

UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA

Faculté des Sciences et Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine Sciences et Techniques

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté Par : BENALIA Elmechri

Thème

**Exploitation de la source thermique
de l'eau Albien dans le séchage solaire
des produits agro-alimentaires**

Soutenu le 07/06/2014

Devant le jury composé de :

Mr	S.CHOUICHA	M.A.A	President
Mr	M.LATI	M.A.B	Examineur
Mr	D. MENNOUCHE	M.A.A	Rapporteur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2013/2014

REMERCIEMENT

Je remercie Dieu, mon créateur d'avoir donné la force pour accomplir ce mémoire

Tous mes remerciements à mon encadreur monsieur Mennouche Djamel de sa collaboration et de sa patience avec moi.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Houti Ahmed et Haj Yakobe pour leur disponibilité dans le laboratoire

Je veux remercier tous les orienteurs, tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont fait part de leur aide et ont participé de près ou loin à la réalisation de ce travail surtout

J'exprime mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger mon travail

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À mes parents, Belkhaire et Souada, qu'ils trouvent ici

A Mes frères et mes soeurs

A ma grande famille, du grand au petit surtout, les petits :

Fers, Sami, Nardjisse ,Isra ,Ikrame et farouk

*À tous mes amis surtout : Djamel , Mouhamed, Hamza, Lazher, Tarek,
Slimane, surtout Mon ami d'enfance et d'université **ABD ELKADER***

*À tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université

A toute la promotion 2014

EL-MECHRI

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	01
I.NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE	03
I.1.Définition:	03
I.2.Caractéristiques de l'air de séchage	03
I.3.Caractéristiques des solides humides:	04
I.4. Hygroscopicité	05
I.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz	06
I.6.Le rayonnement solaire	07
I.7. Cinétiques du Séchage	07
I.8.Teneur en eau:	09
I.9. Caractéristique d'un solide poreux	09
I.10. Transfert de chaleur	10
I.11. transfert de masse	12
I.12. Les différents types des séchoirs	13
I.13. Généralité sur l'eau d'Albien	14
I.14. Généralité sur le produit à sécher (tomate maraichère)	15
Partie expérimentale	
II.1.Introduction	18
II.2. Description du système de séchage	18
II.3. Fonctionnement du système de séchage :	20
II.4. Protocole expérimental et méthodologie de travail	21
II.5. Appareillages des mesures	22
II.6. Résultats expérimentaux	23
II.6.1. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 0,3cm	23
II.6.2. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 0,5cm	28
II.6.3. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 01cm	31
II. 6.4. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 01cm (S.Continu)	35
II.6.5. La couleur	39
Conclusion générale	46
Références	47

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1): Isotherme d'équilibre	06
Figure(I.2) le taux d'humidité du produit X_s en fonction du temps	08
Figure(I.3): Volume de contrôle microscopique	09
Figure (I.4) : Volume de contrôle macroscopique	10
Figure(II.1): Schéma de séchoir solaire sous serre	18
Figure (II.2): Représentation de circuit du procédé	19
Figure(II.3): Variation du Rayonnement global en fonction du temps.	24
Figure (II.4): Variation de la teneur en eau en fonction du temps	24
Figure (II.5): variation de la température en fonction du temps.	26
Figure (II.6): variation de l'humidité relative en fonction du temps	27
Figure (II.7): Variation de la vitesse de centre en fonction du temps	27
Figure (II.8): Variation du Rayonnement global en fonction du temps.	28
Figure (II.9): Variation de la teneur en eau en fonction du temps	29
Figure (II.10): Variation de la température en fonction du temps.	30
Figure (II. 11): Variation de l'humidité relative en fonction du temps	31
Figure(II. 12) : Variation de la vitesse de centre en fonction du temps	31
Figure (II.13) : Variation du Rayonnement global en fonction du temps	32
Figure (II-14) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps	33
Figure (II.15) : variation de la température en fonction du temps.	34
Figure (II.16) : variation de l'humidité relative en fonction du temps	34
Figure (II-17) : Variation de la vitesse de centre en fonction du temps	35

Liste des tableaux

Tableau (I.1): Les vitamines dans les tomates matures	17
Tableau (II-1) : Les résultats des mesures de couleur L, a, b.....	43
Tableau (II-2) : La distance de couleur ΔE pour les quatre expériences.....	45

NOTATIONS

Symbols	Designations	Unites
$R=-dX / dt$	vitesse de séchage du produit	kg eau/ (kg (MS).s)
M_v	masse d'eau évaporée	Kg
M_s	masse de produit sec	Kg
M_h	masse humide du produit	Kg
M_e	masse de l'eau	Kg
H_r	humidité relative	%
H_{as}	humidité absolue de saturation	kg eau / kg (as)
H_a	humidité absolue	kg eau / kg (as)
X_s	teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg (MS)
X_h	teneur en eau du produit à base humide	kg eau / kg (Mh)
S	surface de séchage	m ²
P_s	pression de saturation	Pascal
P_v	tension de vapeur	Pascal
Ψ	degré de saturation	%
ε	porosité volumique	
λ_c	conductivité thermique du matériau	W/ (m.K)
h_c	coefficient de convection thermique	W/ (m ² .K)
ϕ	puissance transmise	W
S	surface d'échange considérée	m ²
T_1	température la plus chaud	°C
T_2	temperature la plus froide	°C
φ_r	la qualité d'énergie rayonné	W
σ	constante de Stephan-Boltzmann	J / (s m ² k ⁴)
ε_1	facteur d'émission de la surface grise	
f_{1-2}	Facteur de forme entre les corps 1 et 2	
ρ_f	masse volumique	kg/m ³
μ_f	viscosité cinématique	kg/ (m.s)
D_f	coefficient de diffusion	m ² /s
J	flux massique surfacique	Kg / (m ² .s)
C_m	fraction massique	
k_f	perméabilité intrinsèque	m ²
φ_i	flux direct incident	W
φ_a	flux absorbant	W
φ_g	flux global	W
φ_d	flux diffuse	W
ΔE	Différence de variance de couleur	

Indices

as	air sèche
abs	Absorbeur
apr	Après la claie
ava	avant la claie
e	Eau
ECS	Entrée du chauffe-eau solaire
EEC	Entrée de l'échangeur de chaleur
ech	L'échantillon
env	ambiante
chem	Cheminée
h	Humide
Init	initial
pr	produit
s	Sec
SCS	Sortie du chauffe-eau solaire
SEC	Sortie de l'échangeur de chaleur
schem	Sortie de la cheminée
X	teneur en eau

INTRODUCTION GENERALE

Les produits alimentaires sont généralement des milieux hétérogènes et rapidement périssables vu leur richesse en eau. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité des produits agroalimentaires entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés. Le séchage est l'une des plus anciennes opérations unitaires qui permet la conservation des aliments par l'élimination partielle ou totale d'eau.

Les produits séchés peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter.

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement ; l'inconvénient lié au séchage ouvert au soleil qui est un séchage insuffisant, est la décoloration par le rayonnement UV et la contamination par la poussière, par les matériaux étrangers, par les insectes et micro-organismes. L'utilisation des divers séchoirs solaires a été développée pour surmonter les problèmes du séchage ouvert du soleil.

Le séchage solaire, économe en énergie, pourrait constituer une solution pour les pays en voie de développement, qui disposent souvent d'un gisement solaire important.

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Il consiste en un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basse température.

Dans le secteur agro-alimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération de séchage. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Ces considérations ont conduit à de nombreux travaux, et ce aux différents niveaux du processus : le séchoir, le produit et le coût économique. Cependant, le manque des données expérimentales et le coût prohibitif des installations de séchage demeurent les principaux facteurs qui limitent une utilisation, à grande échelle, du séchage. Néanmoins,

la modélisation numérique des différents transferts mis en œuvre lors de l'opération de séchage peut être d'un apport considérable et bénéfique pour sa maîtrise.

Pate de tomate est l'un des fruits et légumes le plus cultivé au monde pour son utilisation dans le nombreux mets. C'est aussi un produit agricole riche en éléments nutritifs, notamment le lycopène, dont des études épidémiologiques ont montré qu'il pourrait lutter contre l'apparition de certaines maladies dégénératives telles que le cancer de la prostate. Cependant ce légume est très rapidement périssable, d'où l'utilisation de techniques de conservation pour la préservation de ses éléments nutritifs.

Pour améliorer la qualité du produit séché et aussi pour gagner le temps nous proposons un nouveau procédé de séchage solaire continu dans la nuit comme dans le jour

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale d'un nouveau procédé de séchage solaire d'un produit agro-alimentaire (pate de tomate) couplé a un système de simulation de source d'eau géothermique dont le but est d'assurer un opération continue de séchage pendant la nuit, ou pendant les journées nuageuses; ceci afin d'améliorer la qualité du produit séché et aussi de gagner le temps.

Pour étudier l'effet de certains paramètres comme : l'épaisseur de la couche de la pâte sur la qualité du produit séché et sur la durée de séchage et pour déterminer les paramètres optimaux de notre procédé, la pâte de tomate est disposée sur des claies de différentes épaisseurs dans un séchoir solaire direct couplé à un échangeur de chaleur eau/air. À la nuit l'air est chauffé par l'échangeur de chaleur grâce à de l'eau chaude, qui elle-même est chauffée par un dispositif de simulation de source de l'eau d'Albien.

La présentation de notre travail est structurée en deux parties :

Dans la première partie, nous décrivons les notions théoriques sur le séchage, la pate de tomate et aussi on présente une introduction sur les sources d'eau souterraine.

La deuxième partie de travail est consacré à la présentation du dispositif expérimental utilisé pour le séchage, les appareils de mesure ainsi que les résultats expérimentaux obtenus à partir des séries des expériences effectués au laboratoire LENREZA.

Ce dernier chapitre servira aussi d'un récapitulatif de la qualité de produit séché. On se basant sur les analyses de couleur.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion qui englobe une interprétation générale des résultats de l'étude

I. NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE SÉCHAGE

I.1. Définition:

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation [1]. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant [2,3].

I.2. Caractéristiques de l'air de séchage [4, 5,6]:

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes; O₂: 0,210

N₂: 0,781, A_r: 0,009

L'air humide peut être considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

I.2.1. Humidité absolue (humidité spécifique):

L'humidité absolue H_a (kg_v /kg_{as}) est définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec.

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} [kg_v \cdot kg_{as}^{-1}] \quad (1.1)$$

Où m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume v d'air humide.

I.2.2. Humidité relative:

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur, si $P_v < P_s(T)$. On définit alors l'humidité relative H_r de l'air comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation P_s de cette vapeur d'eau à la température T .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \quad (1.2)$$

$$0\% \leq H_r \leq 100\%$$

I.2.3. Degré de saturation:

Le degré de saturation est le rapport de l'humidité absolue de l'air à l'humidité absolue de l'air saturé à la même température.

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (1.3)$$

I.2.4. Températures caractéristiques de l'air humide :

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables.

I.2.4.1. Température du bulbe sec:

La température du bulbe sec T ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec.

I.2.4.2. La température humide T_h :

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air.

La différence $(T - T_h)$ est représentative de l'humidité relative H_r de l'air car :

- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit, si $H_r = 100\%$, pas d'évaporation possible.

- Elle augmente avec la différence $(P_s(T) - P_v)$ qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand H_r augmente.

I.2.4.3. La température de rosée T_r :

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau P_v considérée. Or P_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante .

I.2.4.4. Température de saturation adiabatique T_G :

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température T_s .

I.3. Caractéristiques des solides humides:

I.3.1. Humidité absolue

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

$$X_S = \frac{M_h - M_S}{M_S} \quad (1.4)$$

I.3.2. Humidité relative

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

$$X_h = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (1.5)$$

I.4. Hygroscopicité

Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur P_m qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

a - Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur P_m du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus fins. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur P_m du liquide est, ici encore, égale à la tension maximale du liquide pour la température où l'on se trouve.

Un solide se comportant de cette manière n'est pas hygroscopique.

b - Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur P_m du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et le solide est dit hygroscopique (charbon actif par exemple).

I.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz

Considérons un solide mouillé, d'humidité X , soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme vapeur, une certaine quantité du liquide associé au solide.

Sous pression constante, et une température déterminés, le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative H_r qui est le quotient de la pression partielle P_v de la vapeur dans le mélange à la même température par la pression de saturation P_s .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (1.6)$$

Si la tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de P_v il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque $P_v = P_m$.

- Si $P_v > P_m$ ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.
- Si $P_v < P_m$ le transfert de matière s'effectue du solide vers la phases gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.
- Lorsque $P_v = P_m$ l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière : pour une température donnée, la pression restant constante, à chaque valeur de l'humidité relative H_r de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre X_{eq} du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré (figure I-1)

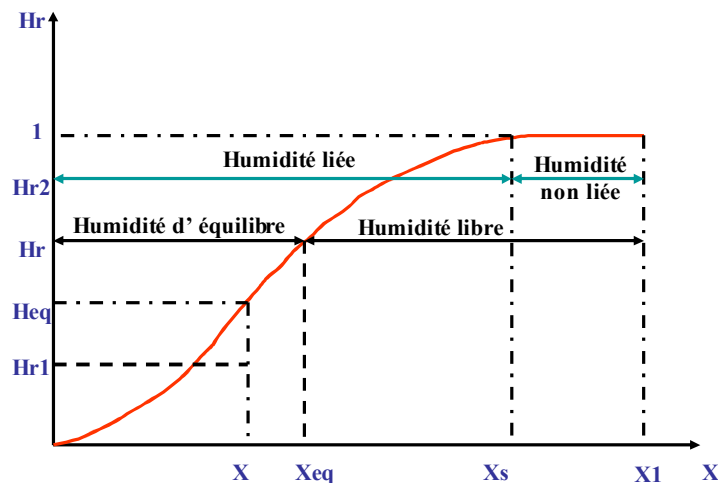


Figure I-1 : Isotherme d'équilibre

On voit sur la figure 2.1, que l'humidité X d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est H_{eq} . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

1- $H_{r1} < H_{eq}$ il y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.

2- $H_{r2} > H_{eq}$ il y'a adsorption c'est-à-dire mouillage.

Soit X_s est l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité ($H_r = 1$).

Si un solide d'humidité $X_1 > X_{eq}$ est soumis à un courant gazeux constant, d'humidité relative, il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à X_{eq} qui est l'humidité à l'équilibre du solide correspondant à H_r . Un séjour, même prolongé dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au dessous de X_{eq} . La différence $(X_1 - X_{eq})$ représente l'humidité libre qui seule peut être évaporée.

Lorsque l'humidité d'un solide est inférieure à X_s , elle exerce une pression de vapeur inférieure à celle du liquide pur à la même température ; elle est appelée humidité liée au solide, elle consiste au liquide contenu dans les capillaires fins ou en solution retenu dans les parois cellulaires du solide, ou adsorbé à la surface du solide.

Si au contraire, l'humidité du solide est supérieure à X_s , elle est appelée humidité non liée: la tension de vapeur qu'elle exerce est celle du liquide pur à la température où l'on opère. Cette humidité peut se lire sur le diagramme, elle est égale à $(X_1 - X_s)$.

I.6. Le rayonnement solaire

L'énergie du rayonnement solaire et du type électromagnétique avec des longueurs d'onde s'étalent de l'ultraviolet à l'infrarouge. Le rayonnement solaire arrivant au sol se compose du rayonnement direct et du rayonnement diffus et dont l'ensemble donne le rayonnement global [7].

I.7. Cinétiques du Séchage

Malgré la diversité des matériaux séchés, les cinétiques présentent généralement une allure qui peut être décomposée en quatre périodes :

On distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;

- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD) ;
- C: est le point critique du séchage.

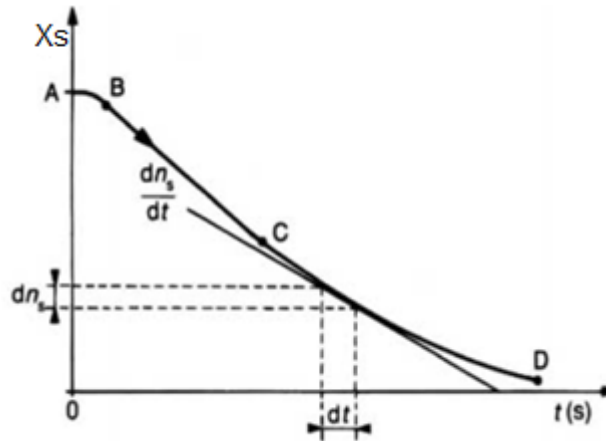


Figure I.2: le taux d'humidité du produit X_s , en fonction du temps

On note la présence unique de la phase à allure décroissante. Celle-ci est caractéristique de la majorité des produits alimentaires.

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître. La teneur en eau correspondant à la transition entre période BC et CD, est appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage [8].

Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage.

Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit [9].

I.9. Caractéristique d'un solide poreux

La caractéristique du solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo physiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté).

Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

I.9.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique ε (figure 1.3) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume du pores}}{\text{volume apparent de produit}} \quad (\text{I.9})$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \varepsilon$

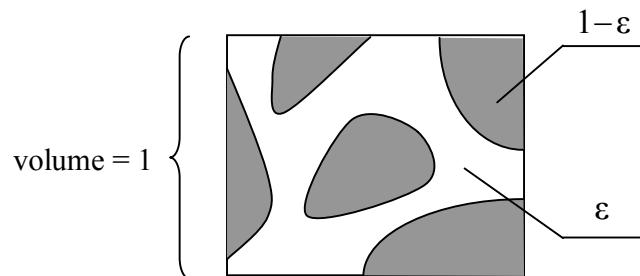


Figure I.3 : Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.4). La définition est équivalente.

$$\varepsilon = \frac{\text{volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad (\text{I-10})$$

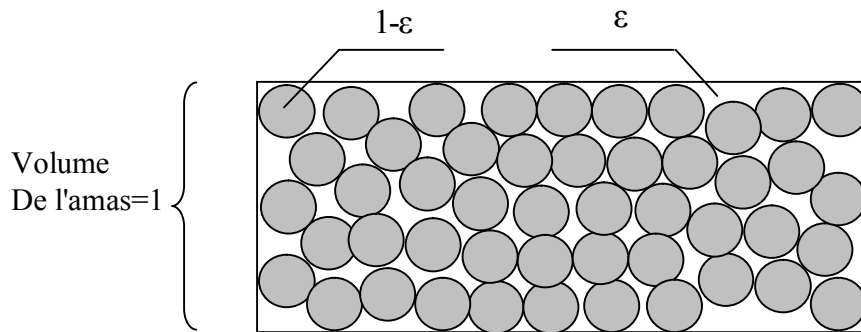


Figure I.4 : Volume de contrôle macroscopique

I.10. Transfert de chaleur :

Dans les transferts thermiques on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement.

I.10.1. Transfert par conduction :

La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement. [11]

•Loi de Fourier :

$$\phi = -\lambda_c \cdot s \frac{dT}{dX} \quad (\text{I.11})$$

ϕ : Flux de chaleur.

λ_c : Conductivité thermique.

I.10.2. Transfert par convection :

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

- Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent.
- Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Si ce mouvement n'est provoqué que par seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite libre ou naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc...), la convection est dite forcée.

Le transfert par convection est régie par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température T_1 du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température T_2 du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté h_c .

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :

$$\phi = h_c \cdot s \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

Φ : Puissance transmise en **W**.

h_c : Coefficient transmission thermique par convection, ou coefficient de convection thermique en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

S : Surface d'échange considérée en m^2 .

T_1 : température la plus chaude (paroi ou fluide en $^{\circ}\text{C}$).

T_2 : température la plus froide (paroi ou fluide en $^{\circ}\text{C}$).

I.10.3. Transfert par rayonnement :

Tous les corps émettent par leur surface de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques. Si cette énergie rayonnée rencontre un corps absorbant pour ses longueurs d'onde, elle se transforme en chaleur. La transmission de chaleur par rayonnement se produit même aux basses températures (il suffit que la température soit supérieure à 0 k) dès que deux corps à des températures différentes sont séparés par un milieu perméable. Ce transfert de chaleur qui ne nécessite aucun support matériel se produit même dans le vide.

L'énergie reçue par la surface du corps le plus froid se divise en trois parties : une fraction de l'énergie reçue est réfléchiée ; une autre fraction peut passer à travers le corps ; une troisième fraction enfin est absorbée par le corps et de ce fait élève sa température. [12]

L'énergie rayonnée par unité de temps, par une surface S_1 d'un corps noir est donnée d'après la loi de Stephan-Boltzmann (en 1884) par : [13]

$$q_r = \sigma S_1 T_1^4 \quad (\text{I.13})$$

Où :

Q_r : la quantité d'énergie rayonnée en W.

T_1 : la température du corps en K.

σ : constante de Stephan-Boltzmann : $\sigma = 5.66 \cdot 10^{-8}$ en J/s m² k⁴.

Si le corps noir est entouré d'une enceinte dont la surface est également noire, la quantité de chaleur effective transmis par rayonnement est donnée par : [14]

$$q_r = \sigma \cdot S_1 T_1^4 \quad (\text{I.14})$$

Avec : T_2 : la température superficielle de l'enceinte.

La quantité de chaleur effective transmise d'un corps gris à la température T_1 à un corps noir à T_2 entourant le 1^{er} est :

$$q_r = \sigma \cdot S_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{I.15})$$

Où :

ε_1 : facteur d'émission de la surface grise.

Si aucun des deux corps n'est noir, la quantité d'énergie rayonnée par le corps 1 vers le corps 2 est :

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon_1 f_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{I.16})$$

Où :

f_{1-2} : facteur de forme entre les corps 1 et 2

I.11. transfert de masse :

I.11.1. Loi de Fick :

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D_f le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J_c = -\rho_f D_f \left(\frac{dC}{dX} \right) \quad (\text{I.17})$$

I.11.2. Loi de Darcy :

La loi de Darcy caractérise la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, Le paramètre pertinent du milieu est dans ce cas la perméabilité intrinsèque :

$$J_s = -\rho_f \left(\frac{k_f}{\mu_f} \right) \cdot \left(\frac{dp}{dX} \right) \quad (I.18)$$

I.12. Les différents types des séchoirs

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

I.12.1. Les séchoirs naturels :

Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant .

➤ Avantage des séchoirs naturels :

- Ces séchoirs sont très bon marché
- les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
- ils sont soumis à un effet de serre au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher,

➤ Les inconvénients des séchoirs naturels :

- la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit,
- Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilités
- Leur productivité est assez faible,
- Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures et trois à quatre jours.

I.12.2. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités

➤ Avantages

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.

➤ **Inconvénients :**

- Température élevée en fin de séchage
- Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil
- Jaunissement des légumes verts
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure

I.12 .3. Les séchoirs solaires indirects:

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

➤ **Avantages**

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil.
- Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C)

➤ **Inconvénients :**

- Coût important.
- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir

I.12. Généralité sur l'eau d'Albien :

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe.[15]

La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé les eaux souterraines se réchauffent et se transforment

en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

a- **Geysers :**

Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface

sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut.

Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;

b- Fumerolles :

Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau,

s'échappent vers l'atmosphère.

Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

c- Sources thermales :

Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau

provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées. [16]

Exemple : Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique.

I.13.1 La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 60°C et 150°

C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m , dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions.

Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

I.13.2 La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 30 à 70°C. Elle est utilisée entre autre pour la

pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles.

I.14. Généralité sur le produit à sécher (tomate maraichère)

La tomate de la famille des Solanacées est d'origine sauvage américaine, en particulier d'Amérique centrale et Amérique du Sud (Mexique, Pérou, Equateur et Bolivie) [18]. La

tomate est une plante annuelle de la famille des Solanacées, dont le fruit est une baie. Cette dernière est rouge, parfois jaune ou orangée, de forme ronde ou plus ou moins allongée, lisse ou creusée de sillons. Les fruits sont de grosses baies, toujours charnues, tantôt lisses, tantôt côtelées, qui contiennent, noyées dans la pulpe une grande quantité de petites graines blanches, plates, réniformes, feutrées lorsqu'elles sont sèches [17].

Sa production à l'Algérie en 2007 est de 1 023.103 tonnes qui est l'équivalent de 00,81% de la production mondiale d'après FAO STAT 2007.

I.14.1. la tomate est un fruit ou légume ?

La tomate est à la fois un fruit et un légume. Du point de vue botanique, la tomate est un fruit car elle se forme après fécondation des parties femelles de la fleur. Mais de point de vue de l'horticulture, la tomate est considérée comme un légume. Légume étant la partie comestible d'une plante potagère.

Il existe d'ailleurs un jugement de 1893 de la cour suprême des états-unis qui classe la

I.14.2. Variétés

Il existe environ 10 000 variétés commercialisées. Les grosses tomates sont en général destinées à être farcies, celles plus allongées sont moins juteuses. Les tomates en grappe, plus petites et très parfumées se consomment plutôt crues. On trouve des variétés de tomates de différentes couleurs (jaune, orange, ...) [19].

I.14.3. Composition

La tomate est constituée de plus de 90% d'eau et contient un peu plus d'un g de fibres, surtout présentes dans la peau et les pépins [20].

a- Composition chimique standard

Le fruit frais a en moyenne la composition suivante [21] :

Eau	93,50 % ;	
Glucides	03,60 % ;	
Substances azotées	00,95 % ;	
Lipides	00,30 % ;	
Cendres	00,74 % ;	dont Ca : 2,95 à 3,95 ppm ;
		K : 18,6 à 29,5 ppm ;
		Na : 15,7 à 17,6 ppm ;
		Mg : 2,5 à 04 ppm ;
		Fe : 0,6 à 0,8 ppm ;
		P : 2,4 à 2,9 ppm ;

b- Les vitamines dans les tomates matures

Tableau 1.1: Les vitamines dans les tomates matures

vitamine A (β -carotene)	(900-1271)U.N
vitamine B ₁ (thiamine)	(50-60) μ g
vitamine B ₂ (riboflavin)	(20-50) μ g
vitamine B ₃ (panthothenic acid)	(50-750) μ g
vitamine B ₆ (complex)	(80-110) μ g
vitamine C	(15000-23000) μ g
vitamine E (alphatocopherol)	(40-1200) μ g
Biotin	(1.2-4) μ g
Nicotinic acide (niacin)	(500-700) μ g
Flotic acide	(6.4-20) μ g

U.N = 0.6 μ g de la β -carotene

I.14.4. Couleur de fruits

La couleur rouge de la tomate provient d'un pigment appelé Ly-copène (présent dans peu de fruits ou légumes). Il s'agit d'un puissant antioxydant - encore plus puissant que le bêta-carotène qui aide notre organisme à lutter contre les radicaux libres et qui contribue ainsi à la prévention des maladies cardio-vasculaires et des cancers. Le Ly-copène a besoin de graisse pour être parfaitement efficace (= vitamine liposoluble) ; c'est pourquoi il est conseillé de consommer les tomates crues avec un filet d'huile d'olive ou cuisinées avec un peu d'huile.

La concentration de Ly-copène sa diminue à variétés de tomate roses et les variétés de fruits Crimson elle contentement un taux élevée de Ly-copène

Les variétés qui possèdent des fruits jaune et orange ne représentent pas pigments de Ly-copène

La concentration β -carotène dans les variétés orange égale à peu près 10 fois la concentration normale dans la variété jaune .

Partie expérimentale

II. 1. Introduction

Cette partie présente les résultats expérimentaux de notre étude sur le séchage solaire d'un produit agro-alimentaire (pâte de tomate) en utilisant un séchoir solaire direct à convection naturelle. Ce séchoir a été installé au niveau du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) à l'université de Ouargla.

Toutes les expériences de cette partie expérimentale ont été réalisées dans la période entre le 20 Avril et la 10 Mai 2014.

On a étudié l'effet de changement des deux paramètres clés qui sont l'épaisseur et la surface de claie sur la qualité de produit séché et la durée de séchage afin de savoir quand il sera nécessaire d'effectuer un séchage continu.

II.2. Description du système de séchage

Notre système du séchage est constitué de deux parties principales: un séchoir solaire et un système d'eau chaude couplé à ce dernier par le moyen d'un échangeur de chaleur Eau/Air :

II.2.1. Description du séchoir solaire :

Le dispositif utilisé est schématisé sur la figure(II.1), c'est un séchoir solaire direct à convection naturelle qui se compose de deux parties ; La chambre de séchage et la cheminée :

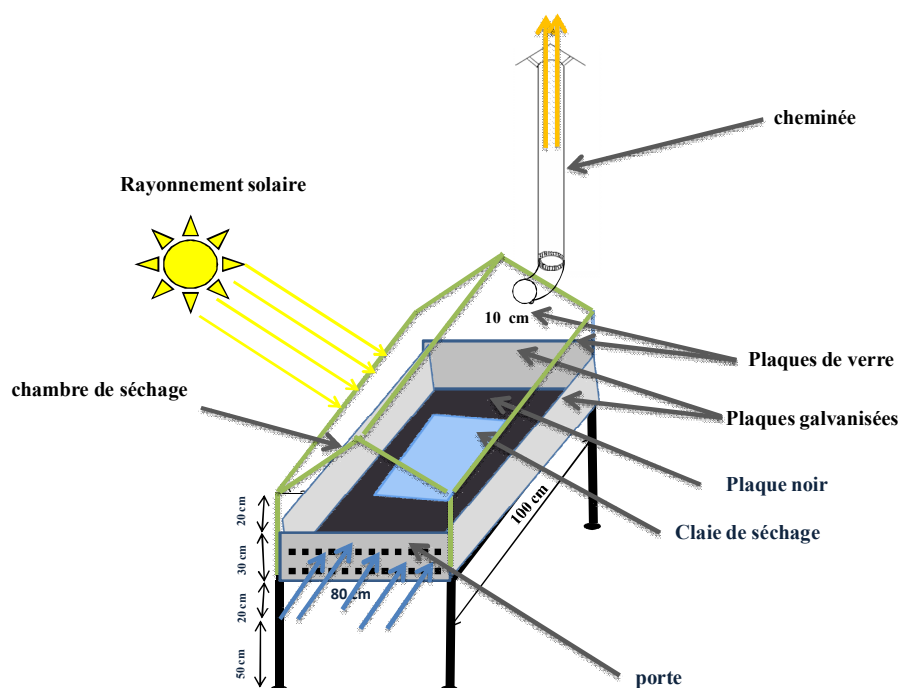


Figure (II.1) : Schéma de séchoir solaire sous serre

a- La chambre de séchage :

Elle est constituée de six plaques de verre (épaisseur = 4 mm), deux sont inclinés d'un angle de $31,57^\circ$, deux sont positionnées dans la partie avant et arrière du séchoir, et deux dans les parties latérales du séchoir. Les quatre dernière plaques de verre sont reposées sur des plaques en tôle galvanisés (épaisseur $e = 0,5$ mm) et qui sont isolées thermiquement avec le polystyrène. La plaque situer dans l'avant du séchoir représente la porte de la chambre, elle est perforée de deux rangées de trous dont le diamètre est de 1cm et la distance inter axiale égale à ($d = 5$ cm). La perforation est faite de sorte que les trous d'aération soient au même niveau que la claie comportant le produit.

La base de la chambre est composé de deux plaques en tôle galvanisés, séparées avec le polystyrène, l'une des plaques est peinte en noir et considéré comme absorbeur. La chambre de séchage est posée sur un support métallique.

Dans chaque expérience, la pâte de tomate est déposée à l'intérieur de cette chambre sur des claies de dimensions différentes. Ce dernier est déposé sur une balance de type Kern de précision 0,05 à l'aide de quatre tiges filetées (diamètre 10 mm).

b- La cheminée :

La cheminée du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisé de hauteur de 1 m et de diamètre de 10 cm. Cette cheminée joue le rôle d'un aspirateur de l'air circulant à l'intérieur de la chambre de séchoir solaire.

II.2.1. Description de l'installation de l'eau chaude:

Cette installation est pour but d'assurer la continuité de l'opération de séchage pendant la nuit, ou pendant nuageuses. C'est une combinaison d'un dispositif de simulation d'eau d'Albien et un échangeur de chaleur Eau/Air.

Le circuit est schématisé sur la figure(II.2)

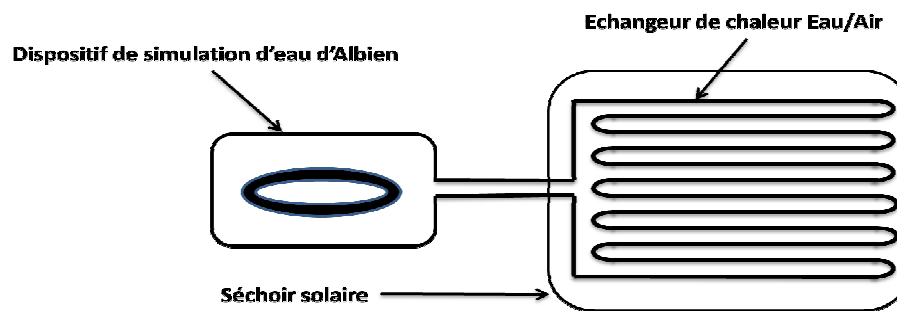


Figure (II-2) : Représentation du circuit du procédé.

a- Le dispositif de simulation de l'eau d'Albien:

Il s'agit d'un appareil constitué de :

- Un bac de capacité de 10 l.
- Une résistance qui sert à chauffer l'eau contenue dans le bac.
- Un thermostat pour maintenir la température de l'eau fixé à 60°C.
- Une pompe intégrée qui donne un débit de 3,5 l/min.

b- L'échangeur de chaleur :

C'est le dispositif qui permet de transférer de l'énergie thermique de l'eau vers la claie par conduction et vers l'air de séchage par convection. Il s'agit d'un échangeur de chaleur tubulaire construit à partir d'un tube de cuivre de diamètre (9mm/10mm) et de longueur totale de 18m, les parois extérieures de l'échangeur sont peintes en noir et elles sont considérées comme absorbeur.

Cet échangeur est placé sur l'absorbeur dans la chambre de séchage du séchoir solaire, il est lié au dispositif de simulation d'eau d'Albien par des tuyaux thermiquement isolés.

II.3. Fonctionnement du système de séchage :

II.3.1. Pendant le jour :

Les rayons solaires frappent directement le produit. L'air frais arrivé de l'extérieur passe par les trous perforés du séchoir solaire, il traverse la surface de la plaque noire, sa température augmente sous l'effet de serre, puis il continue son chemin et lâche la surface du produit, enfin l'air de séchage chargé par la vapeur d'eau est évacué à l'extérieur à travers la cheminée

II.3.2. Pendant la nuit:

Généralement on fait circuler l'eau chaude à travers l'installation lorsque la température dans la chambre de séchage est inférieure à celle de l'eau chaude qui est stockée dans le balan.

Au cours de l'écoulement de l'eau chaude dans l'échangeur, un transfert de chaleur se produit à travers les parois de ce dernier, on distingue deux types de transfert thermique :

a- transfert par conduction : entre l'échangeur et la claie de séchage.

b-transfert par convection : entre les tubes de l'échangeur et l'air frais arrivé de l'extérieur par les trous perforés du séchoir solaire, la température de l'air augmente sous l'effet de ce contact, puis il continue son chemin et lâche la surface du produit, enfin l'air de séchage chargé par la vapeur d'eau est évacué à l'extérieur à travers la cheminée

II.4. Protocole expérimental et méthodologie de travail

La méthodologie de travail consiste :

- La préparation du produit (pâte de tomate).
- La réalisation de l'installation de l'eau chaude.
- La préparation du séchoir et l'installation des appareils de mesure.
- L'expérimentation.

Pour suivre l'opération de séchage, nous avons effectués les mesures chaque 30 minute ou chaque 01 heure.

II.4.1. La préparation du produit :

Les étapes nécessaires pour la préparation du produit sont :

- Lavage du produit pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations en utilisant de l'eau chaude.
- L'épluchage et l'enlèvement des graines pour assurer une pâte homogène facile à l'usage.
- Le broyage de la tomate à l'aide un appareil électrique (Robot).
- L'égouttage la pate de tomate pendant 10 heures à l'aide sac perméable.
- Etaler la pâte de tomate sur la claie de séchage.

II.4.2. La réalisation de l'installation de l'eau chaude:

Consiste à réaliser le circuit schématisé dans la figure (II-2), et aussi à vérifier les tuyaux et l'isolation thermique, pour éviter toutes les pertes et les fuites pendant le fonctionnement

II.4.3. La préparation du séchoir:

Afin d'assurer un bon fonctionnement de séchoir solaire, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes:

- Le nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noir du capteur solaire.
- La fermeture de toutes les fuites dans la chambre de séchage.
- L'installation de différents appareils de mesure.

- Fonctionnement du séchoir à vide pendant 15min.

II.4.4. Le protocole expérimental:

Pour suivre la perte de masse du produit au cours l'opération de séchage, nous avons effectués les mesures de poids manuellement chaque 30 minute, à l'aide d'une balance de précision 0.05g. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée (0,13 Kg eau /Kg m.s) [21].

Les mesures de :

- Les températures de l'air, de produit et de l'absorbent.
- La vitesse de l'air.
- L'humidité relative (ambient, avant, et après clai)
- Le rayonnement solaire global.

Sont effectués chaque 30 minute.

Le protocole expérimental consiste à réaliser quotidiennement le séchage de produit entre 9h et 17h. Dans le cas de séchage discontinu, si la teneur en eau à la fin de la journée est supérieur à 0.13 le produit est stocké dans un endroit sec afin d'éviter toute réhydratation. La manipulation est arrêtée lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte.

II.5. Appareillages des mesures :

II.5.1. Détermination de l'humidité initial, et la masse sèche de pate de la tomate :

La détermination de la masse sèche, du produit d'après broyage de la pate de la tomate s'effectués à l'aide d'analyseur d'humidité de type SARTORIUS MA (**Figure (II-3)**) selon les étapes suivantes :

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 105°C.
- Introduction d'une masse initiale de pate de la tomate (environ 3g) dans la chambre de l'analyseur.
- Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage.
- L'analyseur d'humidité s'arrête automatiquement quand la masse devient constante (37 minute pour cas de la pâte de tomate).

II.5.2. Mesure du rayonnement solaire :

L'étude sur le rayonnement global ne considère que les heures comprises entre 9 h et 17 h généralement. En dehors de cette plage horaire, le rayonnement est trop faible pour une utilisation énergétique.

Le rayonnement global est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre (type Mod. DS 120) **Figure (II-4)** . Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.

II.5.3. Mesures des températures :

- Les mesures des températures de produit (T_{ech}) et l'absorbeur (T_{abs}) s'effectuent à l'aide des thermocouples de type K. Les résultats sont affichées sur une température mètre (**testo 425**).
- La mesure de température au milieu ambiant (T_{env}) est mesurée avec un appareil **CA 1051**
- Les mesures des températures avant et après la claie s'effectuent à l'aide des thermocouples de type reliées à une température mètre (**testo 425**).

II.5.4. Mesure de l'humidité relative de l'air :

- La mesure de l'humidité relative de l'air ambiante et de l'air avant et après la claie s'effectue à l'aide d'un hygromètre de type **CA 1051**.

II.5.5. Mesure de la vitesse de l'air:

La mesure de la vitesse de l'air dans le séchoir est effectuée à l'aide anémomètre (type CA 1051) à fils chaud.

II.6. Résultats expérimentaux :

L'objectif de cette partie est d'étudier l'effet de la variation de l'épaisseur de la claie sur la durée de séchage et sur la qualité du produit séché.

En utilisant le logiciel ORIGINE 6.0 pour traiter tous les résultats.

II.6.1. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 0,3cm :

Dans cette expérience la masse initiale de produit au niveau de la claie est 338g.

La surface de claie de séchage utilisé est : $620cm^2$

II.6.1.1. Variation du rayonnement solaire global :

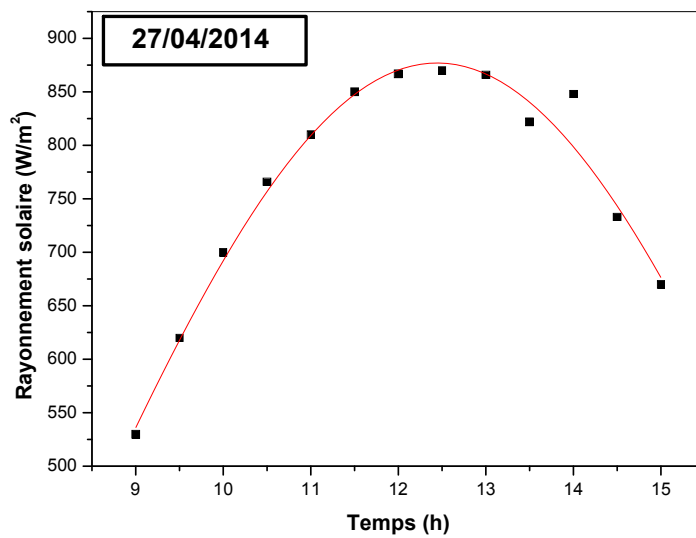


Figure II.3: Variation du Rayonnement global en fonction du temps.

La figure (II.3) permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période de séchage de pâte de tomate (6 heures). Elle présente une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ $870 (W/m^2)$ à 12h 30 min.

II.6.1.2. Etude de La teneur en eau :

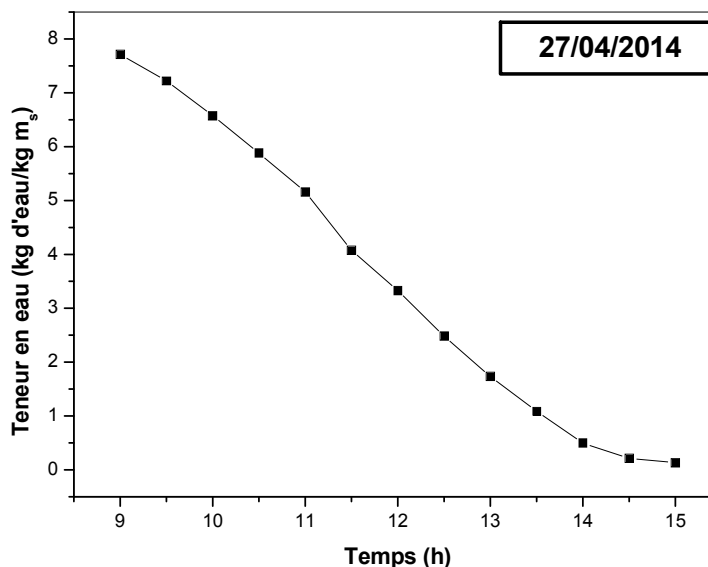


Figure (II-4) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (II-4) représente la variation de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps. On remarque sur cette figure que la durée de séchage pour avoir une teneur en eau final de 0.13Kg eau/Kg Ms est de 6 heures.

Nous pouvons voir aussi sur la figure ci-dessus que à partir de 09h jusqu'à 14h la teneur en eau présente une diminution importante (de 7.71 jusqu'à 0.49 Kg eau/kg m_s), ceci est expliquer par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0.13 Kg eau/kg m_s.

La remarque importante est que le séchage de la pâte de tomate pour cette épaisseur ne nécessite pas l'utilisation de l'installation d'eau chaude.

.II.6.1.3. Variation des températures:

La figure (II-5) présente la variation de la température (T_{chem} , T_{ech} , T_{abs} , T_{env} , T_{ava} , T_{apr}) en fonction du temps. Nous avons également observé que la température de l'air ambiante varie entre 26 et 41°C pour la période de séchage. La température de l'air augmente lorsque l'air arrive au niveau de la claie de séchage (T_{ava}), et atteint des températures comprises entre 49 et 63°C. Cette augmentation de température est dû aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température (T_{abs}) varie entre 50 et 77°C.

On observe aussi sur la figure que la température du produit varie entre 30°C et 72°C. A partir de 14h et 40 min la température du produit est plus importante que celle de la température de séchage (T_{ava} et T_{apr}), ceci est peut être expliqué par l'effet direct du rayonnement solaire sur le produit ou par le contact de thermocouple avec la surface de la claie.

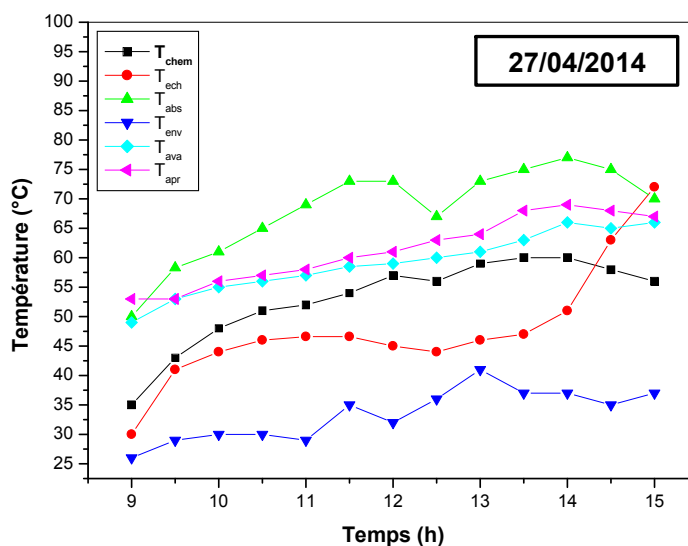


Figure II.5 : variation de la température en fonction du temps.

II.6.1.4. Variations des humidités relatives :

La figure (II-6) présente la variation d'humidité relative de l'air ambiante, avant et après la claie de séchage en fonction du temps. On voit sur cette figure que l'humidité ambiante (Hr_{env}) varie entre 12 et 29% pour la période de séchage.

L'avancement de l'air vers la claie de séchage provoque une diminution de son humidité Hr_{ava} , et atteint des valeurs minimales de l'ordre de 3.5% .

Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température sous l'effet du contact avec l'absorbeur.

L'évaporation de la vapeur d'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse créer une augmentation d'humidité Hr_{apr} par rapport à Hr_{ava} de l'ordre de 11.2% (valeur max) pendant la période de séchage.

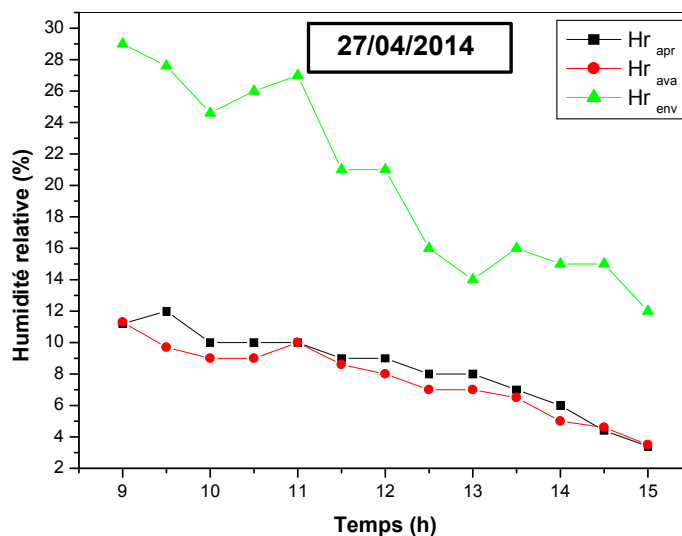


Figure II. 6 : variation de l'humidité relative en fonction du temps

II.6.1.5. Variation de vitesse de l'air à la sortie de cheminée :

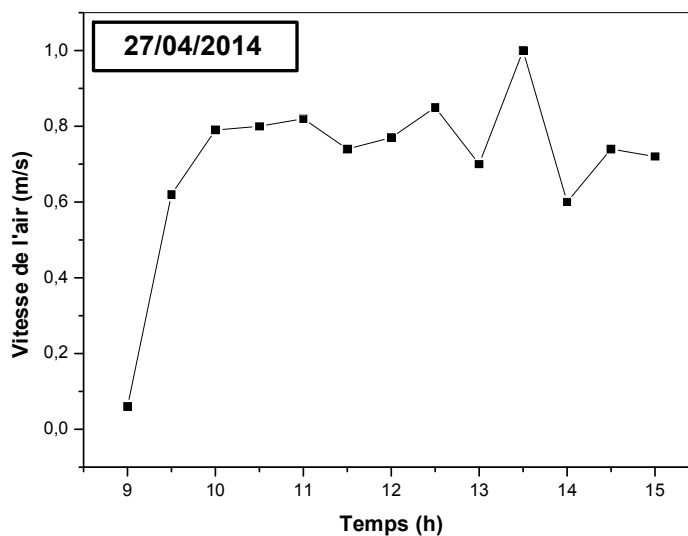


Figure (II-7) : Variation de la vitesse de l'air à la sortie de cheminée en fonction du temps

La figure (II-7) présente la variation de la vitesse de l'air de séchage à la sortie de cheminée en fonction de temps, on remarque sur cette figure que la vitesse de l'air est instable pendant l'opération de séchage et représente des fluctuations entre 0,06 et 01 m/s. car cette vitesse dépend des conditions climatiques qui sont instable en fonction de temps.

II.6.2. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 0,5cm :

Dans cette expérience la masse initiale de produit au niveau de la claie est 389,5 g.

La surface de claie de séchage utilisé est : 620cm²

II.6.2.1. Variation du rayonnement global :

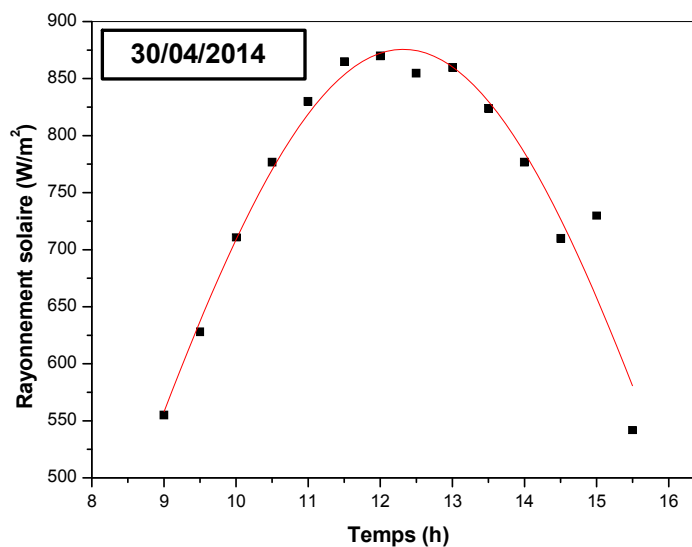


Figure II.8: Variation du Rayonnement global en fonction du temps.

La figure (II.8) permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période de séchage de pâte de la tomate (6h et 30min). Elle présente une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ 870 (W/m²) à 12:30.

II.6.2.2. Etude de La teneur en eau :

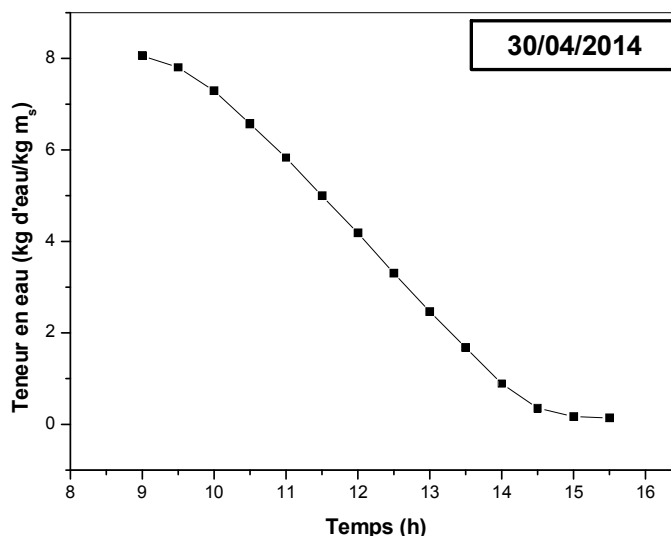


Figure (II-9) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (II-9) représente la variation de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps. On remarque sur cette figure que la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale de 0.13Kg eau/Kg Ms est de 6h et 30min.

Nous pouvons voir aussi sur la figure ci-dessus que à partir de 09h jusqu'à 14 :30 la teneur en eau présente une diminution importante (de 8,05 jusqu'à 0.35 Kg eau/kg m_s), ceci est expliquer par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0.13 Kg eau/kg m_s.

. La remarque importante est que le séchage de la pâte de tomate pour cette épaisseur ne nécessite pas l'utilisation de l'installation d'eau chaude.

II.6.2.3. Variation des températures:

La figure (II-10) présente la variation de la température (T_{chem} , T_{ech} , T_{abs} , T_{env} , T_{ava} , T_{apr}) en fonction du temps. Nous avons également observé que la température de l'air ambiante varie entre 34 et 46°C pour la période de séchage. La température de l'air augmente lorsque l'air arrive au niveau de la claie de séchage (T_{ava}), et atteint des températures comprises entre 50 et 71°C. Cette augmentation de température est dû aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température (T_{abs}) varie entre 53 et 80°C.

On observe aussi sur la figure que la température du produit varie entre 27°C et 74°C. A partir de 14h 20min la température du produit et plus important que celle de la température de séchage (T_{ava} et T_{apr}), ceci est peut être expliqué par l'effet direct du rayonnement solaire sur le produit.

On remarque généralement que toutes les valeurs sont presque constantes à des ordres élevées.

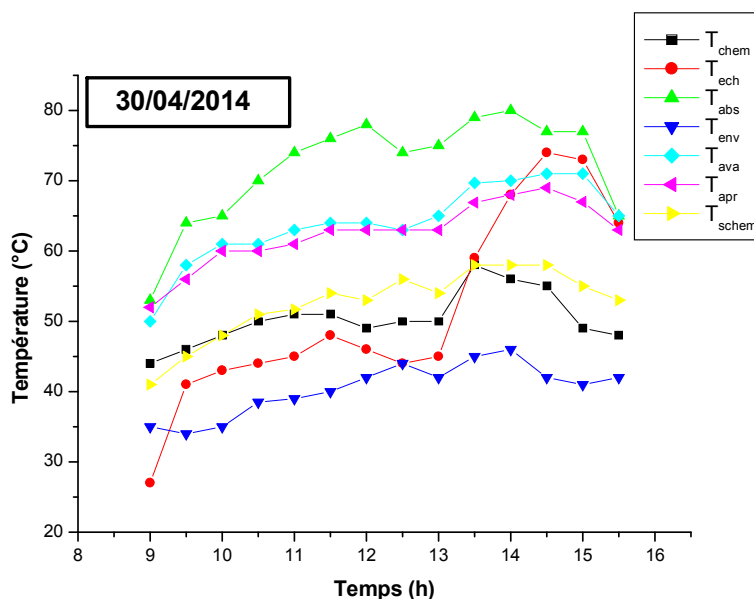


Figure II.10 : variation de la température en fonction du temps.

II.6.2.4. Variations des humidités relatives :

La figure (II-11) présente la variation d'humidité relative de l'air ambiante, avant et après la claie de séchage en fonction du temps. On voit sur cette figure que l'humidité ambiante (Hr_{env}) varie entre 5,5 et 13,3% pour la période de séchage.

L'avancement de l'air vers la claie de séchage provoque une diminution de son humidité Hr_{ava} , et atteint des valeurs minimales de l'ordre de 0,1%.

Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température sous l'effet du contact avec l'absorbeur.

L'évaporation de la vapeur d'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse créer une augmentation d'humidité Hr_{apr} par rapport à Hr_{ava} de l'ordre de 8,4% (valeur max) pendant la période de séchage.

La collecte de la vapeur d'eau résultant de l'évaporation de l'eau contenue dans le produit et celle de l'air provoque une augmentation très importante humidité à la sortie de cheminée Hr_{schem} qui atteint des valeurs maximales de l'ordre de 15,3%.

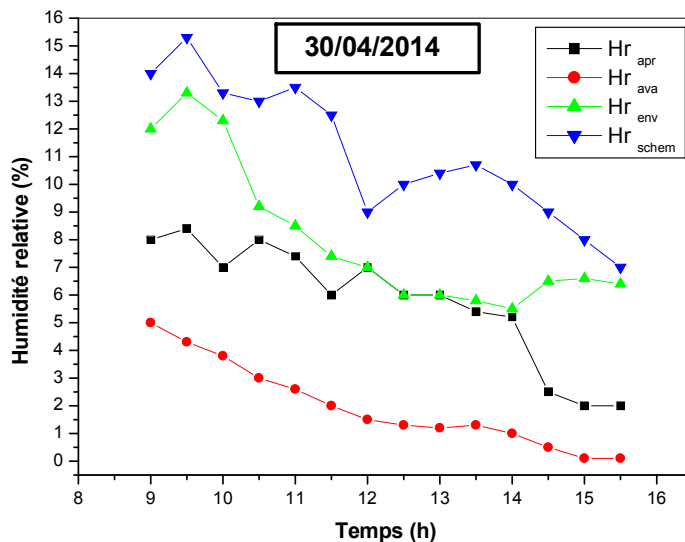


Figure II.11 : variation de l'humidité relative en fonction du temps

II.6.3. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 1cm :

Dans cette expérience la masse initiale de produit au niveau de la claie est 679g.

La surface de claie de séchage utilisé est : 620cm^2 , et la durée du séchage est 02 jours.

II.6.3.1. Variation du rayonnement global :

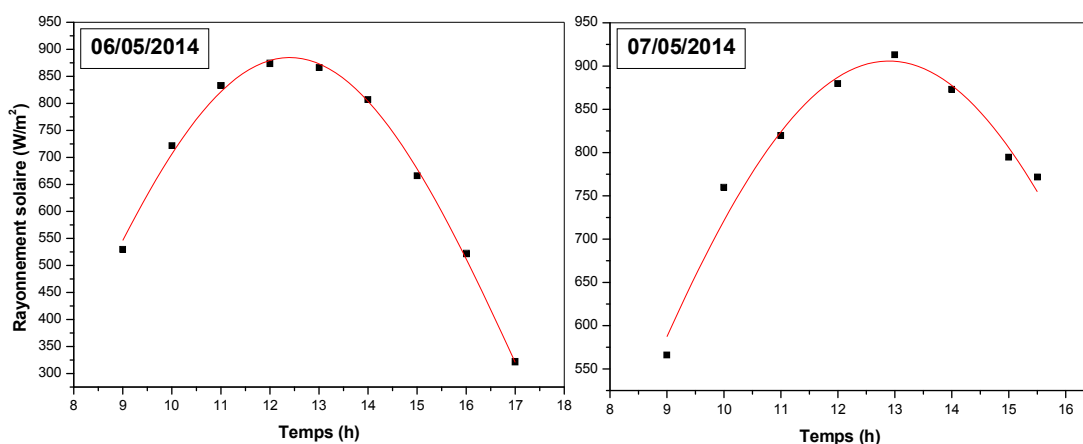


Figure II.13: Variation du Rayonnement global en fonction du temps.

La figure (II.13) permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période de séchage de pâte de tomate (14h et 30min). Elle présente une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est :

- 874 (W/m²) à 12:00, Pour la première journée.
- 913 (W/m²) à 13:00, Pour la deuxième journée.

II.6.3.2. Etude de La teneur en eau :

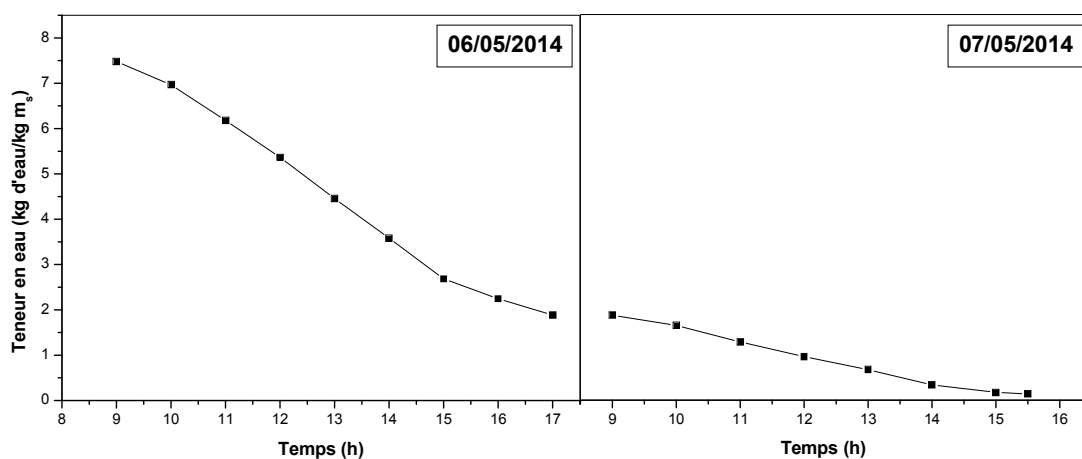


Figure (II-14) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (II-14) représente la variation de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps. On remarque sur cette figure que la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale de 0.13Kg eau/Kg Ms est de 14h et 30min (2 jours).

Nous pouvons voir aussi sur la figure ci-dessus que à partir de 09h de premier jour jusqu'à 14 :00 de deuxième jour la teneur en eau présente une diminution importante (de 7,47 jusqu'à 0,17 Kg eau/kg m_s), ceci est expliquer par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0.13 Kg eau/kg m_s.

. La remarque importante est que le séchage de la pâte de tomate pour cette épaisseur nécessite l'utilisation de l'installation d'eau chaude.

On peut clairement noter que le produit est déformé en forme et aussi dégradé en couleur à après le séchage . (Voir la figure (II-15))

II.6.3.3. Variation des températures:

La figure (II-16) présente la variation de la température (T_{chem} , T_{ech} , T_{abs} , T_{env} , T_{ava} , T_{apr} , T_{schem}) en fonction du temps. Nous avons également observé que la température de l'air ambiante varie entre 28 et 40°C pour la période de séchage. La température de l'air augmente lorsque l'air arrive au niveau de la claie de séchage (T_{ava}), et atteint des températures comprises entre 42 et 64°C. Cette augmentation de température est dû aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température (T_{abs}) varie entre 40 et 77°C.

On observe aussi sur la figure que la température du produit varie entre 19°C et 76°C. Au 2^{ème} jour, A partir de 12h la température du produit et plus important que la température de séchage (T_{ava} et T_{apr}), ceci est peut être expliqué par l'effet direct du rayonnement solaire sur le produit.

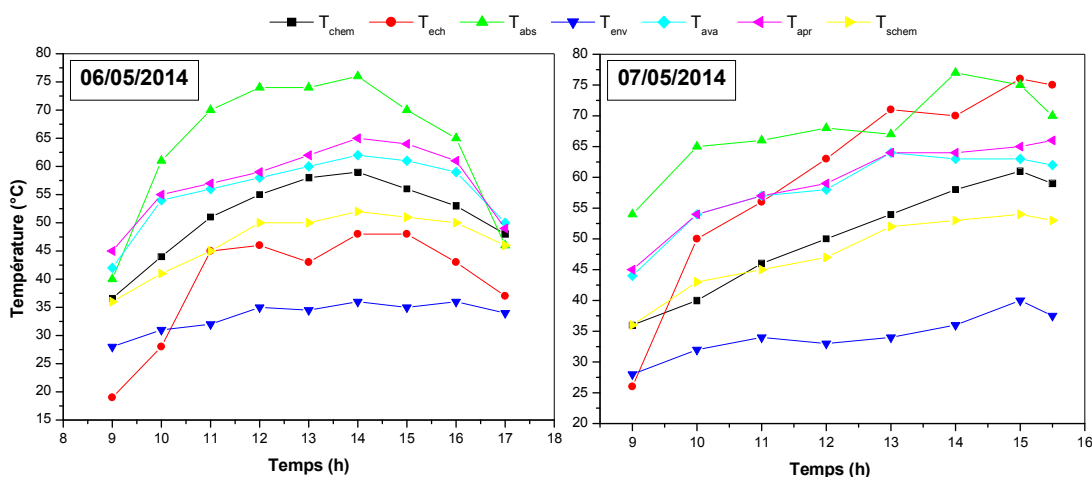


Figure II.16 : variation de la température en fonction du temps.

II.6.3.4. Variations des humidités relatives :

La figure (II-17) présente la variation d'humidité relative de l'air ambiante, avant et après la claie de séchage en fonction du temps. On voit sur cette figure que l'humidité ambiante (Hr_{env}) varie entre 8 et 13,4% pour la période de séchage.

L'avancement de l'air vers la claie de séchage provoque une diminution de son humidité Hr_{ava} , et atteint des valeurs minimales de l'ordre de 0,3%.

Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température sous l'effet du contact avec l'absorbeur.

L'évaporation de la vapeur d'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse créer une augmentation d'humidité Hr_{apr} par rapport à Hr_{ava} de l'ordre de 10% (valeur max) pendant la période de séchage.

La collecte de la vapeur d'eau résultant de l'évaporation de l'eau contenue dans le produit et celle de l'air provoque une augmentation très importante humidité à la sortie de cheminée Hr_{schem} qui atteint des valeurs maximales de l'ordre de 14%.

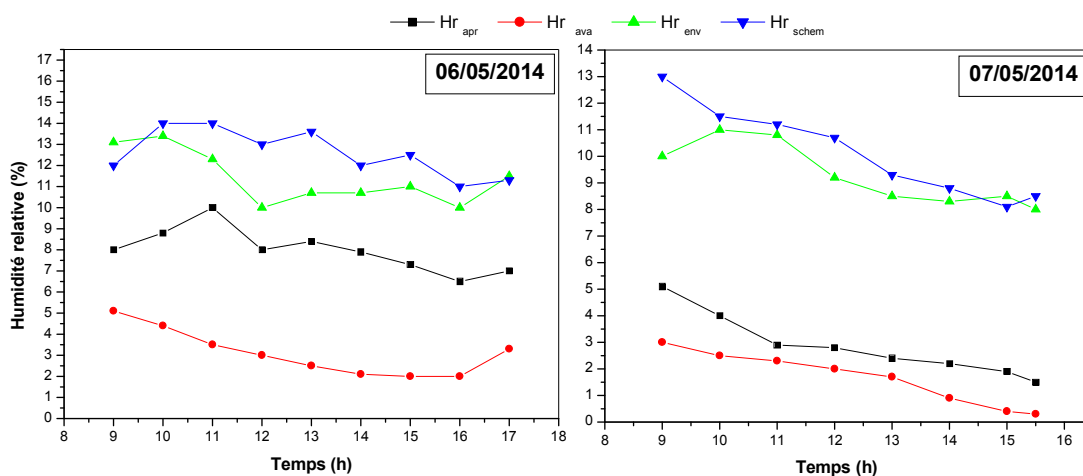


Figure II.17 : variation de l'humidité relative en fonction du temps

II.6.3.5. Variation de vitesse de l'air à la sortie de cheminée :

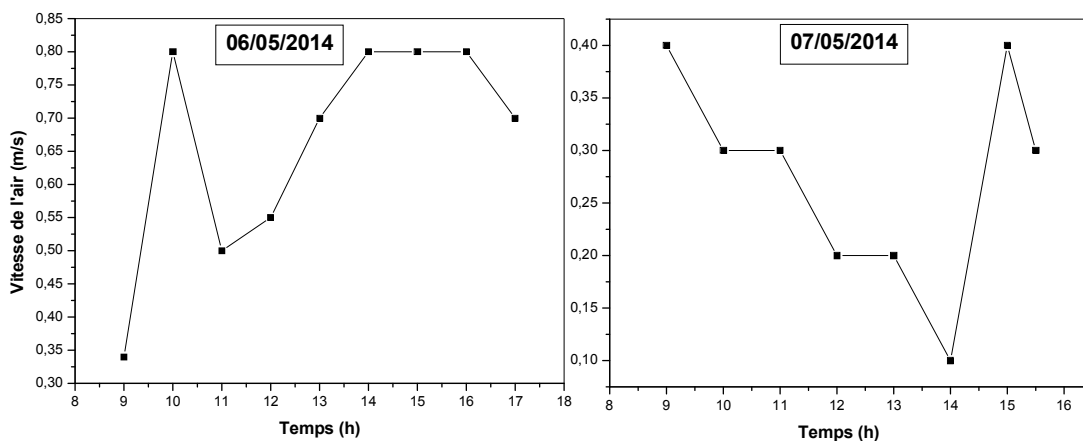


Figure (II-18) : Variation de la vitesse de l'air à la sortie de cheminée en fonction du temps

La figure (II-18) présente la variation de la vitesse de l'air de séchage à la sortie de cheminée en fonction de temps, on remarque sur cette figure que la vitesse de l'air est instable pendant l'opération de séchage et représente des fluctuations entre 0,1 et 0,8 m/s. car cette vitesse dépend des conditions climatiques qui sont instable en fonction de temps.

II.6.4. Résultats expérimentaux de la claie d'épaisseur 01cm (Séchage continu) :

Pour éviter les problèmes observés dans l'expérience précédente on utilise l'installation de l'eau chaude pour assurer la continuité de l'opération de séchage et éviter le stockage du produit.

Dans cette expérience la masse initiale de produit au niveau de la claie est 679g.

La surface de claie de séchage utilisé est : 620cm²

A partir de 18:00 et jusqu'à 7:30 du jour prochain on a utilisé la combinaison échangeur/séchoir pour le séchage (pendant cette période la température dans la chambre de séchage est inférieure à celle de l'eau chaude).

La température de l'eau chaude a été fixée constante ($T_{\text{eau}}=60$) par le thermostat du dispositif de simulation de l'eau d'Albien.

II.6.4.1. Variation du rayonnement global :

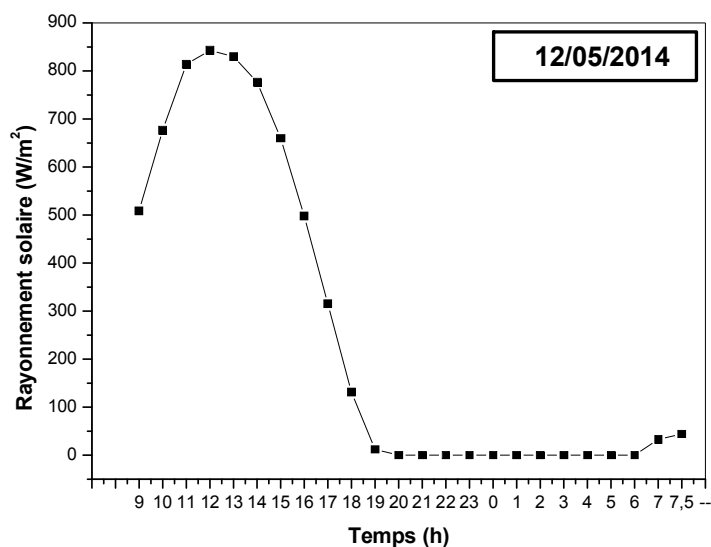


Figure II.21: Variation du Rayonnement global en fonction du temps.

La figure (II.21) permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pendant la période de séchage de pate de la tomate (22h et 30min).

Pendant la journée jusqu'à 19:30, on remarque que la courbe est une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ $843 \text{ (W/m}^2\text{)}$ à 12:00.

II.6.4.2. Etude de La teneur en eau :

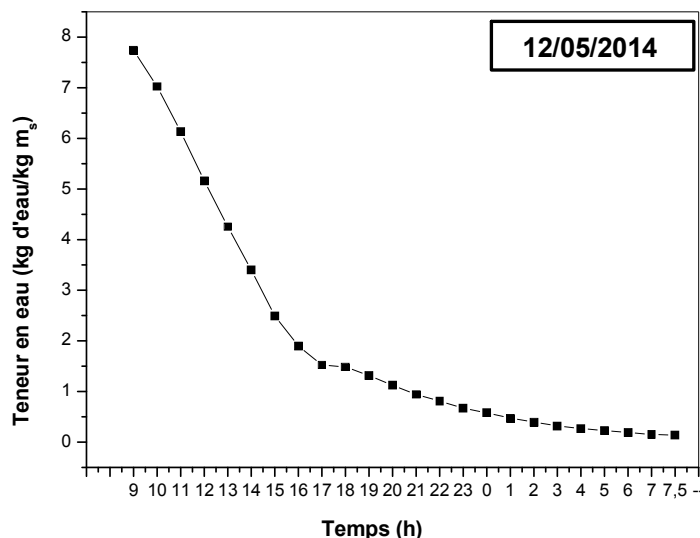


Figure (II-22) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (II-22) représente la variation de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps. On remarque sur cette figure que la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale de $0,13 \text{ Kg eau/Kg Ms}$ est de 22h et 30min.

Nous pouvons voir aussi sur la figure ci-dessus que à partir de 9h jusqu'à 4h la teneur en eau présente une diminution importante (de $7,73$ jusqu'à $0,26 \text{ Kg eau/kg m}_s$), ceci est expliquer par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de $0,13 \text{ Kg eau/kg m}_s$.

II.6.4.3. Variation des températures:

La figure (II-23) présente la variation de la température (T_{chem} , T_{ech} , T_{abs} , T_{env} , T_{ava} , T_{apr}) en fonction du temps. Nous avons également observé que la température de l'air ambiante varie entre 27 et 37°C pour la journée et entre 25 et 34°C pendant la nuit. La température de l'air augmente lorsque l'air arrive au niveau de la claie de séchage (T_{ava}), et atteint des

températures comprises entre 38 et 66°C pour le système direct et entre 37 et 44°C pendant le utilisation le système contenu . L'augmentation de température (T_{ava}) pendant la journée est due aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température (T_{abs}) varie entre 42 et 79°C. Tandis que cette augmentation de (T_{ava}) pendant la nuit est due au contact de l'air de séchage avec les parois de l'échangeur et aussi avec la surface de l'absorbeur qui et en contact direct avec l'échangeur, on observe également que la température de la surface absorbante (T_{abs}) varie entre 41 et 45°C.

On observe aussi sur la figure que la température du produit atteint des valeurs maximales de l'ordre de 53°C pour la journée ceci est expliqué par l'effet direct du rayonnement solaire sur le produit.

On remarque aussi que la température du produit varie entre 35°C et 39°C pendant la nuit, Ces valeur sont supérieur que T_{ava} , T_{apr} , T_{ech} et T_{env} ceci est du à l'effet de la contact de produit avec l'air de séchage et du aussi à l'effet de contact direct de la claie de séchage avec les parois chaudes de l'échangeur.

On remarque généralement que toutes les températures restent presque constantes à pendant nuit.

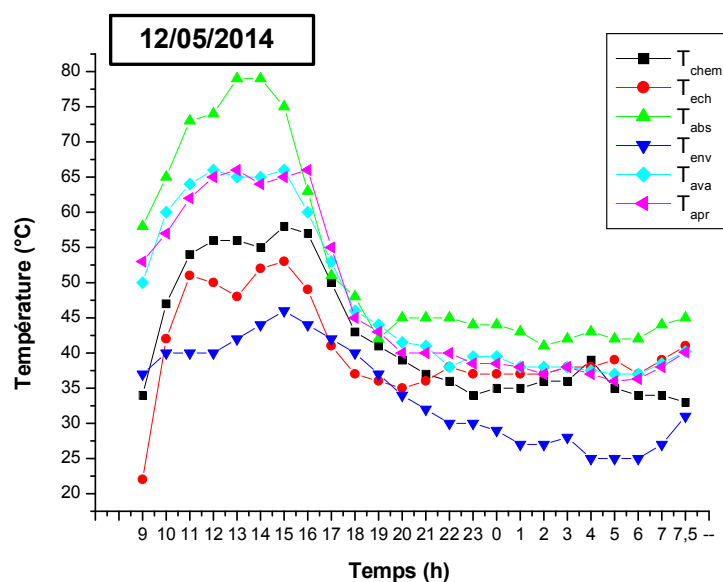


Figure II.23 : variation de la température en fonction du temps.

II.6.4.4. Variations des humidités relatives :

La figure (II-24) présente la variation d'humidité relative de l'air ambiante, avant et après la claie de séchage en fonction du temps. On voit sur cette figure que l'humidité ambiante (Hr_{env}) varie entre 6,9 et 19,5% pour la période de séchage.

L'avancement de l'air vers la claie de séchage provoque une diminution de son humidité Hr_{ava} , et atteint des valeurs minimales de l'ordre de 2,1%.

Cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température sous l'effet du contact avec l'absorbeur pendant la journée et avec l'échangeur pendant la nuit.

L'évaporation de la vapeur d'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse créer une augmentation d'humidité Hr_{apr} (par rapport à Hr_{ava}), on observe que l'humidité Hr_{apr} atteint une valeur maximale égale à 11,4% à 18:00.

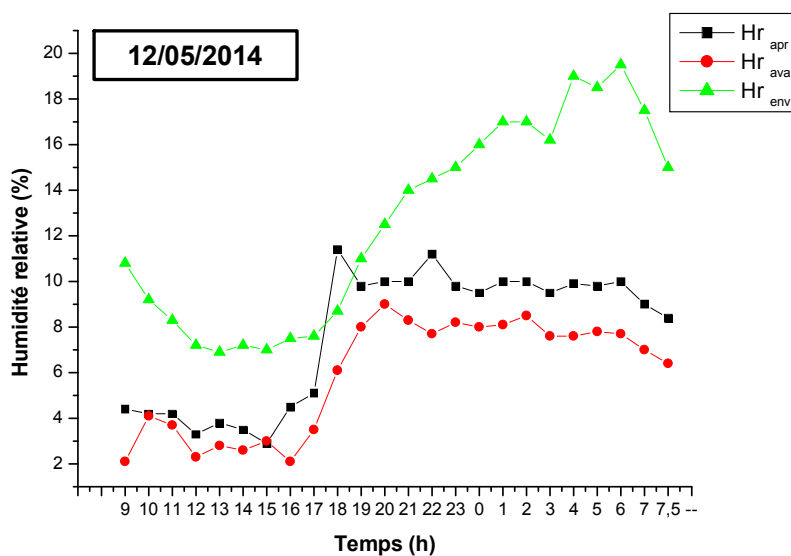


Figure II.24 : variation de l'humidité relative en fonction du temps

II.6.2.5. Variation de vitesse de l'air à la sortie de cheminée :

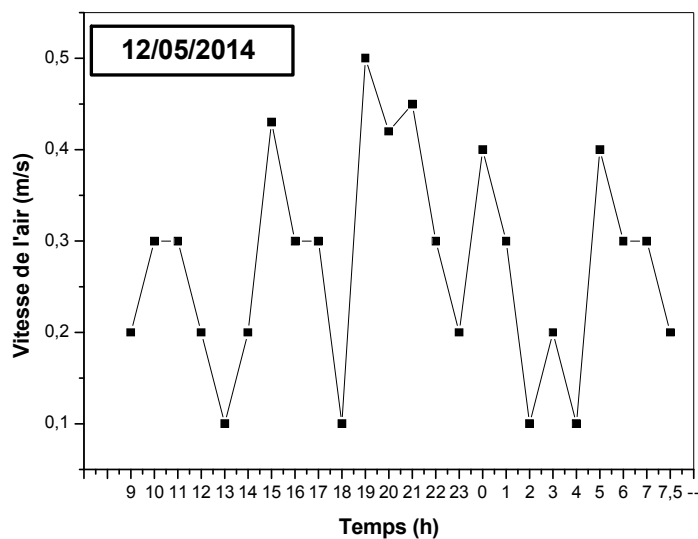


Figure (II-25) : Variation de la vitesse de l'air à la sortie de cheminée en fonction du temps

La figure (II-25) présente la variation de la vitesse de l'air de séchage à la sortie de cheminée en fonction de temps, on remarque sur cette figure que la vitesse de l'air est instable pendant l'opération de séchage et représente des fluctuations entre 0,1 et 0,43 m/s. car cette vitesse dépend des conditions climatiques qui sont instable en fonction de temps.

II.6.5. La couleur :

II.6.5.1. couleur et colorimétrie :

Chacun perçoit et interprète différemment la couleur (anomalies visuelles, situation géographique, éducation, gout). Cette sensation colorée existe parce que rayonnements lumineux vont interagir sur l'objet émettent d'autres rayonnements (réfléchis) perceptibles par l'œil puis interprétés par le cerveau.

La couleur n'a donc pas de réalité physique, c'est une interaction résultante entre la lumière qui éclaire un objet et est vue par un observateur/œil. C'est la notion de triplet.

Pour pallier à tous ces facteurs influençant la vision de la couleur. La colorimétrie a été créée : elle permet de quantifier la couleur en donnant des valeurs numériques aux trois facteurs de classement (tonalité, saturation et clarté).

Par conséquent, une couleur est représentée par trois valeurs.

a-La tonalité :

La tonalité ou nuance ou angle de teinte, représentée par la lettre h, correspond à la composante colorée de l'échantillon plus précisément au nom de la couleur (bleu, vert, rouge, violet,...).

b-La saturation :

Ce facteur représenté par la lettre C, permet d'évaluer la proportion de couleur pure présente dans la sensation visuelle c'est-à-dire d'évaluer si la teinte est saturée (vive) ou peu vive délavée-terne). On parle également chroma.

c-La clarté :

La clarté ou luminance représentée par la lettre L définit le caractère plus ou moins clair de l'objet, teinte claire ou foncée.

II.6.5.2. Espace colorimétrique :

Les premières recommandations de la CIE (commission internationale d'éclairage) concernant la colorimétrie furent publiées en 1931 : déjà 77 ans qu'on sait quantifier la couleur.

Il existe un grand nombre d'espaces colorimétriques, les plus utilisés : CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) ; CIE 1976 (L^*c^*h).

II.6.5.3. Le système CIE 1976 $L^*a^*b^*$:

Ce système connu aussi sous le nom de CIE 1976 résulte d'une transformation mathématique du système CIOE 1931. On retrouve dans cet espace la méthode de repérage tridimensionnel reprenant la théorie des trois paires antagonistes : blanc-noir, rouge-vert, jaune-bleu.

Pour distinguer ce système il a été convenu d'affecter à tout le paramètre une étoile *.

II.6.5.4. Représentation dès l'état de couleur :

a-coordonnées rectangulaires L^* , a^* , b^* :

L^* : clarté ou luminance.

a^* : composante chromatique rouge-vert.

b^* : composante chromatique jaune-bleu.

b- coordonnées rectangulaires L*, c*h*:

L* : clarté ou luminance.

c* : chroma ou saturation.

h° : angle de teinte ou tonalité.

II.6.5.5. Différence de couleur en L*a*b* :

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (II-1)$$

$$\text{Avec : } \Delta L^* = L^*(\text{écha}) - L^*(\text{Init}). \quad (II-2)$$

$$\Delta a^* = a^*(\text{écha}) - a^*(\text{Init}). \quad (II-3)$$

$$\Delta b^* = b^*(\text{écha}) - b^*(\text{Init}). \quad (II-4)$$

II.6.5.6. Représentation de l'appareillage de mesure:**II.6.5.6.1. Une sonde de mesure travaillant en autonome :**

La sonde de mesure se détache du calculateur DP400, ce qui vous permet d'affecter les mesures directement avec la sonde seule. Vous pouvez la connecter directement à votre ordinateur PC. Pour cela, il vous suffit d'installer notre logiciel optionnel sur votre ordinateur qui fonctionnera alors comme le calculateur.

II.6.5.6.2. Des formules supplémentaires d'évaluation et d'indice écrit par vos soins :

Le chromamètre de la série CR400 est doté d'une fonction (Indice utilisateur) qui vous permet de configurer des formules d'évaluation et des formules de calcul des couleurs spécifiques. Cette fonction répond aux demandes de contrôle colorimétriques pour lesquelles des formules d'évaluation par industries ou spécifiques sont utilisées à la place du système colorimétrique polyvalent et des standards telles que L*a*b*.

II.6.5.7. Fonctionnement d'appareil :

- Nous avons branché l'appareil DP400 de source d'alimentation électrique. Elle est liée au même temps d'un appareil de CR400, les deux appareils fonctionnent au niveau de la position(1) « power(1) ».
- On met l'appareil CR400 sur la plaque puis on clique sur le bouton « calibre » pour objectiver la balance de l'appareil (CR400).

- On pose l'appareil CR400 en dessus l'échantillon puis on clique sur le bouton mesure donc les rayonnements qui émissent par l'appareil CR400 frappe l'échantillon enfin les résulte données sont affiche au niveau l'appareil DP400 se forme de papier (les coordonne L, a, b).

II.6.5.8. Protocole expérimental :

- On prépare les échantillons avant et après le séchage.
- Mesureur à l'aide l'appareil de colorimètre le coordonnée (L, a, b) de la pâte de tomate initial.
- Mesureur à l'aide l'appareil de colorimètre le coordonnée (L, a, b) de la pâte de tomate séché de différente d'épaisseur (0.5cm, 2cm, 1cm) dix fois, car la surface de la pate ne pas homogène.
- Calcul la différence de variance de couleur ΔE .
- La dure d'essai est 30 minutes.

II.6.5.9. Résultats expérimentaux :

Afin d'évaluer l'effet du séchage sur l'évolution de couleur de la pâte de tomate nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de distinction entre les différents états. A cet effet nous avons utilisé les mesures faites sur l'échantillon initial avant séchage comme référence permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation (5-1) donnée ci-dessus. Les mesures de référence étant les suivants : $L_0=60,20$ * $a_0=46,62$ * $b_0=17.69$

Sur le tableau (10-3) nous avons présenté les résultats des mesures de couleur L, a, b effectuées sur des échantillons séchés à 0.13 (kg eau/kg de matière sèche) correspondants aux différents essais de séchage menés dans notre étude, à savoir relatifs à des épaisseurs de couche de la pâte de tomate telles que montrées ci-dessous :

- Epaisseur = 0.3 cm (une journée).
- Epaisseur = 0,5 cm (une journée)
- Epaisseur = 1 cm (deux journées)
- Epaisseur = 1 cm (Séchage continué)

Tableau (II-1) : Les résultats des mesures de couleur L, a, b

N°	Ep = 0.3 cm			Ep = 0.5 cm			Ep = 1cm discontinué		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	53,39	34,91	14	54,4	34,33	14,05	49,53	23,89	11,29
2	63,63	36,13	18,99	55,22	36,58	13,58	47,35	20,61	10,22
3	56,59	38,2	13,92	55,98	36,88	13,47	47,74	22,3	10,5
4	53,34	33,68	13,61	55,16	35	12,8	49,11	22,4	11,33
5	54,86	32,93	12,83	55,41	35,16	13,32	51,05	24,37	12,62
6	56,41	36,39	14,97	55,79	36,22	14,1	49,73	23,3	11,21
7	54	35,23	13,81	53,96	33,44	13,66	48,83	22,93	11,18
8	54,51	35,28	13,97	59,24	26,04	17,76	48,3	22,91	10,49
9	54,56	34,4	14,42	53,57	32,49	13,63	50,98	26,06	11,59
10	53,87	33,2	13,92	55,53	32,8	13,95	48,34	22,2	10,55
Moy	55,516	35,035	14,444	55,426	33,894	14,032	49,096	23,097	11,098

	Ep = 1 cm contenu			Ep = reference		
N°	L	A	b	L	a	b
1	52,26	27,57	13,16	57,96	47,96	15,89
2	51,32	26,45	11,97	61,18	46,26	19,41
3	49,93	28,01	11,37	62,88	50,23	18,52
4	50,6	27,99	11,79	61,72	49,93	18,27
5	53,77	28,77	14,04	63,67	46,18	19,44
6	48,84	30,74	11,71	59,31	48,64	18,14
7	55,93	23,61	15,54	58,4	46,61	16,64
8	49,28	26,36	11,52	61,77	48,33	18,24
9	46,96	25,03	10,55	63,17	46,73	19,14
10	51,41	27,45	13,21	51,98	35,34	13,27
Moy	51,03	27,198	12,486	60,204	46,621	17,696

-Calcul de la distance de couleur ΔE :

Le calcul de la distance de couleur ΔE a été fait sur la base des valeurs moyennes calculées par 10 mesures faites pour chaque échantillon. Les valeurs ainsi calculée de ΔE sont données par le tableau (10-4) suivant :

L'épaisseur	0,3 cm	0,5 cm	01 cm	1 cm
Système utilisé	S. Direct	S. Direct	S. Direct	S. Continu
Durée de S.	1 Jour	1 Jour	2 Jours	1 Jour
Surface de Claie.	620cm ²	620cm ²	620cm ²	1240cm ²
T^{ure} Ambiante	33,38°C	40,39°C	33,88°C	30,11°C/27,13°C
T^{ure} avant Claie.	59,11°C	63,97°C	56,88°C	48,16°C/33,5°C
ΔE	12,910	14 ,075	26,834	22,086

On remarque que cette variation de différence de couleur ΔE dépend de plusieurs paramètres notamment climatiques tels que les rayonnements solaires auxquels les échantillons sont directement exposés, la température de l'air de séchage et la durée de l'opération. En effet la différence de couleur la plus importante $\Delta E = 26,834$ était trouvé dans le cas de la pâte en couche d'épaisseur 01cm. Cela est probablement dû à la durée de séchage longue (deux jours). Par ailleurs la plus petite valeur de différence $\Delta E = 12,910$ a été trouvée avec l'échantillon d'épaisseur 0,3 cm.

Pour les échantillons d'épaisseur 1cm, on peut également observe que la différence de couleur pour l'échantillon séché avec la procédure de séchage continué $\Delta E = 22,099$ est inférieur à celle de l'échantillon séché en deux journée. De ce fait on peut conclure que ce nouveau procédé de séchage solaire continué de la pâte de tomate pourrait être défini comme étant l'état optimal qualité/durée de séchage.

Conclusion générale

Ce travail est une contribution à l'amélioration du procédé du séchage solaire des produits agro-alimentaires. Il consiste l'exploitation de la source thermique de l'eau de l'Albien pour assurer la continuité de l'opération de séchage et pour éviter le stockage de produit pendant la nuit.

On a utilisé un dispositif de simulation d'eau de l'Albien pour la production de l'eau chaude.

Dans ce travail nous avons fait quatre expériences pour déterminer les paramètres optimaux pour notre procédé où nous avons étudié l'effet de variation de l'épaisseur de la claie de séchage sur la durée de séchage et sur la qualité de produit séché.

Durant l'opération de séchage de la pâte de tomate nous avons respecté la teneur finale de produit (0,13kg eau/kg m.s), cette dernière est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles (la couleur, le goût, l'odeur, ...etc.).

Les résultats expérimentaux nous amènent aux conclusions suivantes :

- La durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale du produit (0,13 kg eau/kg m.s) dépend de l'épaisseur de la claie de séchage et aussi de certaines conditions climatiques.
- Pour une épaisseur de claie moins ou égale **0.5**cm, le produit a été séché dans la première journée et ne nécessite pas l'utilisation de l'installation de l'eau chaude pour atteindre la teneur en eau souhaité.
- Pour une épaisseur de claie de **1**cm, on remarque que le produit nécessite deux jours pour atteindre la teneur en eau finale, et plus de ça, la qualité du produit séché est dégradées. de cet effet, Il nous faut d'utiliser l'installation de l'eau chaude pour assurer la continuité de l'opération de séchage.
- L'expérience a été réalisée avec une claie d'épaisseur de **1**cm, en utilisant l'installation de l'eau chaude ; les résultats obtenues sont des résultats plus optimaux, où la qualité de la pâte de tomate est améliorée est aussi la durée de séchage est réduite.
- Pour augmenter la quantité de chaleur transférée de l'échangeur Eau/Air, on doit effectuer certaines améliorations au niveau de ce dernier.
- Notre modeste travail est une nouvelle approche qui est le premier pas pour autre travaux dans ce sens.
- Après les expériences, on peut conclure que ce procédé a une grande efficacité dans les régions qui ont des ressources de l'énergie géothermique comme la région de Ouargla.

REFERENCES

- [1] M. Kouhila , A. Belghit , M. Kaoua, et M. Daguinet, « Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire », Rev. Energ. Ren,(1-3),1998.
- [2] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).
- [3] H. Ridene, S. Azzouz, D. Ghorbel, L. Ayed, M. B. Slama, A. Belghith, Séchage des tomates par l'air chaud : cinétique et qualité, 1^{er} séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage, 2006, Tunisie, 271-279
- [4] A. Charreau, R. Cavalle, Séchage : Théorie et calculs, Technique de l'ingénieur, J 2480 , 1-23, (1991).
- [5] F. Vachet, Séchage dans l'industrie chimique, Technique de l'ingénieur, J 2483, (1-19), (1993).
- [6] Jean Castaing-Lavignottes, Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [7] LES SECHOIRS : UNE TRES GRANDE DIVERSITE Diffusé par SECAAR, 06 BP 2037 – Abidjan 06 – Côte d'Ivoire
- [8] Philippe Dudez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes (Expériences et procédés), ministère de la coopération, les éditions dugret
- [9] A. Boussalia, Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, mémoire magister, université Mentouri, Constantine (2010)
- [10] S. Chouicha Etude expérimentale du Séchage Solaire des Hattes Humides et Impact sur la Qualité, Mémoire Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla (2010),
- [11] B. Eyglunet, "Manuel de thermique : théorie et pratique", Hermes science publication, Paris, France, (1997).

- [12] W. Maake, H. J. Echert, et J. L. Cauchepin, "Manuel technique du froid", Tome I, PYC Edition, Alamand (2001).
- [13] J. L. Bal, B. Chabot, "Les énergie renouvelables", Sciences de la terre et des plantes, 333 (872-834) - (2001).
- [14] B place de l'énergie électrique", Revue 3EL (Multon, "L'énergie sur la terre : Analyse des ressources et de la consommation. La). (1998)
- [15] www.wikipedia.org, 25/06/2014,
- [16] [www. http://mendeleiev.cyberscol.qc.ca/chimisterie](http://mendeleiev.cyberscol.qc.ca/chimisterie). 25/06/2014.
- [17] D. Mennouche, "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire", Thèse de Magister, Université de Ouargla (2006)
- [18] Yves Jannot, Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT-ENSAM, (1-5), (2003).
- [19] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene, "Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et la cinétique de séchage de la menthe verte", Entropie, n° 233, (20-31). (2001)
- [20] A. Besson et W. Bauer, "Sciences alimentaires 1, les Traitements thermiques", Université de Lausanne, 1-52, (2001).
- [21] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).

1. Le dispositif expérimental



Le séchoir solaire

2. Les instruments de mesures



Solarimètre



Appareil d'affichage



Analyseur d'humidité



Appareil physique multi fonctionnel



Appareil testo 445



Calculateur **DP-400**

CR-400

colorimètre Minolta Cr400



Appareil testo 425

Résumé :

Ce travail est une contribution à l'amélioration du procédé du séchage solaire des produits agro-alimentaires. Il comporte l'exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaire (dans notre cas la pâte de tomate) dont l'objectif est d'assurer la continuité l'opération de séchage pendant la nuit, ou pendant les journées nuageuses; et d'éviter le stockage du produit pendant la nuit.

Grâce aux expériences, on a étudié l'effet de variation de l'épaisseur de la claie de séchage sur la durée de séchage et sur la qualité de produit séché. Ceci pour déterminer l'épaisseur optimal de notre procédé.

On a trouvé que l'utilisation de l'installation de l'eau chaude assure une opération continue et améliore la qualité de produit séché.

Mots clés : séchage, produits agro-alimentaires, pâte de tomate, Eau Albien

Abstract :

This work is a contribution towards improving the process of solar drying of agricultural and food products. It involves the exploitation of the thermal water source (Albian water) in the solar drying of food products (in our case the tomato paste) whose objective is to ensure the continuity of the drying operation during the night or during cloudy days; and avoid the storage of the product at night.

Through experiments, we studied the effect of the variation of the thickness of the drying rack on the drying period and on the quality of the dried product. This is to determine the optimum thickness of our process.

It has been found that the use of the hot water installation ensures continuous drying operation and improves the quality of the dried product.

Keywords: solar drying, food products, tomato paste, Albian water

ملخص:

هذا العمل هو المساهمة في تحسين عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية. أنه ينطوي على استغلال مصادر المياه الحرارية البيان للفي التجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية (في حالتنا معجون الطماطم) التي تهدف إلى ضمان استمرارية العملية أثناء التجفيف الليل أو خلال الأيام الغائمة؛ وتجنب تخزين المنتج في الليل. من خلال التجارب، درسنا تأثير اختلاف سمك رف التجفيف على وقت التجفيف وجودة المنتج المجفف. هذا لتحديد السمك الأمثل لعمليتنا.

وقد وجد أن استخدام الماء الساخن تركيب يضمن التشغيل المستمر وتحسين جودة المنتج المجفف.

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، المنتجات الزراعية، معجون الطماطم، مياه جوفية