment rouge piquant en 3 jours de séchage.

Temps	Echan 1(g)	Echan 2(g)	Echan 3(g)	Echan 4(g)	Echan 5(g)	Echan 6(g)	Echan 7(g)	Masse totale
1h	5.4	4.4	3.3	5.2	3.3	4.2	3.4	29.2
2h	4.3	3.4	2.4	4.0	2.1	3.2	2.4	21.8
3h	3.7	2.9	1.8	3.3	1.8	2.5	1.9	17.9
4h	2.8	2.4	1.6	2.9	1.4	1.8	1.5	14.4
5h	2.4	2.0	1.1	2.5	1.2	1.8	1.4	12.5
6h	2.1	1.8	0.9	2.2	1.0	1.5	1.2	10.7
7h	2.0	1.6	0.8	2.0	1.0	1.4	1.1	9.9
8h	1.9	1.5	0.7	1.9	0.9	1.3	1.0	9.2
9h	1.7	1.3	0.7	1.7	0.8	1.1	0.9	8.2
10h	1.5	1.0	0.6	1.6	0.7	1.0	0.8	7.2
11h	1.4	0.8	0.5	1.4	0.6	0.8	0.7	6.2
12h	1.2	0.7	0.4	1.3	0.5	0.7	0.7	5.5
13h	1.1	0.7	0.4	1.2	0.5	0.7	0.7	5.3
14h	1.0	0.6	0.4	1.0	0.4	0.5	0.4	4.3
15h	0.9	0.5	0.3	0.9	0.4	0.4	0.3	3.7
16h	0.7	0.5	0.3	0.7	0.3	0.4	0.3	3.2
17h	0.6	0.4	0.3	0.6	0.4	0.4	0.4	3.1
18h	0.4	0.3	0.2	0.5	0.3	0.4	0.4	2.5
19h	0.4	0.3	0.2	0.5	0.3	0.4	0.3	2.4

Jours	Heure	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse de l'air (km/h)
Journée du 14/10/2019	8h	19.3	67	19
	11h	24.7	52	15
	14h	34.7	26	13
	17h	32.2	32	07
Journée du 15/10/2019	8h	18	93	0
	11h	22.8	67	9
	14h	24.4	55	31
	17h	23.7	61	19
Journée du 16/10/2019	8h	13.8	90	0
	11h	19.6	72	7
	14h	25.1	50	7
	17h	24.1	48	22
Journée du 17/10/2019	8h	13.9	85	0
	11h	19.9	69	0
	14h	26.8	47	19
	17h	26.5	47	22

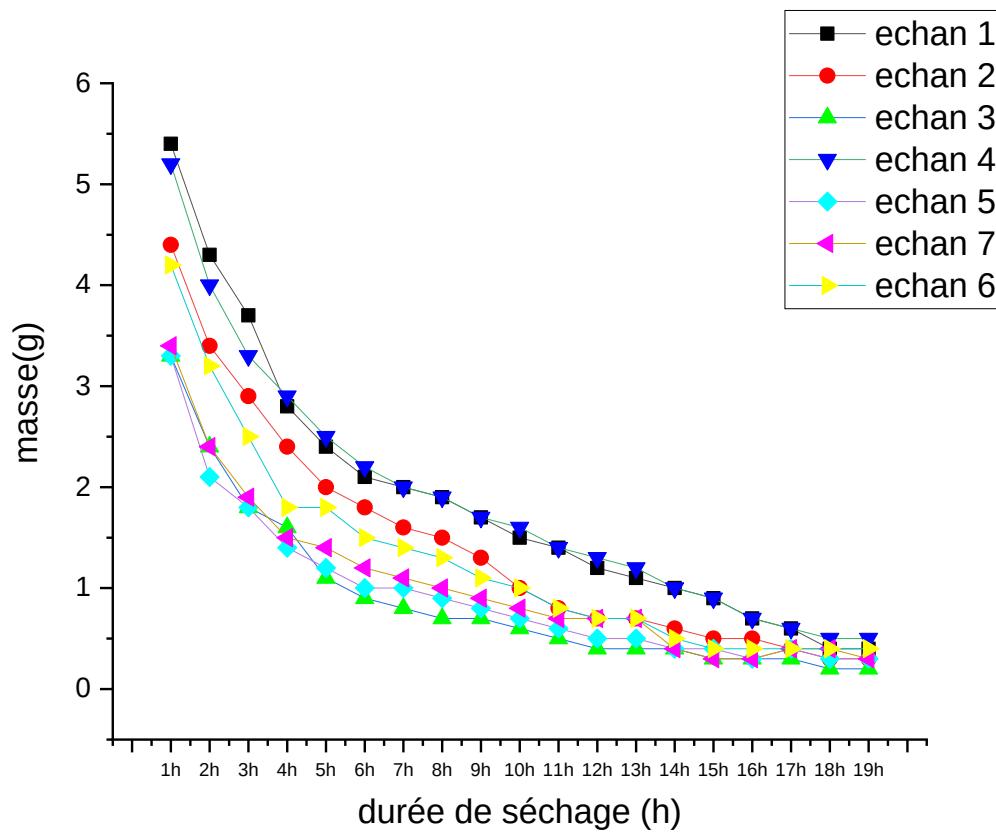


Figure IV-4: Pesée des 07 échantillons du piment rouge piquant en fonction du temps.

En faisant la somme de la masse des 07 échantillons nous avons obtenu une masse totale, avec laquelle on a tracé la courbe ci-dessous qui représente la variation de la masse en fonction du temps au cours du séchage.

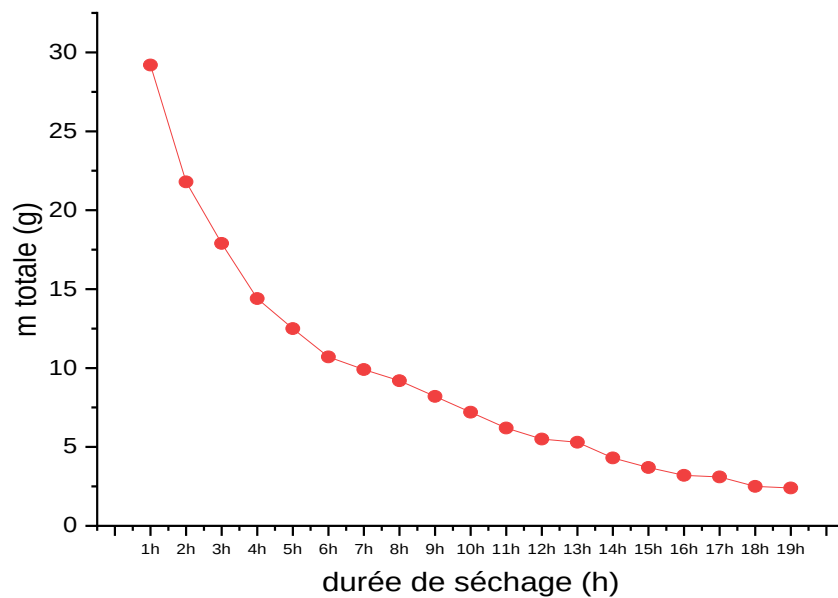


Figure IV-5 : Variation de la masse totale en fonction du temps

Nous allons calculer la teneur en eau comme montré en premier essai, puis on passe au tracé de la courbe.

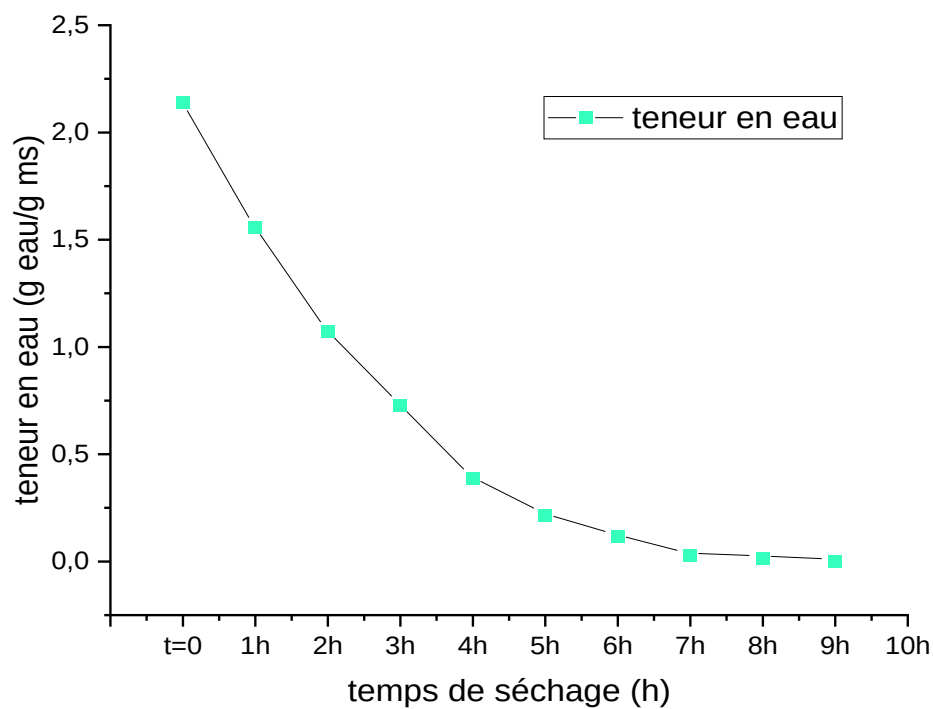


Figure IV-6 : Evolution de la teneur en eau dans le piment piquant en fonction du temps.

La courbe de la vitesse de séchage dans le cas du piment rouge piquant est représentée ci-dessous :

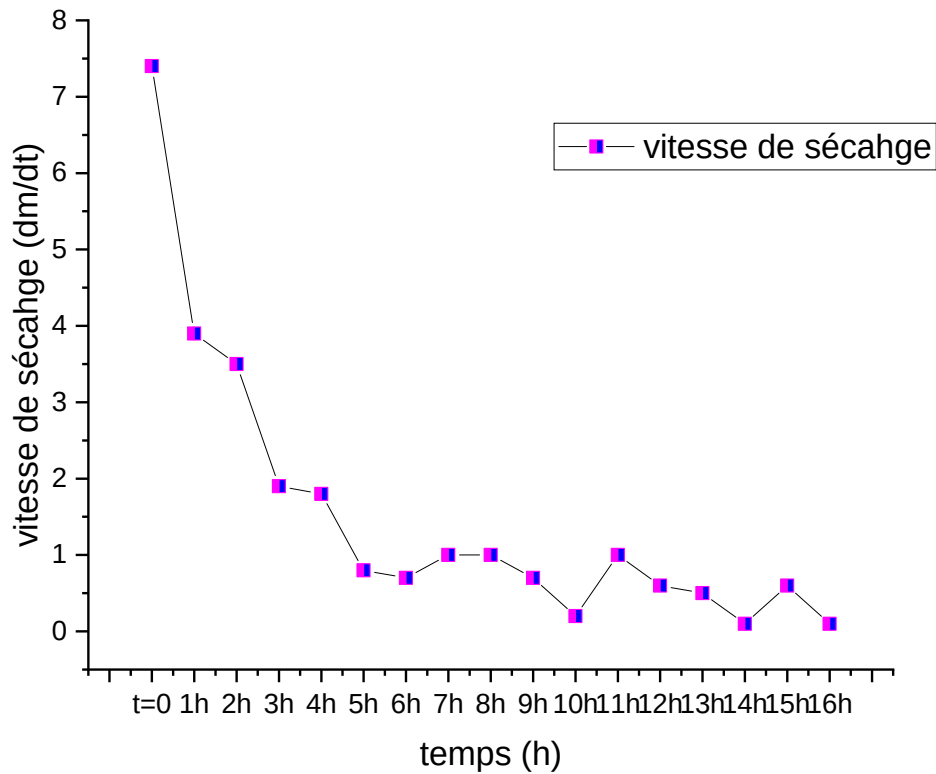


Figure IV-7 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

IV.1.1.c. Séchage de l'ail

Pour le séchage de l'ail, notre assèchement à commencer du 15 octobre jusqu'au 17 octobre [une journée ensoleillée avec un ciel dégagé].

Tableau IV-3 : Pesée de l'ail en 18 heures de séchage.

Temps	Pesée (g)
1h	32.0
2h	29.9
3h	26.7
4h	24.3
5h	22.5
6h	21.0
7h	19.9
8h	18.2
9h	16.4

10h	15.8
11h	15.2
12h	14.8
13h	14.5
14h	13.6
15h	13.1
16h	12.9
17h	12.6
18h	12.6

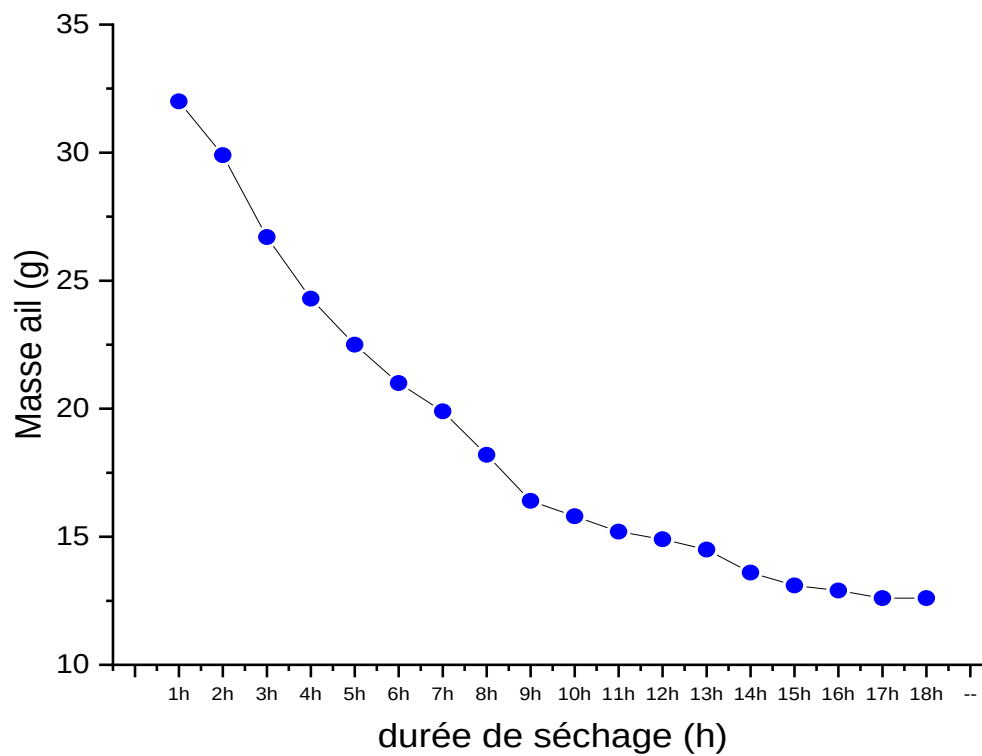


Figure IV-8 : Pesée de l'ail en fonction de temps.

Après le calcul de la teneur en eau au cours du séchage nous avons obtenus la courbe ci-dessous qui représente l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps.

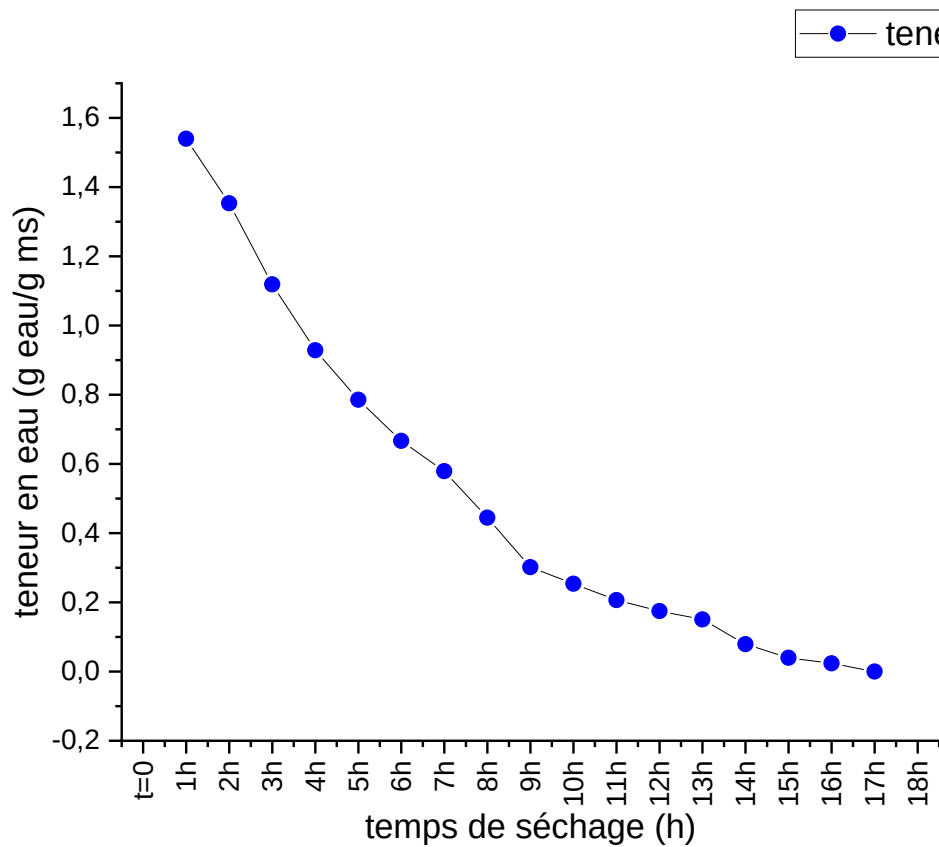


Figure IV-9 : Variation de la teneur en eau de l'ail au cours de séchage.

La courbe de séchage pour l'ail est représentée sur la courbe ci-dessous.

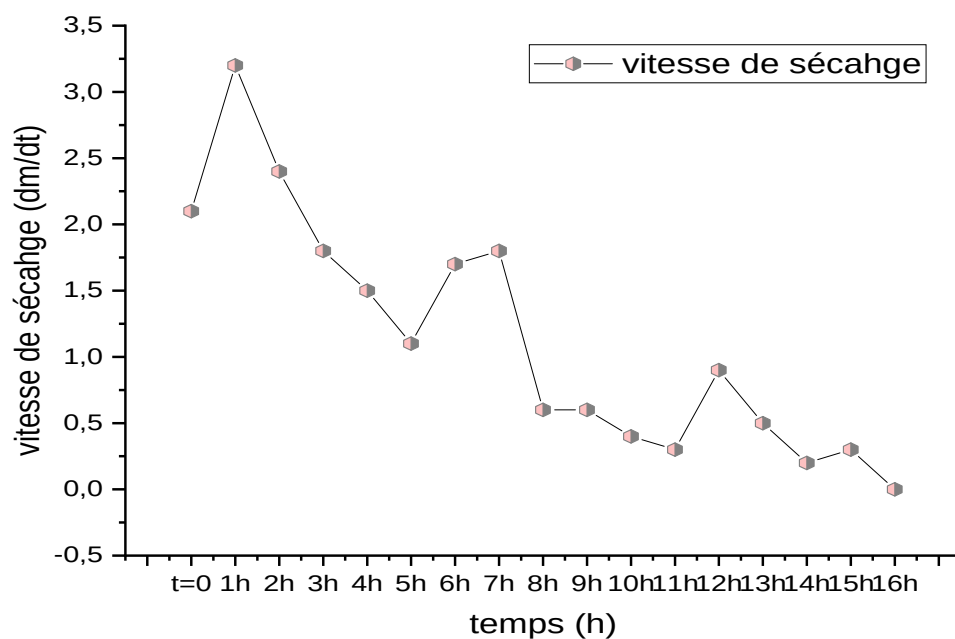


Figure IV-10 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

IV.1.1.d. Séchage de la banane

Pour le séchage de la banane, notre assèchement à commencer du 15 octobre jusqu'au 17 octobre [une journée ensoleillée avec un ciel dégagé].

Le tableau suivant montre la pesées de la banane au cour du séchage.

Tableau IV-4 : Pesée de la banane en 3 jours de séchage.

Temps	Pesée (g)
1h	79.0
2h	71.7
3h	60.9
4h	54.2
5h	46.7
6h	35.3
7h	32.2
8h	28.5
9h	26.0
10h	25.3
11h	24.9
12h	23.9
13h	22.6
14h	22.1
15h	21.8
16h	21.4
17h	20.1
18h	20.1

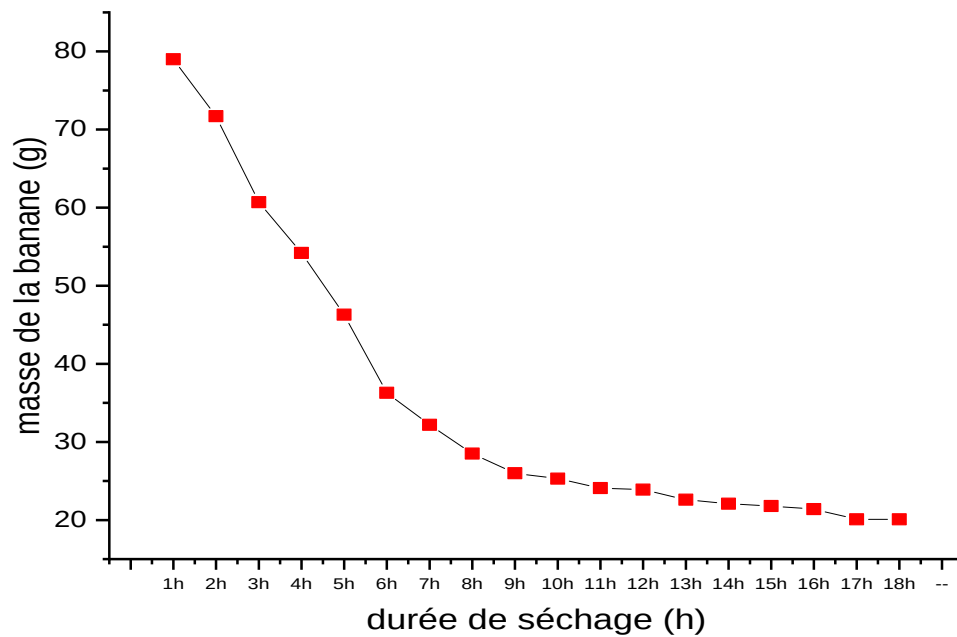


Figure IV-11: Pesée de la banane en fonction de temps.

L'évolution de la teneur en eau pour la banane est figurée sur la courbe suivante :

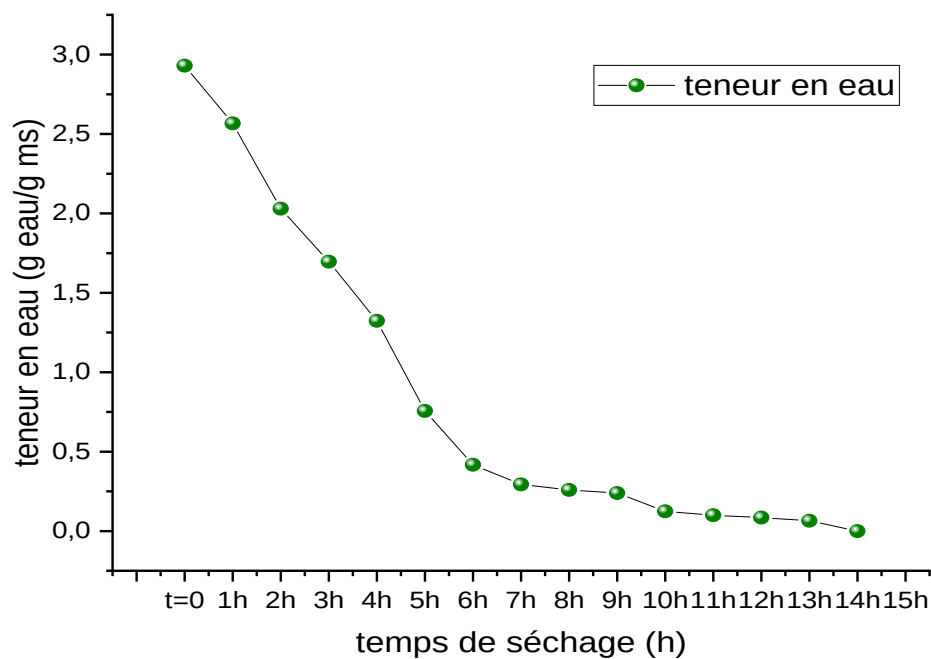


Figure IV-12: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.

La vitesse de séchage de la banane est représentée sur la figure suivante :

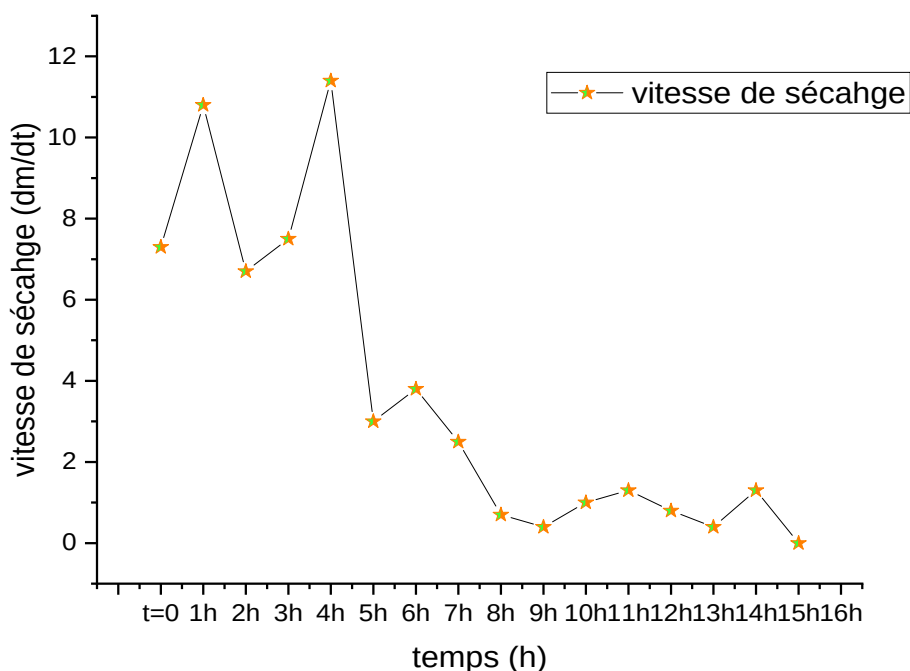


Figure IV-13 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

IV.1.2. Essais du 20 au 24 octobre 2019, séchage par étuve

IV.1.2.a. Séchage du piment rouge doux

Durant les journées nuageuses et pluvieuses, on avait travaillé dans le laboratoire avec l'étuve afin de poursuivre le séchage de quelques aliments (piments rouge doux), tracer les courbes ainsi poursuivre leur évolutions durant le séchage.

Après 04 jours spasmodiques de séchage à une température constante de 60°C nous avons abouti aux résultats figurants dans les tableaux ci-dessous.

Tableau IV-5 : Pesé du piment rouge doux en 04 jours de séchage par étuve.

Temps (minute)	Piment doux (g)	
T=0	19,4654	16,633
15	18,8766	15,8706
30	18,4188	15,5078
45	17,9615	15,1374
60	17,4286	14,7372
75	16,9507	14,3641
90	16,5024	14,0155
105	15,9495	13,5682
120	15,6284	13,3008
135	15,2022	12,9394

150	14,7256	12,5278
165	14,3119	12,2001
180	13,9541	11,9052
195	12,9516	11,3644
210	12,5724	11,0332
225	11,8053	10,3529
240	11,523	9,8042
255	10,9976	9,3549
270	10,788	9,0182
285	10,4546	8,9386
300	10,0917	8,6317
315	9,6057	8,409
330	9,4297	8,3507
345	9,2981	8,3075
360	9,0362	8,0895
375	8,7239	7,8286
390	8,3883	7,5601
405	8,1038	7,3236
420	7,8443	7,0324
435	7,6497	6,5011
450	7,3232	6,5426
465	7,0852	6,3602
480	4,9632	3,5581
495	4,8152	3,4078
510	4,689	3,2784
525	4,4802	3,0893
540	4,33	2,9143
555	4,2073	2,7206
570	4,1133	2,6668
585	4,0083	2,532
600	3,9443	2,4386
615	3,8735	2,3496
630	3,7903	2,2142
645	3,7232	2,1035
660	3,3759	1,3124
675	3,3418	1,2584
690	3,33	1,2384
705	3,3167	1,2218
720	3,3047	1,1945
735	3,2924	1,1674
750	3,2828	1,1356
765	3,2703	1,1022
780	3,2662	1,0905
795	3,2639	1,0784
810	3,2638	1,078

825	3,2608	1,0651
840	3,2581	1,0572
855	3,2578	1,0527

La courbe ci-dessous nous montre l'évolution de la masse en fonction du temps.

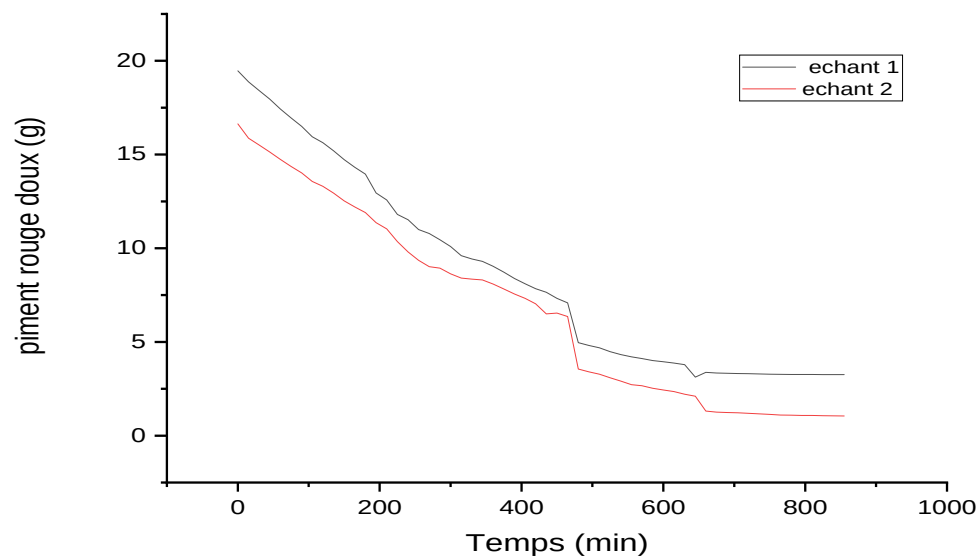


Figure IV-14 : Pesée du piment rouge doux par étuve en fonction du temps.

La teneur en eau du piment rouge doux est représentée sur la courbe suivante :

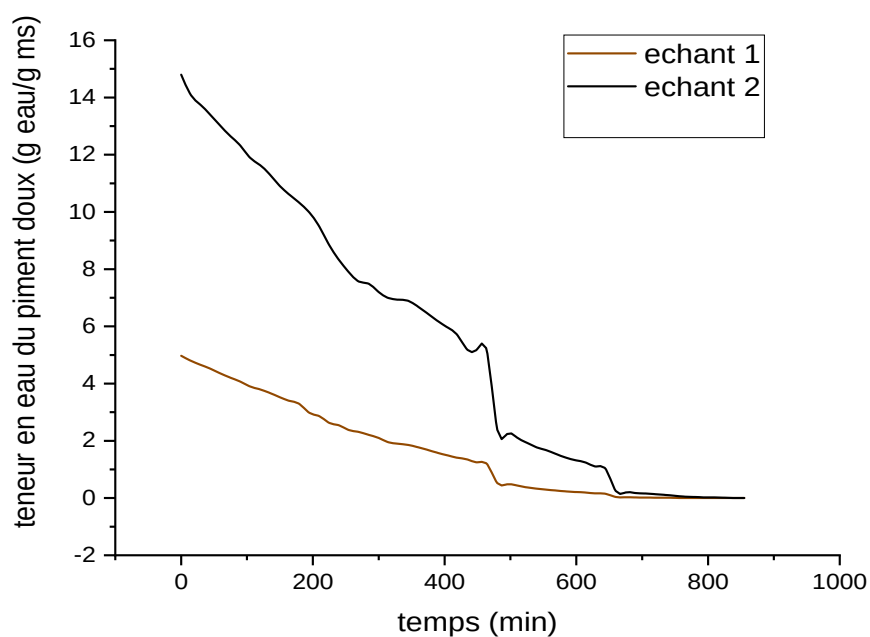


Figure IV-15 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps du temps.

IV.1.2.b. Séchage de l'ail

La variation de la masse de l'ail au cours du temps est représentée dans le tableau suivant :

Tableau IV-6 : Pesée de l'ail par étuve durant 04 jours de séchage.

Temps (minute)	Ail (g)
T=0	9,3819
15	8,7562
30	8,424
45	8,0699
60	7,681
75	7,3588
90	7,0545
105	6,728
120	6,5352
135	6,2835
150	6,0335
165	5,8316
180	5,6745
195	5,592
210	5.4984
225	5.3526
240	5.2289
255	5.0637

270	4,9292
285	4,6912
300	4,6287
315	4,5158
330	4,4531
345	4,417
360	4,3593
375	4,3148
390	4,2914
405	4,2535
420	4,2175
435	4,1748
450	4,1428
465	4,1092
480	4,0791
495	4,0578
510	4,0262
525	4,0078

La courbe suivante nous mène à voir l'évolution de l'ail pendant son séchage dans l'étuve.

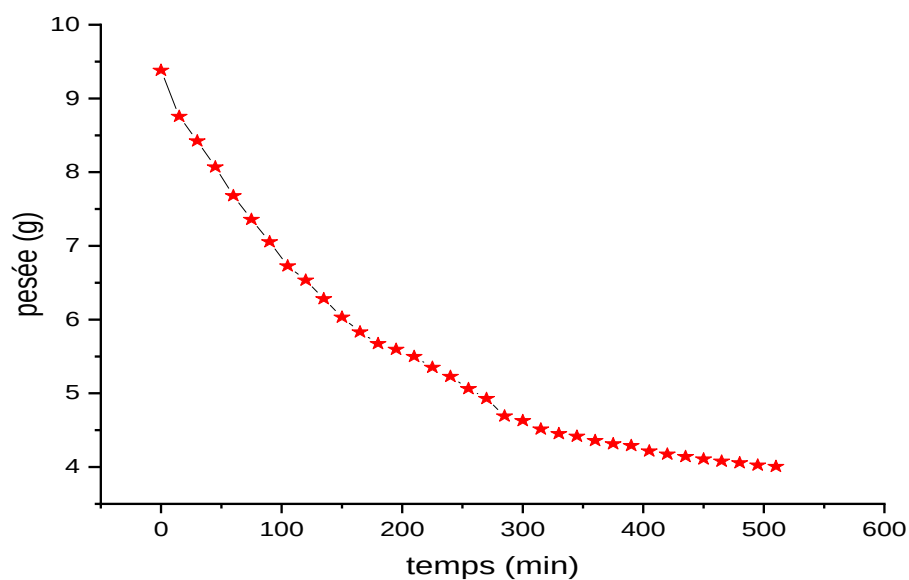


Figure IV-16 : Pesée de l'ail durant 04 jours de séchage dans l'étuve en fonction du temps.

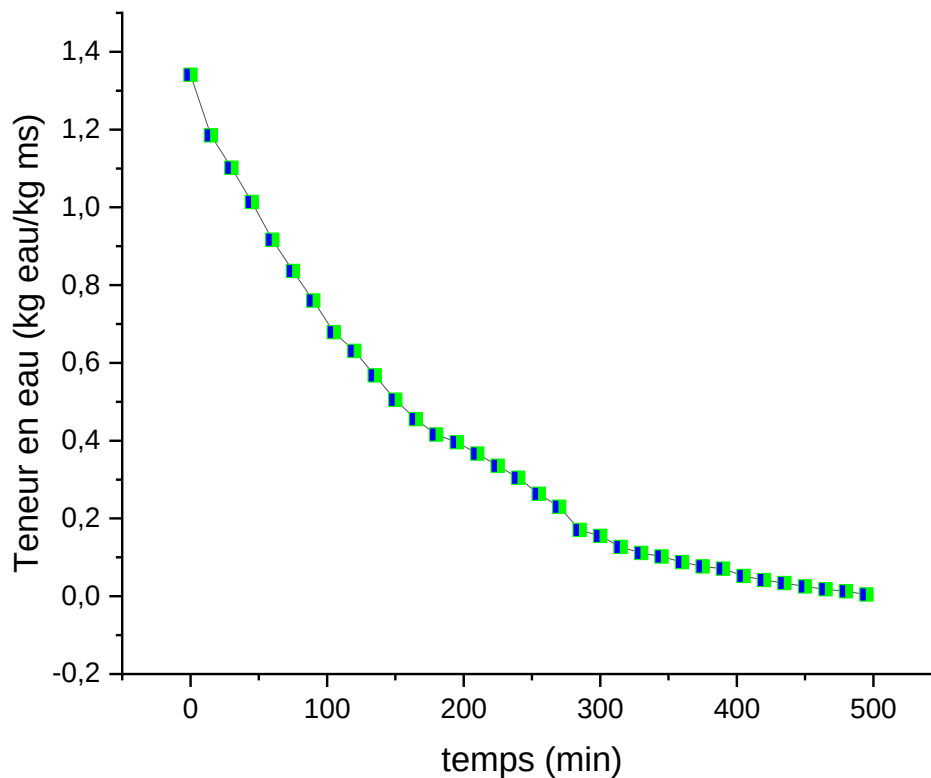


Figure IV- 17: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.

IV.1.2.c. Séchage du piment rouge piquant

La variation de la masse du piment piquant est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV-7 : Pesée du piment rouge piquant en 04 jours de séchage dans l'étuve.

Temps (minutes)	piment piquant (g)	
T=0	16,9744	9,9977
15	16,2781	9,4816
30	15,8276	9,1142
45	15,3219	8,745
60	14,7892	8,387
75	14,0375	8,0187
90	13,8432	7,6781
105	13,2742	7,2622
120	12,9344	7,0132
135	12,4652	6,665
150	11,9745	6,2819
165	11,5303	5,9736

180	11,1706	5,7191
195	10,246	5,2757
210	9,8717	5,0102
225	9,1387	4,476
240	8,8739	4,0003
255	8,4083	3,6561
270	8,1401	3,4327
285	7,9762	3,3375
300	7,5797	3,1207
315	7,242	3,0901
330	7,0585	3,0519
345	6,8611	3,0118
360	6,5878	2,886
375	6,2852	2,7282
390	5,9552	2,5978
405	5,6783	2,4873
420	5,3984	2,385
435	5,1489	2,2853
450	4,8318	2,1885
465	4,6375	2,0762
480	3,991	1,9825
495	3,5963	1,9731
510	3,0152	1,972
525	2,9525	1,9712
540	2,1155	1,9697
555	2,113	1,9687
570	2,1101	1,9685

La courbe ci-dessous montre l'évolution de la masse en fonction du temps dans l'étuve.

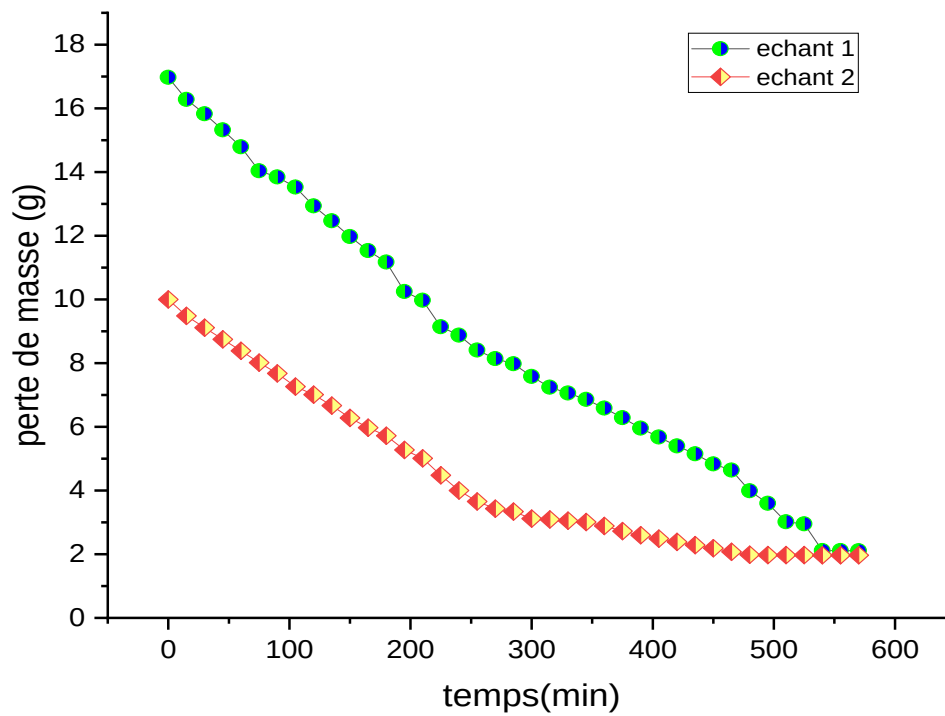


Figure IV-18 : Pesée du piment piquant durant 03 jours de séchage dans l'étuve en fonction du temps.

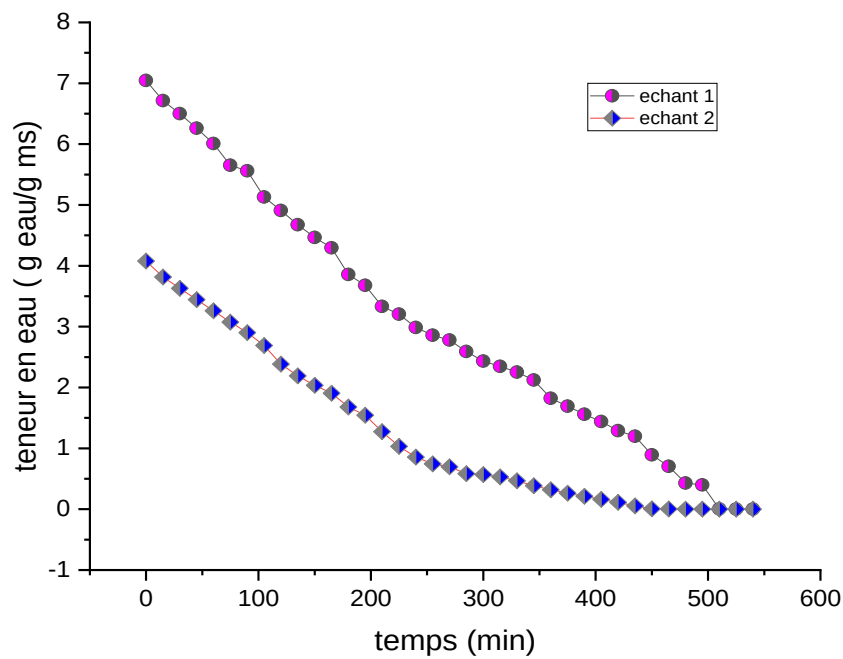


Figure IV-19 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.

Allures des courbes de séchage en kilogramme

) Variation de la masse

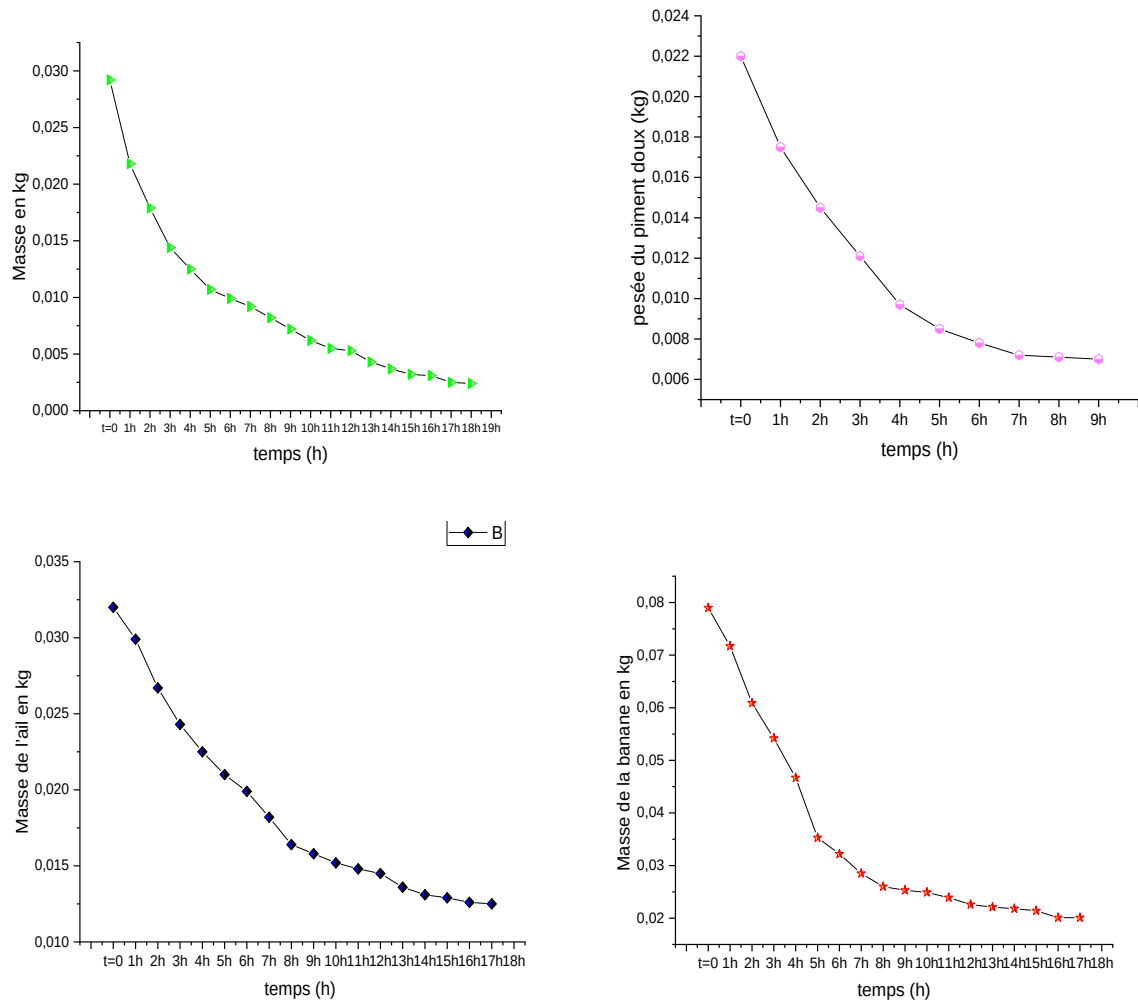


Figure IV-20 : Variation de la masse en Kg des quatre produits.

Variation de la teneur en eau:

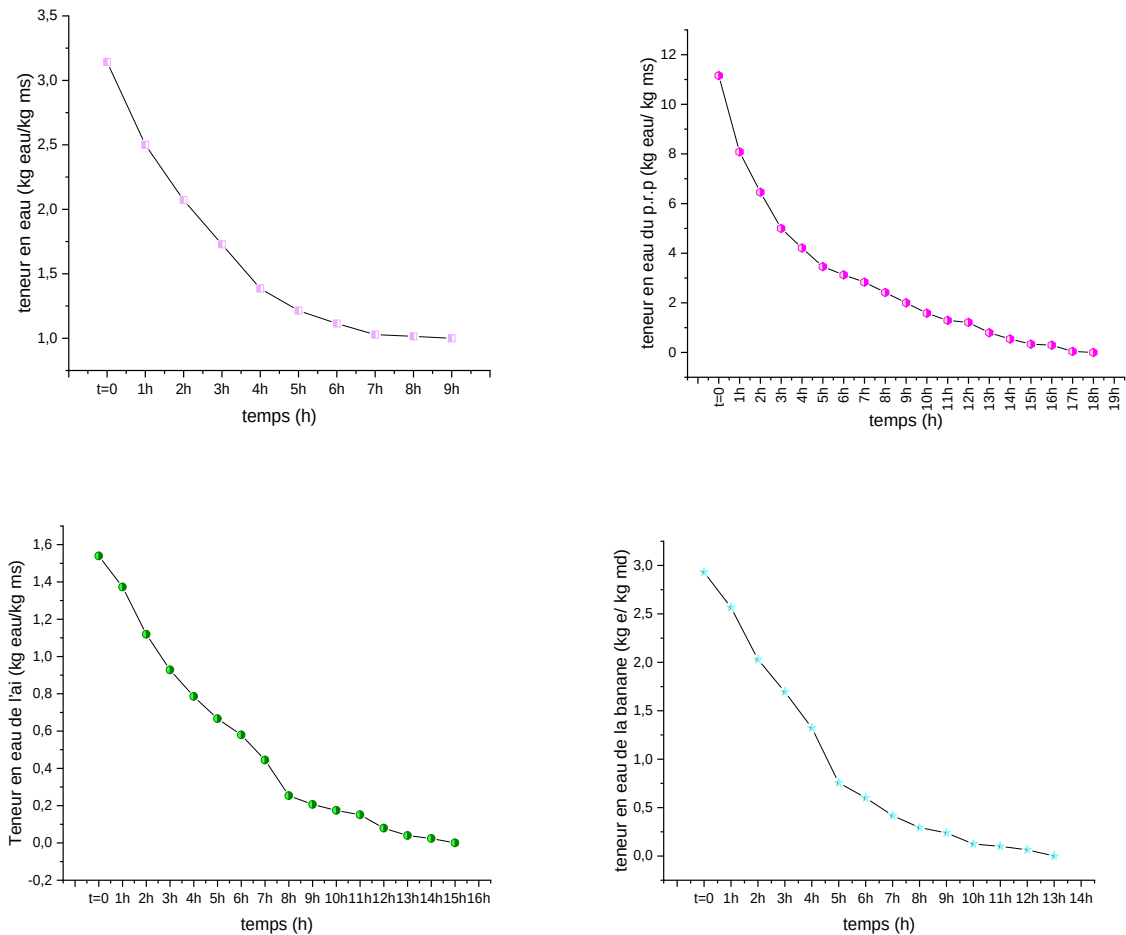
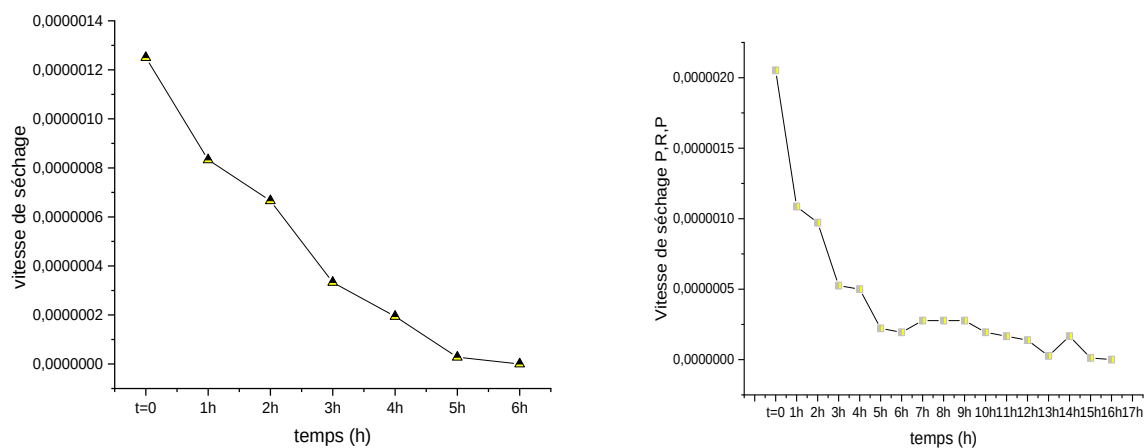


Figure IV-21 : Variation de la teneur en eau des quatre produits en Kg_{eau}/Kg_{ms}.

Variation de la vitesse de séchage



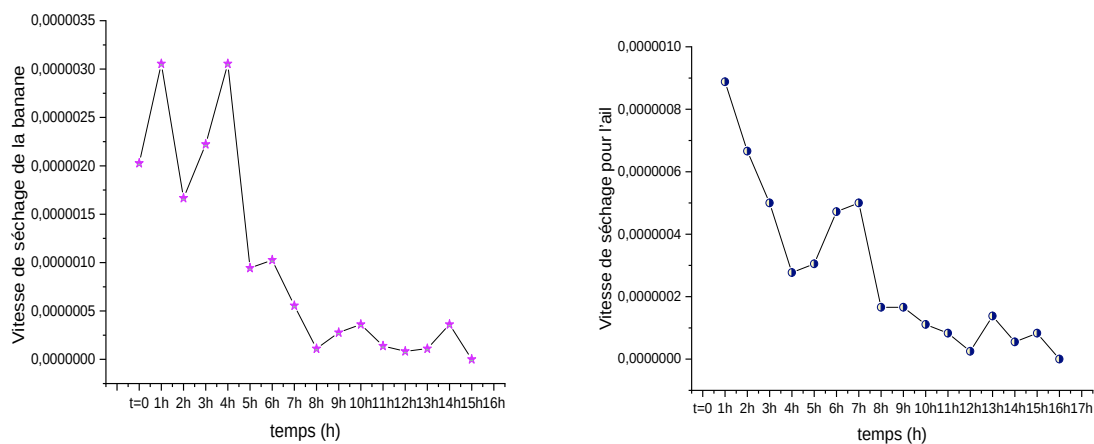


Figure IV-22 : Variation de la vitesse de séchage des quatre produits.

IV.2. Interprétation et discussion des résultats obtenus

IV.2.1. Au niveau dispositif

Dans le tableau suivant nous avons résumé les différentes températures entre l'air ambiant (extérieur) et le capteur ainsi que la chambre de séchage.

	$T_{\text{amb}} (\text{moy}) (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_1 (\text{moy}) (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_2 (\text{moy}) (^{\circ}\text{C})$
Journée 09/10/2019	25.13	46.27	22.52
Journée 10/10/2019	26.23	48.47	25.11
Journée 14/10/2019	30.53	48.77	20.77
Journée 15/10/2019	23.6	47.0	17.26
Journée 16/10/2019	22.9	45.3	27.9
Journée 17/10/2019	24.4	46.5	27.34

D'où :

- o $T_{\text{amb}} (\text{moy})$: est la température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
- o $\Delta T_1 (\text{moy})$: la différence de température ambiante et le capteur solaire ($^{\circ}\text{C}$)
- o $\Delta T_2 (\text{moy})$: la différence de température ambiante et la chambre de séchage ($^{\circ}\text{C}$).

D'après les mesures obtenues, on constate que :

Les différentes températures augmentent selon le rayonnement solaire capté jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales les alentours de 14h.

On constate aussi que la température du capteur est pratiquement trois fois plus supérieure à celle de l'air ambiant.

$$T_{\text{cap}} = 3.T_{\text{amb}} \quad (^\circ\text{C})$$

Quant à la température à l'intérieur de la chambre de séchage, on remarque qu'elle est deux fois plus élevée que la température de l'air extérieur.

$$T_{\text{chamb}} = 2.T_{\text{amb}} \quad (^\circ\text{C})$$

La température de l'air ambiant qui en est donc un des facteurs influant et ce proportionnellement sur la température de la chambre de séchage ainsi que celle du capteur.

Sur la surface supérieure de la chambre de séchage nous avons placé un extracteur d'air afin d'évacuer l'air de l'enceinte et qui sert aussi à stabiliser la température et la garder dans l'intervalle souhaité [45°C-60°C] et cela en variant la vitesse du ventilateur qui elle-même fait varier le débit de manière corrélative.

IV.2.2. Au niveau des produits agricoles

Dans cette partie nous allons interpréter et discuter chacune des courbes et suivre l'évolution des paramètres qui interviennent lors de l'opération de séchage, dont :

- La masse.
- La teneur en eau.
- La vitesse de séchage.

Les figures précédentes représentent les évolutions des pertes de masse, la variation de la teneur en eau et de la vitesse de séchage des produits, tels que le piment rouge (doux et piquant), l'ail et la banane.

On remarque que la masse diminue en exponentiel décroissant au cours du temps ceci est probablement dû à la perte de l'eau libre contenue dans chacun des produits ; 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.

NB :

-L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau.

-La capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté.

-La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout au début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

On observe aussi au niveau des courbes, quelques points sortants de l'allure (c'est-à-dire des erreurs ou écart type) et cela est dû à l'hygroscopicité des produits.

Dans le cas du séchage par étuve nous avons obtenu un produit totalement sec et brulé qui perd sa valeur nutritionnelle et son aspect sensoriel ceci se comprend par le rayonnement (résistance chauffante) qui cause la brûlure de la surface extérieure du produit [c'est-à-dire n'est pas bien réparti], le flux par rayonnement a pour but d'extraire l'eau entière sur toute la surface du produit.

L'allure de séchage

Selon les produits, d'importantes variations peuvent exister dans les durées respectives des trois phases de séchage. Dans notre cas les produits sont des particules et lamelles (petite masse), la première phase est quasiment inexistante. La deuxième phase n'existe toujours pas. Enfin la troisième et dernière phase peut être divisée en plusieurs périodes.

Les évolutions en cours de séchage des paramètres tels que la masse d'eau dans le produit, sa température ou la vitesse de séchage sont propres à chaque produit. Elles sont déterminées expérimentalement en laboratoire en séchage continu et sont représentées sous forme de courbes appelées « allures de séchage ».

L'influence de la taille et de la disposition du produit lors des trois phases

En règle générale, quelle que soit la phase de séchage on a intérêt à augmenter la surface d'échange air/produit (petits morceaux, étalement sans que les morceaux se touchent, couches minces ...etc).

- Une telle mesure permet de diminuer la durée de la première phase : plus les morceaux sont petits et en couche mince, plus le produit atteindra rapidement la température à partir de laquelle le séchage est efficace (moindre inertie thermique)

- En deuxième phase, correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l' a_w dans le produit en surface reste proche de 1 et le séchage est contrôlé par les transferts externes.
- En troisième phase l'élimination de l'eau en profondeur dans le produit sera d'autant plus facile que le front d'évaporation reste proche de la surface (donc les morceaux sont de taille réduite).

Conclusion

Ce chapitre, nous permis d'étudier les effets de quelques paramètres sur le séchage et préciser les plus influents. Il est essentiel de montrer que les résultats obtenus sont représentés par les différentes courbes selon le modèle étudié, sont en parfaite concordance avec les lois du transfert de chaleur et de masse.

L'augmentation de la température de l'air asséchant, qui est le paramètre le plus influent, conduit à la réduction du taux d'humidité au sein du séchoir et par conséquent, la réduction de la durée de séchage. Ainsi, l'augmentation de la taille du produit ou de la masse conduit à l'augmentation du temps de séchage d'une part et à l'abaissement de la température de l'air d'autre part.

Le passage de l'air asséchant par plusieurs claies dans le séchoir conduit à une élévation de la teneur en eau du produit dans ces claies. L'eau dégagée sous forme de vapeur d'eau est récupérée par l'air. Pour cela, il est indispensable de bien choisir les paramètres, pour avoir un séchage court et efficace avec la moindre énergie possible.

Pour la surface de captation, l'augmentation de ce facteur permet d'augmenter la puissance solaire captée. Ceci conduit à l'élévation de la température de l'air au sein du capteur permettant d'avoir un temps de séchage court. Ainsi, la température de l'air asséchant, son débit, la masse du produit et le rayonnement solaire sont des facteurs importants pour faire augmenter le rendement du séchoir.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressées à la technologie solaire thermodynamique, basé sur le séchage ; qui est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires et les plantes médicinales. Cette technologie qui ne cesse d'évoluer, permet de mieux préserver les bienfaits nutritionnels et l'aspect sensoriel des produits séchés.

Dans ce même contexte nous sommes parvenues à confectionner un dispositif qui est à la fois économique et écologique. Après une étude bibliographique où l'intérêt de l'énergie solaire est apparu un chapitre théorique a suivi rassemblant les notions de la thermique en particulier concernant le séchage. Enfin, la partie expérimentale reflétant la procédure suivie puis notation de toute remarque lors du procédé et la discuter.

La conception visée est dans le but de réaliser des expériences pour application réelles et obtention des résultats concrets.

Pour illustrer notre étude, nous avons choisi un ensemble constitué d'un capteur solaire plan à air, du type convection forcée couplé à une unité de séchage contenant des produits agroalimentaires disposés sur des claies perforées. Ce mode de transfert permet un meilleur contrôle du séchage.

Le couplage du capteur et du séchoir permet de conclure que l'augmentation de la surface de captation du rayonnement conduit à l'élévation de la température de l'air chaud ce qui entraîne un meilleur temps de séchage.

L'expérience est basée sur le séchage de quatre produits agro-alimentaires ; le piment rouge doux, le piment rouge piquant, l'ail et la banane, dont l'objectif est de suivre durant la journée au cours du déroulement du processus, les courbes de la variation de la masse de la vitesse de séchage, la température et la variation de la teneur en eau pour chacun de ces produits.

On établit ces courbes en fonction des paramètres suivants :

- ✓ La forme de découpage du produit.
- ✓ La variation de la masse initiale du produit.
- ✓ La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de l'air asséchant dans la chambre de séchage.
- ✓ Des débits d'air chaud différents.

L'analyse de la variation de ces paramètres a montré une influence sur la température, la teneur en eau et la vitesse de séchage du produit de tel sort que :

- La forme de découpage du produit : l'épaisseur mince permet de faciliter le transfert de chaleur, ce qui donne la possibilité au produit d'absorber rapidement une quantité de chaleur importante, ce qui se traduit par une augmentation de sa température qui favorise

Conclusion générale

l'évaporation de l'eau contenue sous forme d'humidité, d'autre part, le phénomène de diffusion d'eau liée par suite d'un transfert de chaleur et de masse qui se manifeste par une vitesse de séchage rapide et atteindre par conséquent une faible teneur en eau dans une durée très courte.

- La variation de la masse initiale : le but de séchage est l'utilisation de l'énergie sous forme de chaleur pour éliminer l'eau contenue dans le produit, suivant la quantité d'eau on peut estimer la quantité de chaleur nécessaire et suffisante. Pour cela, on a pu démontrer que la masse initiale influe sur la température du produit, que si on maintient les mêmes conditions de fonctionnement du séchoir, pour une même quantité d'énergie qui provoque un faible transfert de chaleur et un faible transfert de masse engendre une diminution de la vitesse de séchage.

- La variation de la disposition du produit par rapport à l'entrée de la chambre de séchage : lorsque le produit est très loin de l'entrée de la chambre, l'air chaud va perdre une quantité de chaleur qui va être absorbée par les composants qui se trouvent à l'intérieur de la chambre, autrement, lorsque le produit à sécher est disposé loin de la bouche de soufflage de l'air chaud, la température de produit va diminuer par la suite d'un faible transfert de chaleur qui provoque en occurrence un faible transfert de masse et qui se traduit par conséquent par une faible vitesse de séchage.

- L'utilisation des débits d'air chaud différents : pour assurer le changement de ce paramètre par le moyen d'un variateur de vitesse et en vue de modifier le transfert de chaleur qui permet d'abaisser ou d'augmenter la température de l'air chaud afin de provoquer un changement du transfert de masse, et une variation de l'humidité de l'air asséchant. Cependant, dans les capteurs solaire plans à air, lorsqu'on augmente le débit d'air à un certain niveau, la température de l'air à la sortie du capteur qui se trouve liée à l'entrée de la chambre de séchage, va diminuer et qui se traduit par une faible énergie véhiculée par le fluide caloporteur, qui nous donne un faible transfert de chaleur et de masse et par la suite une faible vitesse de séchage.

Cette étude nous ramène à conclure que, le contrôle des paramètres étudiés nous donne une augmentation dans la vitesse de séchage et par conséquent la possibilité l'améliorer les performances de ces procédés. Si on prend en considération les paramètres précédents, on peut améliorer notre dispositif de séchage solaire indirect. Nous suggérons aussi, de prévoir un appareillage bien dimensionné en fonction d'un ensemble de produits à sécher, notamment les produits en surproduction qui demandant ce type de traitement. L'orientation moderne de la consommation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales se dirige vers les produits quasi-biologiques dans notre pays on commencer à développer ces techniques modernes économiques. En vue de conserver leur cycle naturel de production, et en vue de leur impact économique et médicinal, nous suggérons une industrialisation des procédures de séchage solaire qui va permettre un développement de l'exportation, ainsi que l'économie national.

Bibliographie

- [1] DAGUENET Michel. (1985) Séchoirs solaires : Théorie et pratique, UNESCO, France.
- [2] Alfa Oumar Dissa. (2007) Séchage convectif et solaire de la mangue (*Magifera indica.L*).
- [3] Christian Moyne. (1987) Transferts couples chaleur-masse lors du séchage: prise en compte du mouvement de la phase gazeuse.
- [4] SEBAGH khadidja et CHERFAOUI Imane. (2017) Etude du séchage des produits agricoles dans un séchoir solaire-cas de poivron rouge, USTHB.
- [5] Boumediene TOUATI. (2008) Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de la menthe verte université Tlemcen.
- [6] BENAMMAR Roumaïssa et GOURI Kaouther. (2018) Séchage solaire des produits agricoles université Ouargla.
- [7] HOUHOU Hatem (2007) : Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires, université Biskra.
- [8] AIT SAI Sifax et NOUFEL Said. (2017) Etude et réalisation d'un capteur solaire à air écologique, UMMTO.
- [9] AUMPRON Orawan (2017) : Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase, Thèse, université Perpignan.
- [10] BOUSSALIA Amar (2010) : Contribution à l'étude du séchage solaire de produits agricoles locaux, mémoire, université Constantine.
- [11] GUY isabel. (2012) Les capteurs solaires à air ; réaliser-installer-gérer, groupe EYROLLES, article.
- [12] Miloud Lahbari¹, Hocine Benmoussa¹, Mohamed Bait¹ , Rabie Belhani¹ et Djamel Fahloul (LESEI Université Hadj Lakhdar Batna)⁵ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage Ouargla (Algérie), du 22 au 24 Novembre, 2015. Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect.
- [23] BENKHELIFA.A (1998) Optimisation d'un capteur solaire plan. Revue. Energie renouvelable. Physique Energétique.

[24] Njomo, D (1998), Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à ouverture combinée plastique-vitre. Revue Générale de thermique.

Sites internet

[13] <https://www.memoireonline.com/08/09/2606/Etude-comparative-de-deux-methodes-de-sechage-solaire-etuve-dans-la-transformation-de-deux-variet.html>

[14] https://www.memoireonline.com/12/09/3000/m_Conception-et-realisation-dun-sechoir-a-condensation-pour-fruits-et-legumes1.html

[15] https://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage_introduction.html

[16] <https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Le%20s%C3%A9chage%20des%20plantes%20m%C3%A9dicinales%20%C3%A0%20la%20ferme-document%20FPMQ.pdf>

[17] <http://www.nzdl.org/gsdmod?e=d-00000-00---off-0fnl2%2e2--00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4---0-0-11-10-0utfZz-8-00&a=d&c=fnl2.2&cl=CL3.23&d=HASHae607a089dfcb6a46a3167.8.2>

[18] <http://www.webreview.dz/spip.php?article467>

[19] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/SOLAIRE/SM5/SM5c.html>

[20] <https://ma-solution-chauffage.viessmann.fr/blog-expert/choisir-chauffage/transformation-energie-solaire>

[21] http://geniealimentaire.com/spip.php?article149&fbclid=IwAR1YtdI8RG7I_ALr2fQBOUzE6HZkKB-8kf-VO1rFg9eICp8Hx7bUuu_d73M

[22] <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/solaires-directes.html>