

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département de Physique  
Unité de Recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* », URMER

Mémoire de Fin d'Etude  
Pour l'obtention du Diplôme de Master  
En Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables

Thème  
**Optimisation d'un Système de Séchage Solaire des  
Produits Agro-alimentaires**

Présenté par : Mr. Djamel Eddine MISSOUM

Soutenue publiquement en Juin 2016 devant le Jury composé de :

Mr. B. BENYOUCEF	Professeur	Président	(Univ-Tlemcen)
Mr. D. AMEUR	MCA	Examineur	(Univ-Tlemcen)
Mr. L. I. KARAOUZENE	MAA	Examineur	(Univ-Tlemcen)
Mr. L. MERAD	MCA	Encadreur	(Univ-Tlemcen)

Année Universitaire 2015-2016

## Remerciements

Ce Mémoire de Fin d'Etudes à été réalisé à l'Université de Tlemcen, Faculté des Sciences, Département de Physique, à l'Unité de Recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* », URMER au titre de l'année universitaire 2015-2016.

Merci à mon Encadreur Mr. Laarej MERAD, Maitre de Conférences (A) à l'Université de Tlemcen qui m'a fait confiance pour mener à bien ce travail. Il est clair que la bonne ambiance repose en grande partie sur ses qualités humaines, ses conseils avisés et son soutien.

Ont tient à exprimer nos plus sincères remerciements à Mr. Boumédiène BENYOUCEF, Professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir bien voulu présider le jury.

Toute notre gratitude à Mr. Djilalli AMEUR, Maitre de Conférences (A) à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Toute notre gratitude à Mr. Lotfi Ibrahim KARAOUZENE, Maitre Assistant (A) à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Au cours de ces années d'études, nombreuses ont été les personnes qui ont contribué à ce travail et je voudrais leur exprimer ici toute ma sympathie.

Merci à tous...  
Mr. Djamel MISSOUM

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I :

Figure I.1	Déplacements de la terre .....	6
Figure I.2	Spectre solaire.....	7
Figure I.3	Composantes du rayonnement solaire au sol.....	8
Figure I.4	Masse atmosphérique ou air masse.....	9
Figure I.5	Coordonnées terrestre.....	11
Figure I.6	Repère horizontal.....	13
Figure I.7	Coordonnées célestes horizontales.....	14
Figure I.8	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	15
Figure I.9	Carte solaire de l'Algérie.....	15
Figure I.10	différents modes de transfert thermique.....	17
Figure I.11	Utilisation de l'énergie solaire.....	20
Figure I.12	Différents types de centrales solaires thermodynamiques.....	21
Figure I.13	Centrale solaire thermodynamique.....	22
Figure I.14	Fonctionnement d'une cellule solaire.....	22
Figure I.15	Système de capteurs solaires et réservoir d'eau chaude.....	24

### Chapitre II :

Figure II.1	Courbes de séchages caractéristiques.....	30
Figure II.2	Séchoir solaire direct.....	38
Figure II.3	schéma d'un séchoir solaire indirect.....	38
Figure II.4	Séchoir solaire tunnel.....	39
Figure II.5	Séchoir à convection forcée.....	40
Figure II.6	Séchoir solaire hybride solaire gaz.....	41

### Chapitre III :

Figure III.1	schéma descriptif de notre système de séchage.....	47
Figure III.2	Schéma du milieu poreux et de volume élémentaire représentatif.....	51
Figure III.3	Echanges thermiques dans la chambre de séchage.....	54
Figure III.4	Schéma électrique relatif au transfert de chaleur dans la chambre de séchoir.....	54
Figure III.5	organigramme développée pour la simulation de chambre de séchage.....	59
Figure III.6	Evolution de la température de produit au cours de séchage.....	61
Figure III.7	Evolution de l'humidité de Tomate en fonction de temps.....	62
Figure III.8	La variation de la vitesse de séchage en fonction de temps.....	63
Figure III.9	Variation de l'humidité de la Tomate en fonction de temps pour les différentes claires.....	64
Figure III.10	Variation de la Température de Tomate en fonction de temps pour les différentes claires.....	65
Figure III.11	Effet de la température de l'air asséchant sur l'humidité de Tomate pour $j=1$ .....	66

Figure III.12	Effet de la température de l'air asséchant sur la température de Tomate pour j=1.....	67
Figure III.13	Effet de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité de Tomate pour j=1.....	68

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I :

Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil.....	5
Tableau I.2	Différentes valeurs de $\delta$ au cours de l'année.....	13
Tableau I.3	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	16

### Chapitre II :

Tableau II.1	Valeur nutritionnelle de 100g de tomates.....	28
Tableau II.5	Avantages et inconvénients de chaque type de séchoir solaire.....	43

## NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
$I_0$	Constante solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
n	numéro du jour	Sans dimension
$m_{\text{air}}$	la masse d'air	[kg]
TSV	Temps solaire vrai	[h]
TSM	Temps solaire moyen	[h]
ET	Equation de temps	[h]
TU	Temps universel	[h]
TL	Temps légal	[h]
$\Delta H$	Décalage horaire	[h]
$b$	Hauteur de soleil	[°]
Z	Angle zénithale	[°]
X	L'humidité absolue	[kg eau/kg m,s]
$P_v$	Pression de la vapeur d'eau	[Pa]
$P_{\text{sat}}$	Pression de saturation	[Pa]
$Q$	Quantité de chaleur transférée par unité de temps	[W]
S	Surface	[m <sup>2</sup> ]
D	coefficient de diffusion massique	[m <sup>2</sup> /s]
t	temps	[s]
$a_m$	diffusivité massique	[m <sup>2</sup> /s]
$a_q$	diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
C	chaleur spécifique	[J/kg°C]
$L_v$	chaleur latente massique d'évaporation de l'eau	[J/kg]
$D_m$	coefficient de diffusion massique isotherme	[m <sup>2</sup> /s]
$D_T$	coefficient de diffusion massique non isotherme	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{MV}$	coefficient de diffusion isotherme de la vapeur	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{TV}$	coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho C$	Capacité calorifique équivalente	[J/m <sup>3</sup> °C]
V	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$D_{\text{pr}}$	diamètre moyen du produit	[m]

$U$	Vitesse moyenne du fluide	[m/s]
$C$	Chaleur massique	[J.kg <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> ]
$C_p$	Capacité calorifique massique de l'air	[J/kg.K]
$C_{p_f}$	Capacité calorifique massique de produit	[J/kg.K]
$C_{p_p}$	Capacité calorifique massique des parois	[J/kg.K]
$\Delta Z$	le pas d'espace	[m]
$dt$	pas de temps	[s]
$h_{ce}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre la paroi externe du séchoir et l'air extérieur	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{air,pr}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et les produits	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{cd,p}$	Coefficient d'échange thermique par conduction dans les parois du séchoir	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{air,pi}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la paroi interne	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{re}$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la paroi externe et la voute céleste	[W/m <sup>2</sup> .K]
$m_f$	Masse des produits	[kg]
$m_{sec}$	masse sèche du produit	[kg]
$m_p$	Masse des parois	[kg]
$e_p$	L'épaisseur de paroi	[m]
$P_{ev}$	Puissance d'évaporation	[W]
$Q$	Débit massique de l'air	[kg/s]
$S$	Surface d'échange produit-air pour une claie	[m <sup>2</sup> ]
$S_p$	Surface des parois du séchoir dans la tranche j	[m <sup>2</sup> ]
$T_a$	Température ambiante	[K]
$T_c$	Température de la voute céleste	[K]
$T_f$	Température des produits	[K]
$T_p$	Température entre les deux parois	[K]

$T_{pe}$	Température de la paroi externe	[K]
$T_{pi}$	Température de la paroi interne	[K]
$V_v$	Vitesse de vent	[m/s]

### Les lettres grecques

$\lambda$	Longitude de lieu	[°]
$\omega$	Angle horaire	[°]
$\gamma$	Hauteur du soleil	[m]
$\theta_z$	Angle au zénith	[°]
$\delta$	Déclinaison solaire	[°]
$\theta$	La latitude du lieu	[°]
$\alpha$	Azimut de soleil	[°]
$\varphi$	L'humidité relative	[%]
$\phi_{cond}$	Flux de chaleur transmis par conduction	[W]
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stephan	[5,67 10 <sup>-8</sup> W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-4</sup> ]
$\varepsilon_p$	Facteur d'émission de la surface (l'émissivité).	Sans dimension
$\rho_0$	masse volumique de la phase solide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_e$	masse volumique de la phase liquide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda^*$	Conductivité thermique apparente	[W/m <sup>2</sup> °C]
$\rho$	Masse volumique	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{ah}$	Masse volumique de l'air chaud	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu_{ah}$	viscosité dynamique de l'air chaud	[kg/m.s]
$\theta$	Température de l'air asséchant	[K]

### Les nombres adimensionnels

Nu: nombre de NUSSELT

Pr: nombre de PRANDLT

Re: nombre de REYNOLDS

# Sommaire

Remerciements	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1

## Chapitre I

## L'énergie solaire

I.	Introduction.....	5
II.	Soleil.....	5
III.	Mouvement de la terre autour du soleil.....	5
IV.	Rayonnement solaire.....	6
IV.1	Constante solaire.....	8
IV.2	Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	9
IV.2.1	Rôle de l'atmosphère.....	9
IV.2.2	Structure de l'atmosphère .....	9
IV.2.3	Masse d'air .....	9
IV.2.4	Interaction des rayonnements avec l'atmosphère.....	10
V.	Paramètres de temps.....	10
VI.	Mouvement de la terre, le soleil et leurs coordonnées.....	11
VI.1.	Coordonnées terrestres .....	11
VI.1.1	Longitude .....	12
VI.1.2	Latitude .....	12
VI.1.3	L'altitude .....	12
VI.2	Coordonnées équatoriales .....	12
VI.2.1	Déclinaison solaire.....	12
VI.2.2	Angle horaire.....	13
VI.3	Coordonnées horizontales .....	13
VI.3.1	Hauteur du soleil.....	14
VI.3.2	Azimut du soleil.....	14
VI.3.3	Angle zénithal.....	14
VII.	Gisement solaire en Algérie.....	15
VIII.	Capteurs solaires.....	16
VIII.1	Capteur solaire photovoltaïque .....	16
VIII.2	Capteur solaire thermique .....	16
VIII.2.1	Capteurs à concentration .....	16
VIII.2.2	Capteur solaire plan .....	17
VIII.2.2.1	Orientation d'un plan .....	17
VIII.3	Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire.....	17
VIII.3.1	Conduction .....	18
VIII.3.2	Convection .....	18
VIII.3.3	Rayonnement .....	19

IX.	Application et utilisation de l'énergie solaire.....	19
IX.1	Energie solaire passive .....	20
IX.2	Energie solaire thermodynamique.....	20
IX.2.1	Principe d'une centrale thermodynamique.....	20
IX.2.2	Fonctionnement d'une centrale thermodynamique.....	21
IX.3	Energie solaire photovoltaïque.....	22
IX.4	Energie solaire thermique.....	23
IX.4.1	Chauffe-eau solaire .....	23
IX.4.2	Distillateur solaire.....	24
IX.4.3	Production du froid .....	24
IX.4.4	Séchage solaire.....	24
X.	Conclusion.....	25

## Chapitre II

## Le séchage solaire et ces applications

I.	Introduction.....	27
II.	Tomate.....	27
III.	Humidité.....	28
III.1	L'humidité absolue.....	28
III.2	L'humidité relative.....	29
III.3.	Caractéristiques des solides humides.....	29
III.3.1.	Humidité absolue.....	29
III.3.2.	Humidité relative .....	29
IV.	Etas d'eau dans les aliments.....	29
V.	Cinétique de séchage.....	30
V.1	Influence des paramètres de l'air sur la cinétique du séchage .....	30
V.1.1	Influence de la température de l'air .....	30
V.1.2.	Influence de la vitesse de l'air.....	31
V.1.3.	Influence de l'humidité de l'air.....	31
V.2.	Temps de séchage.....	31
VI.	Qualité des produits secs.....	31
VI.1	Modification biochimique.....	31
VI.2	Pertes d'aromes.....	32
VI.3	Pertes de la couleur du produit.....	32
VI.4	Modifications physiques et mécaniques des produits secs.....	32
VII.	Domaine d'utilisation de séchage.....	32
VII.1	Industrie agroalimentaire.....	33
VII.2	Industrie du bois.....	33
VII.3	Biotechnologie et industrie pharmaceutique.....	33
VII.4	Matériaux de construction.....	33
VIII.	Différents modes de séchage.....	34
VIII.1	séchage par convection ou par entraînement.....	34
VIII.2	Séchage par conduction.....	34
VIII.3	Séchage par rayonnement .....	35
IX.	Différents types de séchoirs solaires.....	36

IX.1	Séchoirs naturels .....	37
IX.2	Séchoirs solaires directs.....	37
IX.3	Séchoirs solaires indirects.....	38
IX.4	Séchoirs solaires tunnels.....	39
IX.5	Séchage par convection.....	39
IX.6	Séchoirs solaires mixtes.....	41
IX.7	Séchoirs solaires hybrides.....	41
X.	Evaluation des séchoirs solaires.....	41
X.1	Caractéristiques physiques du séchoir.....	41
X.2	Performances thermiques.....	42
X.3	Qualité du produit séché.....	42
XI.	Choix de séchoir.....	42
XI.1	Choix du séchoir indirect à convection forcée par rapport aux autres.....	42
XII.	Conclusion.....	44

### Chapitre III

### Optimisation d'un système de séchage solaire

I.	Introduction.....	46
II.	Choix et description du système.....	46
III.	Classification des modèles de séchage.....	48
III. 1	Modèles empiriques.....	48
III. 2	Modèles diffusifs.....	48
III.3	Modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.....	48
III.3.1	Modèles issus de la thermodynamique des phénomènes irréversibles (TPI)	
III.3.2	Modèle de Luikov.....	49
III.3.3	Modèle de Philip et De Varies.....	50
III.3.4	Modèle de Whitaker.....	50
IV.	Modélisation mathématique.....	51
V.	Equation énergétique du système.....	52
VI.	Analogie loi d'ohm - loi de fourrier.....	53
VII.	Bilan énergétique et massique de la chambre de séchage .....	54
VII.1	Bilan d'énergie de la face externe de paroi .....	55
VII.2	Bilan d'énergie de la face interne de paroi .....	55
VII.3	Bilan d'énergie de la surface intermédiaire entre la paroi interne et externe	
VII.4	Bilan d'énergie de l'air asséchant .....	56
VII.5	Bilan d'énergie du produit (la tomate) .....	56
VIII.	Détermination des coefficients de transfert thermique .....	57
IX.	Organigramme du programme.....	59
X.	Résultats et discussion.....	60
XI.	Conclusion.....	69
	Conclusion générale.....	71
	Références bibliographiques.....	74

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'énergie solaire sous toutes ses formes, reste un des paramètres les plus prépondérants dans le développement et la croissance économique d'un pays. L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement [22] de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m<sup>2</sup> sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante pour satisfaire la demande énergétique en séchage des produits agro-alimentaires.

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits.

Le séchage est un processus utilisé depuis l'antiquité par l'homme, afin d'assurer ses besoins. Le séchage est un moyen de conservation de produits agro-alimentaires, de poissons, de viandes, de grains de maïs, de riz, de céréales,..., ou une étape nécessaire dans la fabrication du produit, comme pour le bois, le papier et les matériaux de construction.

Cependant, le séchage n'est pas une opération facile à gérer, l'utilisation des courbes de séchage qui représentent les variations des différents paramètres tels que la température et l'humidité nous permet de contrôler le processus de séchage afin que le produit à sécher n'aboutisse à aucune déformation, craquement ou détérioration.

Dans ces conditions, l'utilisation de la simulation permet de prévoir le comportement du produit à sécher et de connaître les paramètres influant ce processus sans avoir recours à l'expérimental. D'autre part, elle permet un choix optimum des paramètres de séchage afin d'avoir un gain dans les dépenses énergétiques. Notons, que le séchage est un processus

dévorateur d'énergie et que limiter ces dépenses et gagner du temps sont des soucis permanents des chercheurs et des scientifiques travaillant dans ce domaine.

Cette étude s'inscrit dans une optique d'étude et d'optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires et particulièrement la tomate. L'objectif de notre travail consiste à développer un modèle mathématique, pour le séchage solaire de la Tomate, en utilisant un séchoir solaire indirect à convection forcée dans des conditions déterminées. A cet effet, un système d'équations régissant le fonctionnement du séchoir et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique à l'aide de l'outil de simulation MATLAB nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivis d'une analyse, d'une discussion et enfin d'une conclusion.

Le présent travail comporte trois chapitres :

Le premier chapitre décrit l'étude bibliographique de quelques aspects énergétiques tels que le soleil, énergie solaire, et autres sur le système de coordonnées pour déterminer une position sur la terre. Aussi que les applications et l'utilisation de l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre présente des notions théoriques et généralités utiles à la compréhension du phénomène de séchage (humidité, cinétique de séchage....etc.), puis une étude sur les différentes méthodes de séchage, les différents types des séchoirs solaires, et enfin une étude comparative (avantages et inconvénients) entre les différents types de séchoirs solaires afin de choisir le meilleur pour notre étude.

Le troisième chapitre est consacré à l'établissement des différentes équations, régissant le fonctionnement de la chambre de séchage, les expressions des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations avec une étude de simulation, et la discrétisation des équations thermiques puis les différents résultats obtenus, l'influence de certains paramètres sur le comportement du séchoir, avec leur interprétation.

On a terminé notre travail par une conclusion générale rassemblant l'ensemble des résultats et l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite favorable pour l'optimisation de notre séchoir.

**CHAPITRE I**

**ENERGIE SOLAIRE**

## I. INTRODUCTION

Le soleil est à l'origine de la vie sur la terre. Son énergie nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique à travers l'espace, qui nous éclaire, nous réchauffe et fait croître les plantes. Cette énergie est propre (non polluante), gratuite, disponible, et silencieuse [1].

Cependant, l'énergie solaire reçue par la Terre représente par an près de 15 000 fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle [1].

La variation des rayonnements solaires en fonction du temps [2] est importante et influe directement sur les besoins énergétiques pour les applications des systèmes qui fonctionnent avec cette source d'énergie. A cet effet, la connaissance du gisement solaire du site ainsi que les différents paramètres du soleil comme les heures de lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée, nous permettent de faire un meilleur pré-dimensionnement du champ de captation.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur l'énergie solaire et des notions sur ces volets géométrique, thermique et énergétique ainsi que les différents modes de transfert de chaleur dans un capteur solaire plan.

## II. SOLEIL

Le soleil est une sphère de plasma (matière complètement ionisée) [3], C'est le siège des réactions thermonucléaires, exothermiques transformant des noyaux hydrogène en noyaux d'hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à rayonnement électromagnétique réparti sur un très large spectre de longueurs d'onde comprises entre  $10^{-10}$  et  $10^4$ m.

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I.1) :

Diamètre (km)	1 392 000
Masse (kg)	$2.10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6,09 10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1,41 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2,5 10^{17}$

Tableau (I.1) : *Caractéristiques principales du soleil* [4].

## III. MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

La terre est un solide [5] quasi sphérique de 12 700 km de diamètre, en rotation autour du soleil sur une orbite elliptique. La distance entre la terre et le soleil est approximativement de 150 millions de km et varie entre 152 millions de km (le premier Juillet) et 147 million de km (le premier Janvier).

Le mouvement apparent du soleil sur la voûte céleste est le résultat de deux déplacements distincts de la terre (Voir Figure I.1).

- Le premier est une rotation de celle-ci autour de son axe en 24 heures;
- Le second est une rotation de la terre autour du soleil en un peu plus de 365 jours.

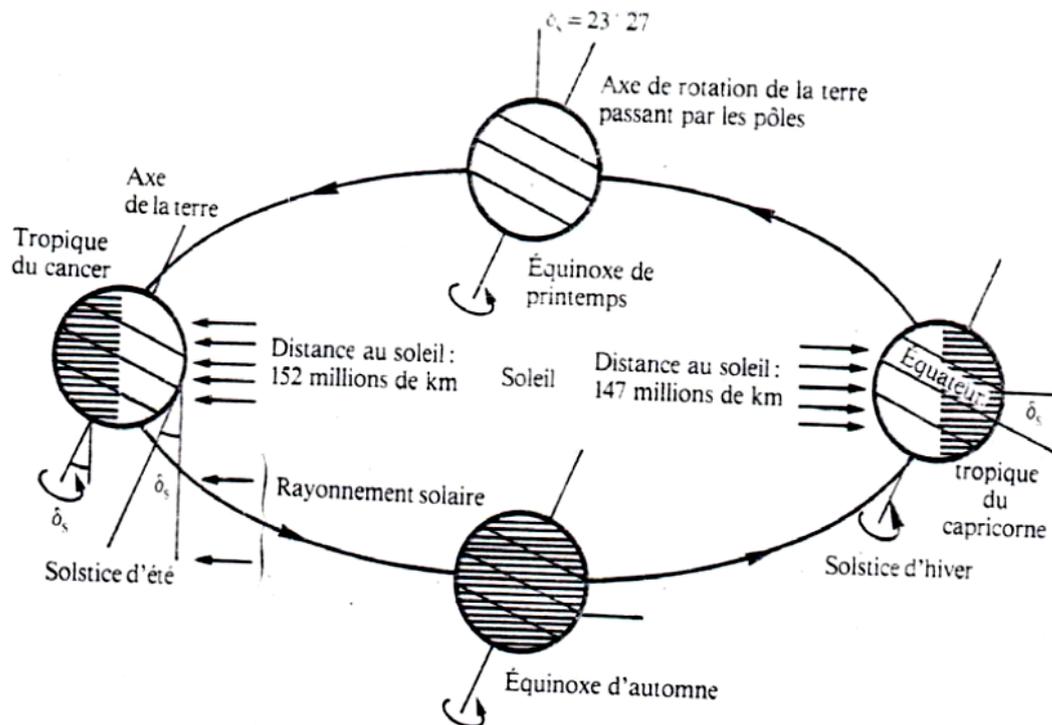


Figure (I.1) : Déplacements de la terre [6].

De plus l'axe de rotation de la terre [5] représente un angle de  $23,45^\circ$  par rapport au plan de l'écliptique et n'est affecté que par une translation lors de la rotation de la terre autour du soleil. L'angle entre le plan de l'équateur de la terre et le plan de l'écliptique est appelé déclinaison et varie entre  $-23,27^\circ$  le 22 Décembre (solstice d'hiver) et  $+23,27^\circ$  le 22 Juin (solstice d'été).

Ces deux types de rotation [5] sont responsables des phénomènes climatiques saisonniers:

- Modification de l'importance du rayonnement solaire;
- Longueur du jour;
- Hauteur maximum du soleil sur l'horizon.

#### IV. RAYONNEMENT SOLAIRE

Le rayonnement électromagnétique [6] émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Il constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil.

Le rayonnement solaire [6] est caractérisé par différentes caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques.

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (I.2) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère [1].

Comparé au corps noir [1] à 5900K, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir

Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueurs d'onde variant de 0,2  $\mu\text{m}$  (ultraviolet) à 10  $\mu\text{m}$  (infrarouge).

Ce rayonnement est composé essentiellement :

- De lumière visible de longueurs d'onde comprises entre 400nm et 800 nm ;
- De rayonnement InfraRouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm ;
- De rayonnement UltraViolet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800nm.

L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 1340  $\text{W}/\text{m}^2$ . Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre et atmosphère, environ 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  sont réfléchis vers l'espace, le reste est absorbé [7].

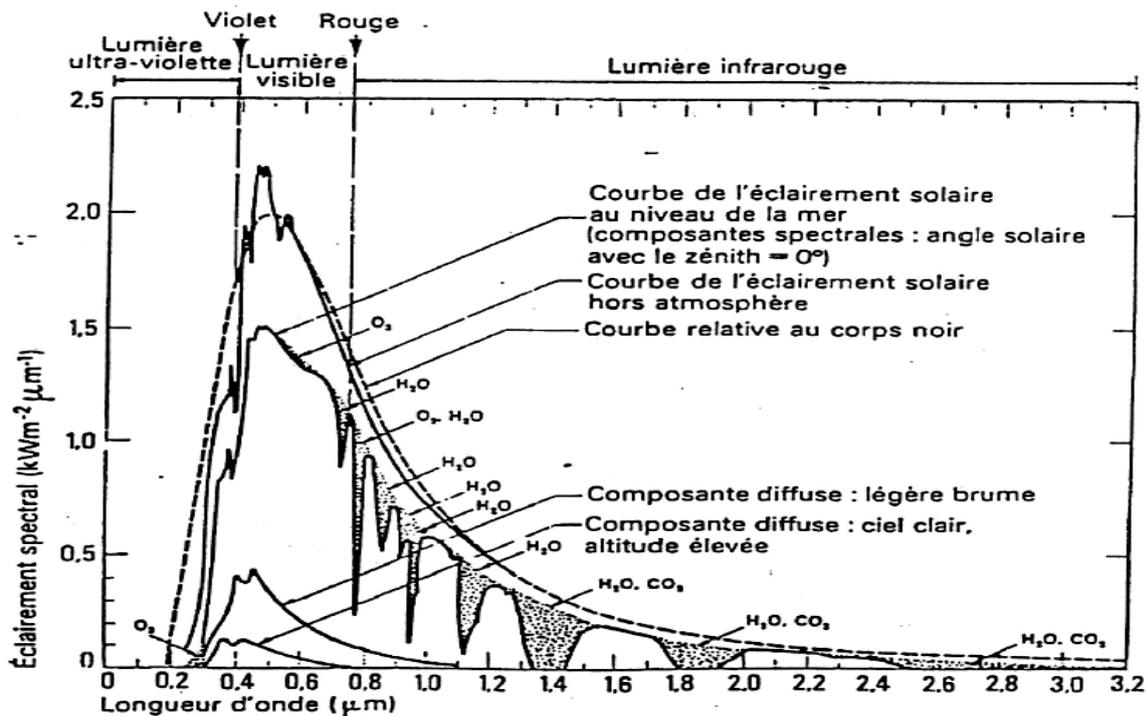


Figure (I.2) : Spectre solaire (d'après W. Palz, *Solar Electricity*, UNESCO, Butterworths, 1978).

En traversant l'atmosphère, le rayonnement du soleil est absorbé et diffusé. Au sol [3], on distingue plusieurs composantes:

**a. Rayonnement direct**

Il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

**b. Rayonnement diffus**

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions dans le ciel.

**c. Albédo**

Est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur un plan incliné.

**d. Rayonnement global**

Est tout simplement la somme de ces diverses contributions (Voir Figure I.3).

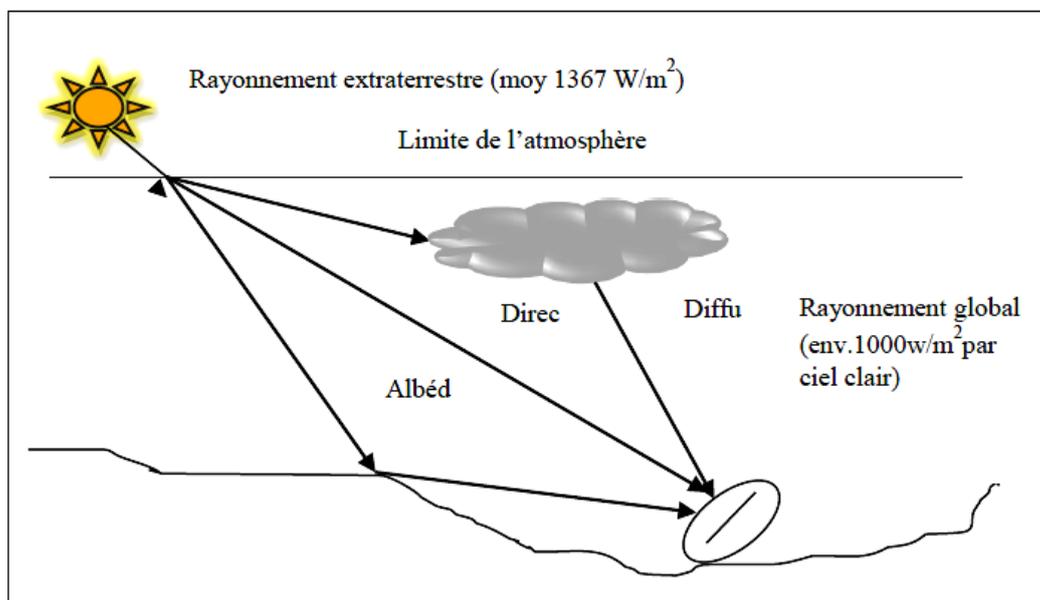


Figure (I.3) : Composantes du rayonnement solaire au sol [3].

#### IV.1 Constante solaire

La constante solaire  $I_0$  est le flux d'énergie reçu par seconde et par mètre carré, c'est-à-dire la puissance reçue par  $1 \text{ m}^2$  placé perpendiculairement aux rayons solaires, à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre. Sa valeur moyenne actuelle est de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

En réalité, la distance Terre-soleil varie au cours de l'année de  $\pm 1,7\%$  ; il en résulte une variation simultanée de la constante solaire de  $\pm 3,4\%$ . On peut approcher ces variations annuelles [8] par la formule sinusoïdale :

$$I_0 = 1367 \left( 1 + 0,034 \cos [0,986(n-2)] \right) \quad (I.1)$$

Dans laquelle  $n$  est le numéro du jour dans l'année.

## IV.2. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire:

### IV.2.1. Rôle de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre [9] protège la terre des excès de rayonnement solaire et arrête les rayons les plus dangereux au développement de la vie sur terre, comme le filtrage des rayons ultra violet par la fameuse couche d'ozone de la stratosphère. Cette énergie solaire qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère :

- Absorption,
- Réflexion,
- Réfraction,
- Diffusion.

La structure de cette atmosphère conditionne, par conséquent, les divers transferts énergétiques sol- atmosphère.

### IV.2.2 Structure de l'atmosphère

La stratification de l'atmosphère [9] en trois grandes couches est représentée par :

- L'homosphère, comprise entre 0 et 90 km d'altitude.
- L'hétérosphère, comprise entre 90 et 700 km.
- L'exosphère, comprise entre 700 et 3000 km.

### IV.2.3 Masse d'air

Pour traduire l'influence de l'atmosphère (Figure I.4), on introduit la notion de masse d'air.

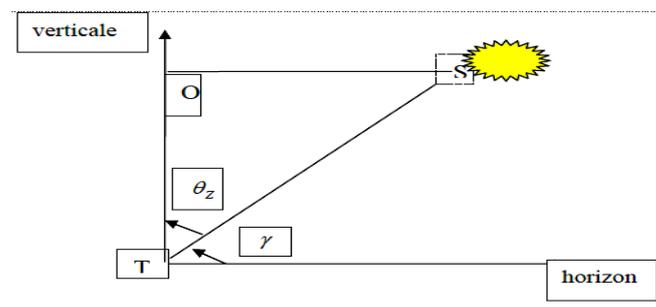


Figure (I.4) : Masse atmosphérique ou air masse [9].

On appelle "masse d'air"  $m$  ou air mass en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale.

La longueur du trajet du soleil [9] à travers l'atmosphère est :

$$TS = \frac{TO}{\sin \gamma}, \quad \text{d'ou} \quad m = \frac{1}{\sin \gamma} = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (I.2)$$

Avec :  $\gamma$  : Hauteur du soleil [m].

$\theta_z$  : Angle au zénith [°].

#### IV.2.4. Interaction des rayonnements avec l'atmosphère

##### A. Phénomène de diffusion

La diffusion est, en fait, la résultante des phénomènes [9] de réflexion, réfraction et de diffraction par les particules et les gaz existant dans l'atmosphère. La diffusion varie d'un lieu à un autre, d'une saison à une autre. Le niveau de diffusion est corrolé à la longueur d'onde du rayonnement solaire, de l'épaisseur des couches atmosphériques traversées, ainsi que de la densité des particules et des molécules existantes dans ces couches.

##### B. Phénomène d'absorption

L'ozone, dont la teneur est prépondérante vers l'altitude de 25km, absorbe les rayonnements, ultraviolets qui sont néfastes à la santé des êtres vivants. La vapeur d'eau existante en grande proportion dans la troposphère absorbe les infra rouges. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère [9].

##### V. Paramètres de temps

On distingue :

- Temps Solaire Vrai ( $TSV$ ) [4] est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression suivante :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15}. \quad (I.3)$$

$\omega$  : Angle horaire [°].

- Temps Solaire Moyen ( $TSM$ ) [4] est donné par :

$$TSV - TSM = ET \quad (I.4)$$

$ET$  : Equation du Temps [4] qui corrige le  $TSV$  par rapport au  $TSM$  :

$$ET = 9,87 \sin(2 * N') - 7,53 \cos(N') - 1,5 \sin(N') \quad (I.5)$$

$$\text{Avec : } N' = (n - 81) * \frac{360}{365} \quad (I.6)$$

$n$  : Nombre de jour.

➤ Temps Universel ( $TU$ ) [4] est le temps moyen de Greenwich:

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (I.7)$$

Avec :  $\lambda$  : longitude du lieu considéré [°].

➤ Temps Légal ( $TL$ ) [4] est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.8)$$

$\Delta H$  : Décalage horaire entre le méridien de Greenwich et lieu considéré [h].

## VI. MOUVEMENT DE LA TERRE LE SOLEIL ET LEURS COORDONNEES

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149,6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1,7\%$ . La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change selon le jour et la saison.

Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite).

Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser [4] deux repères :

- Repère équatorial ou horaire.
- Repère horizontal ou azimutal.

### VI.1. Coordonnées terrestres

La terre est pratiquement une sphère (Voir figure I.5) qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que son altitude [7].

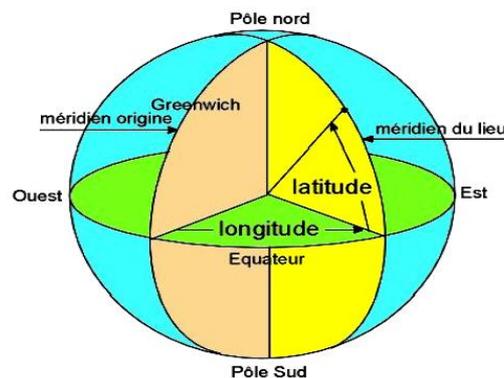


Figure (I.5) : Coordonnées terrestres [6].

### VI.1.1. Longitude

La longitude d'un lieu [7] correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe(-) les méridiens situés à l'Ouest.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond un écart de 4 minutes de temps.

Pour Tlemcen [4], la longitude est de  $-1,19^\circ$ .

### VI.1.2. Latitude

La latitude d'un lieu [7] à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré.

La latitude a aussi un effet important :

- Les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur,
- Le soleil est plus bas au midi solaire.

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle Équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur, indiqué en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle Nord par latitude  $+90^\circ$  et le pôle Sud par la latitude  $-90^\circ$ .

Cette convention de signes affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère Nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère Sud.

Pour la ville de Tlemcen [4] la latitude est environ  $34,56^\circ$ .

### VI.1.3. L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètres [7].

Pour la ville de Tlemcen [4] l'altitude est environ 750m.

## VI.2. Coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre mais elles sont liées à l'heure de l'observation [10]. Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre [7] à l'aide de deux angles ( $\delta, \omega$ ).

### VI.2.1. Déclinaison solaire $\delta$

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre (Voir Tableau I.2), on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre  $0^\circ$  à l'équateur et  $+90^\circ$  au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère

Sud (compris entre  $0^\circ$  à l'équateur et  $-90^\circ$  au pôle Sud) ; elle varie tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes  $\pm 23,27^\circ$  [2].

Equinoxe de printemps : 21 Mars $\delta = 0$
Solstice d'été : 22 Juin $\delta = + 23,27^\circ$
Equinoxe d'automne : 23 Septembre $\delta = 0$
Solstice d'hiver : 22 Décembre $\delta = - 23,27^\circ$

Tableau (I.2) : Différentes valeurs de  $\delta$  au cours de l'année [11].

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison tout au long de l'année. Cette variation est décrite par l'équation suivante :

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 * \frac{284 * N}{365}\right). \quad (\text{I.9})$$

Avec :  $\delta$  : Déclinaison [ $^\circ$ ]

N : Numéro du jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> Janvier, c'est-à-dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

### VI.2.2. Angle horaire $\omega$

L'Angle Horaire  $\omega$  (encore noté  $AH$ ) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de la trajectoire solaire [11] compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé de la façon suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12). \quad (\text{I.10})$$

Où :  $TSV$  : Temps Solaire Vrai [h].

A chaque heure [11] qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de  $15^\circ$ , soit encore 4mn de temps par  $^\circ$  de longitude.

A la latitude de  $45^\circ$ , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur.

### VI.3. Coordonnées horizontales

Le repère horizontal (Voir Figure I.6) est formé par le plan de l'horizon astronomique et vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées [7] sont la hauteur  $h$  et l'azimut  $\alpha$ .

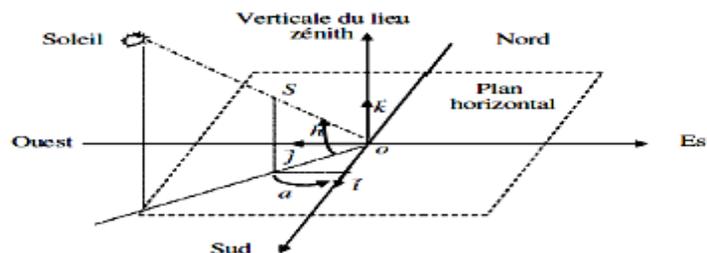


Figure (I.6) : Repère horizontal.

### VI.3.1. Hauteur du soleil ( $h$ )

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil [7] varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta)\cos(\theta)\cos(\omega) + \sin(\theta)\sin(\delta). \quad (\text{I.11})$$

Où l'on rappelle que  $\theta$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ , sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

Avec :  $h$  varie entre  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ .

### VI.3.2. Azimut du soleil ( $\alpha$ )

C'est l'angle [10] entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction Sud. Il se compte de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du Sud dans le sens rétrograde.

L'azimut du soleil [7] varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) - \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I.12})$$

Avec :  $\delta$ ,  $\omega$  et  $h$  sont respectivement la déclinaison du soleil, l'angle horaire et la hauteur du soleil.

$\alpha$  : varie entre  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ .

### VI.3.3. Angle zénithal $Z$

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith) (Voir Figure I.7).

L'angle  $Z$  est complémentaire de  $h$ . L'angle zénithal [10] est donné par :

$$\cos(Z) = \cos(\delta)\cos(\theta)\cos(\omega) + \sin(\theta)\sin(\delta). \quad (\text{I.13})$$

Avec:  $\delta$ ,  $\omega$  et  $\theta$  sont respectivement la déclinaison du soleil, l'angle horaire et latitude du soleil.

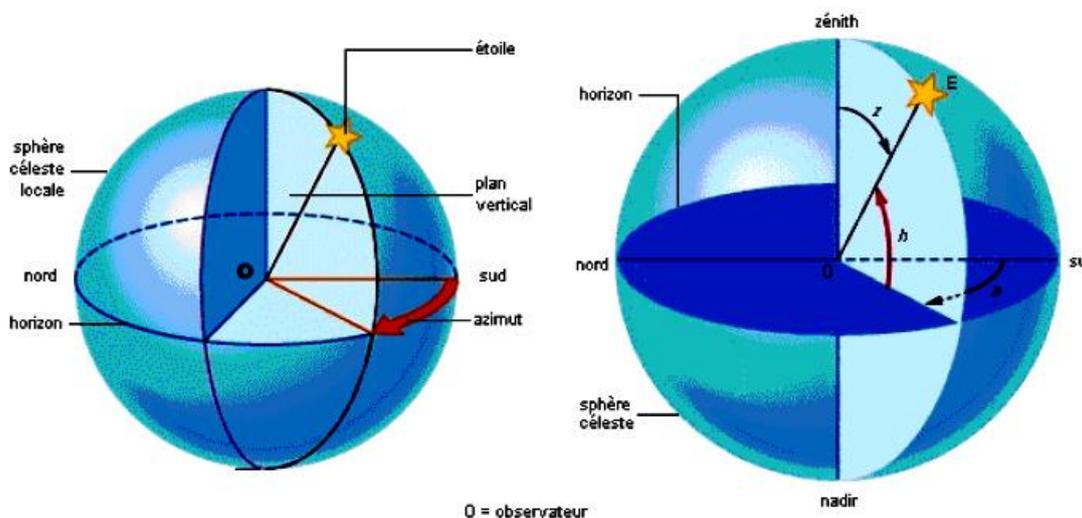


Figure (I.7) : Coordonnées célestes horizontales [12].

## VII. GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De par sa situation géographique [6] (Voir Figure I.8), l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme (Voir Figure I.9):

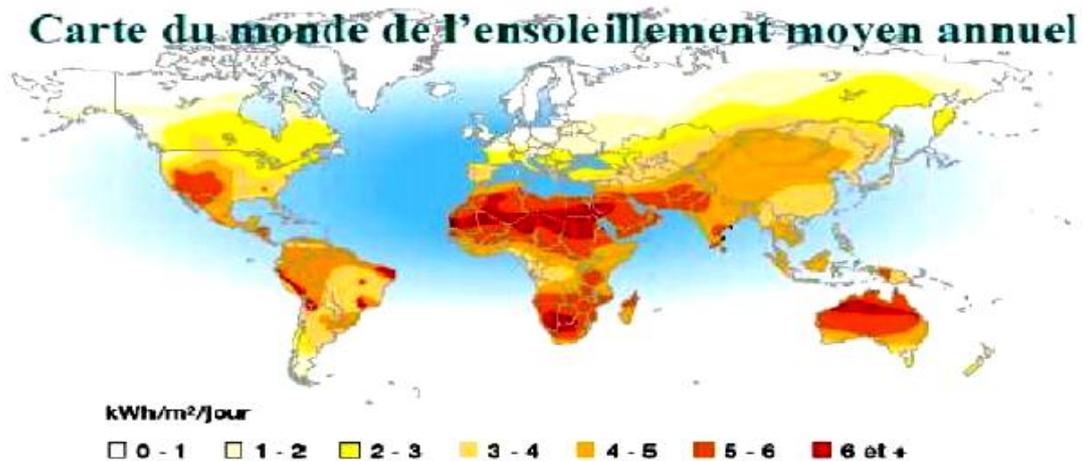


Figure (I.8) : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

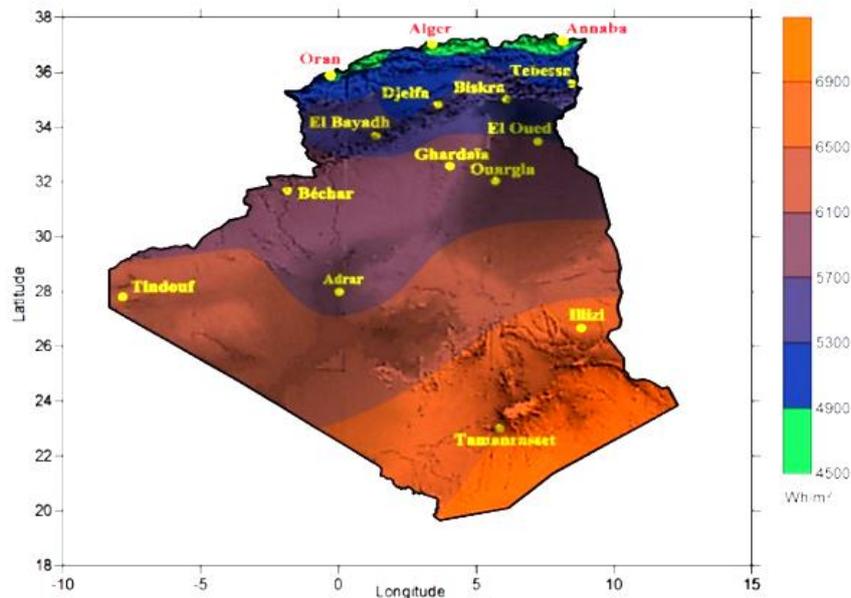


Figure (I.9) : Carte solaire de l'Algérie.

(<http://portail.cder.dz/spip.php?article3354>)

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire Algérien est représentée dans le tableau (I.3) selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau (I.3) : *Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques* [6].

La durée d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an, est la plus importante au monde ; elle est toujours supérieure à 8h/j et peut atteindre 12h/j pendant l'été, à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [6].

## VIII. CAPTEURS SOLAIRES

Le capteur solaire est une composante de base pour la plupart des équipements solaires. Le capteur solaire est un dispositif destiné à absorber les rayons du soleil pour les convertir en énergie solaire.

### VIII.1. Capteur solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires [13] convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ils sont composés de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont constituées de matériaux semi-conducteurs qui peuvent libérer leurs électrons sous l'action d'une énergie (ici l'énergie lumineuse). La libération des électrons des matériaux constituant les cellules sous l'action des photons permet ainsi la production d'un courant électrique.

### VIII.2. Capteur solaire thermique

#### VIII.2.1. Capteurs à concentration

Ces capteurs [14] utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.

Les trois principaux types de capteurs [13] à concentration se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires :

- **Collecteurs cylindro-paraboliques** : Sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.

- **Centrales à tour** : Sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installée une chaudière.
- **Collecteurs paraboliques** : Ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

### VIII.2.2. Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan [14] est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques :

1. Les effets de serre et du corps noir. Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30 à 150°C
2. Ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil.

#### VIII.2.2.1. Orientation d'un plan

L'orientation d'un plan [6] quelconque est définie par deux angles  $(\alpha, \gamma)$  :

- **Azimut du plan  $\alpha$**

C'est l'angle que fait la projection de la normale au plan sur le plan horizontal et la direction du sud.

- **Hauteur du plan  $\gamma$**

C'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal. L'inclinaison  $\beta$  du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{I.14})$$

### VII.3. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire (Voir Figure I.10) met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique :

1. Conduction,
2. Convection,
3. Rayonnement.

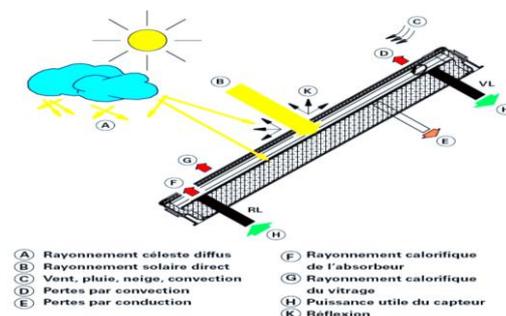


Figure (I.10) : différents modes de transfert thermique.

<http://www.confort-willem.be/techniquesolaire.html>

### VIII.3.1. Conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier [14] donnée par la relation :

$$q = -k * A * \overrightarrow{gradT} \quad (I.16)$$

Avec :  $q$  : Flux de chaleur [Watts].

$k$  : Coefficient de conductivité thermique [W/m K].

$A$  : Surface d'échange [m<sup>2</sup>].

Dans le capteur plan [14] les échanges par conduction existent principalement entre :

- ❖ Faces supérieures et inférieure de la vitre.
- ❖ Faces supérieures et inférieure de l'isolant.
- ❖ L'absorbeur et l'isolant.

### VIII.3.2. Convection

La convection [14] est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

On distingue deux types de convection :

1. **Convection forcée** : Le mouvement du fluide est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc).
2. **Convection naturelle** : Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation.

Le transfert thermique convectif [14] est régi par la loi de Newton :

$$q = h * S * (T_p - T_F) \quad (I.17)$$

Avec :  $q$  : Flux échangé par convection [Watts].

$h$  : Coefficient de convection [W/m<sup>2</sup>K].

$S$  : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide [m<sup>2</sup>].

$T_p$  : Température de la paroi solide [K].

$T_F$  : Température du fluide [K].

Dans un capteur plan [14] l'échange par convection s'effectue entre :

- Vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- Vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Tube et le fluide par convection libre.

- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

### VIII.3.3. Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement [14] a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement [14] est celle de Stefan-Boltzmann :

$$q = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (I.18)$$

Avec :  $q$  : Flux de chaleur émis par le corps [Watts].

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau [sans dimension (sans unité)].

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6.10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>].

$T$  : Température absolue du corps [K].

Dans un capteur solaire plan [14] le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel (rayonnement solaire direct arrive sur le plan ou les rayonnements diffus).
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

## IX. APPLICATION ET UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE

L'homme utilise l'énergie solaire depuis l'antiquité. Les utilisations de l'énergie solaire [15] n'ont de limites que celles du génie humain. Pour ne citer que quelques-unes de ses applications :

- Le chauffage et la climatisation de locaux à travers une architecture solaire,
- La création d'eau potable via la distillation,
- La désinfection,
- La domestication de la lumière du jour,
- l'Eau Chaude Sanitaire (ECS),
- La cuisson solaire,
- La production de chaleur haute température à des fins industrielles.

Pour collecter l'énergie solaire, le moyen le plus courant est d'utiliser des panneaux solaires. L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

1. La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques (conversion hélio- thermique),
2. Transformation en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques (conversion électrique).

Ces transformations [14] ont permis le développement de 2 filières (Voir figure I.11) d'exploitation :

1. Pour la chaleur : solaire thermique.
2. Pour l'électricité : solaire thermodynamique ou photovoltaïque

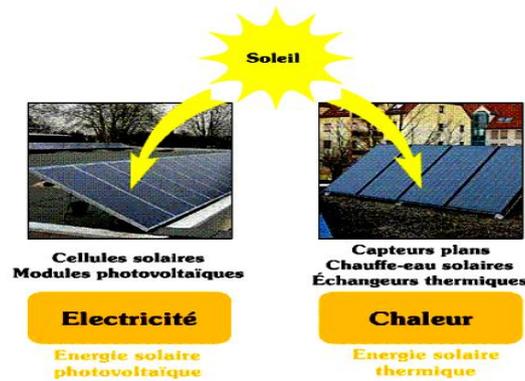


Figure (I.11) : Utilisation de l'énergie solaire.

(<http://lamaisonecolo.l.a.pic.centerblog.net>).

## IX.1. Énergie solaire passive

Comme le nom l'indique, les techniques [16] d'exploitation de cette forme d'énergie solaire ne font appel à aucun équipement mécanique ou électrique. Elles se produisent de façon passive.

### IX.1.1. Bâtiments solaires passifs

Le potentiel solaire thermique passif dans le domaine immobilier est important puisque, le chauffage représente près de 50 % des besoins en énergie des résidences et des commerces.

Cette utilisation du rayonnement solaire permet de réduire, la demande en énergie pour le fonctionnement d'une maison individuelle de 30 à 50 %.

La performance d'une habitation solaire passive [16] réside dans sa capacité à optimiser les quatre principes suivants :

- Capturer la chaleur du rayonnement solaire,
- l'emmagasiner à l'aide d'une masse thermique,
- La conserver par isolation,
- La redistribuer adéquatement.

## IX.2. Énergie solaire thermodynamique

### IX.2.2. Principe d'une centrale thermodynamique

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, met en œuvre soit des capteurs paraboliques ou cylindro-paraboliques, soit des centrales dites "à tour", pour lesquelles une multitude d'héliostats orientables concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur

une tour. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 1000 °C, selon les techniques employées. Ces fluides viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles [17].

Contrairement aux cellules photovoltaïques qui produisent directement de l'électricité, les centrales solaires thermodynamiques optimisent d'abord la captation thermique pour ensuite transformer cette chaleur en énergie mécanique et finalement en électricité.

Il existe plusieurs types de centrales à énergie solaire thermodynamique (Voir Figure I.12) :

- A capteur parabolique (1),
- A capteurs cylindro-paraboliques (2),
- A effet cheminée (3),
- A miroirs de Fresnel (4)
- A tour solaire ou à concentration solaire (5).

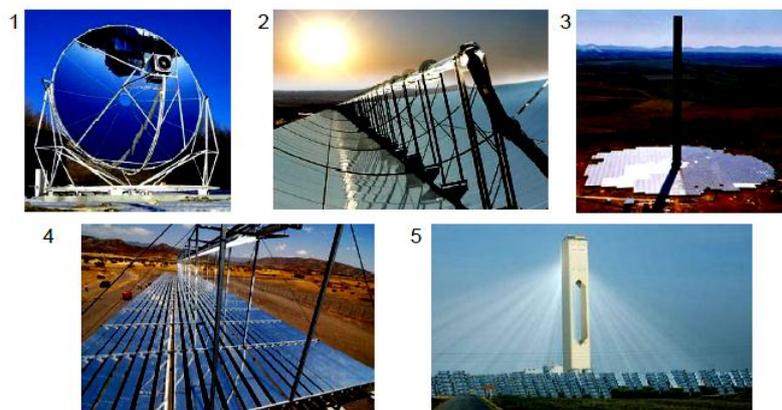


Figure (I.12) : Différents types de centrales solaires thermodynamiques [19].

### IX.2.2. Fonctionnement d'une centrale thermodynamique

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques repose sur la technique suivante :

1. Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
2. La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
3. La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.
4. L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

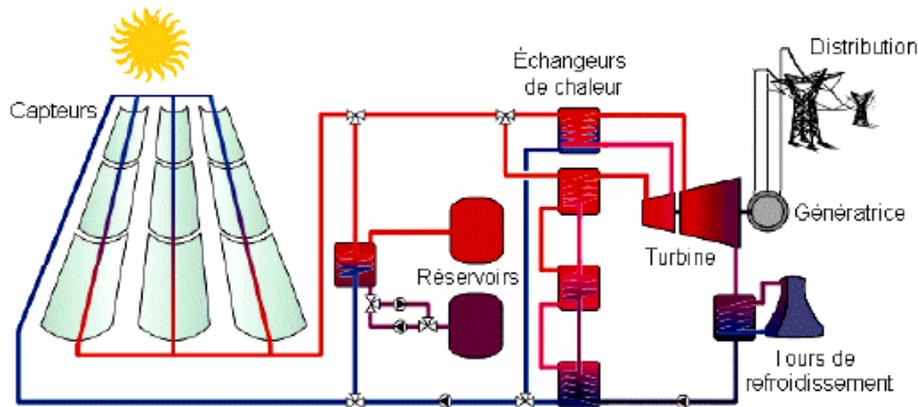


Figure (I.13) : Centrale solaire thermodynamique [19].

### IX.3. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque (Voir Figure I.14), cet effet a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel et théorisé en 1922 par Albert Einstein.

Cette énergie lumineuse arrache un ou plusieurs électrons aux atomes (silicium). Ces électrons, en se déplaçant, fournissent un courant ou une tension électrique.

Plusieurs de ces cellules (convertisseur) sont reliées entre-elles sur un panneau photovoltaïque. Ces panneaux peuvent être utilisés individuellement pour charger une batterie et pour répondre aux besoins en électricité des particuliers, ou à plus grande échelle, dans des centrales photovoltaïques pour alimenter le réseau de distribution publique [18].

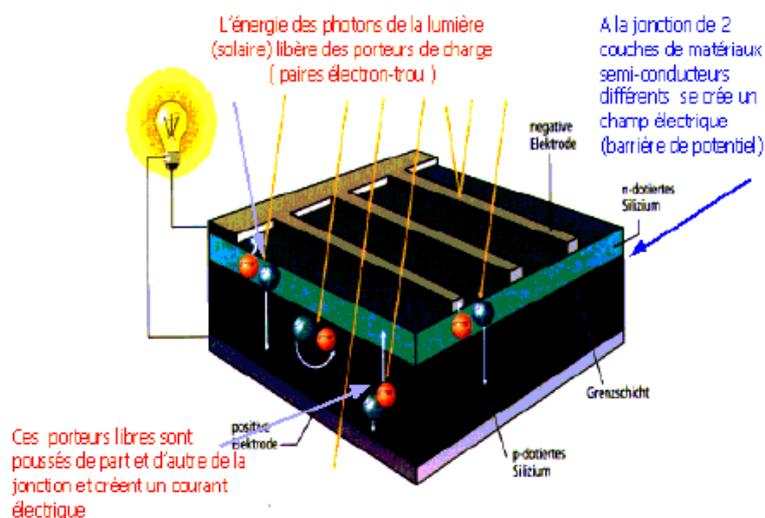


Figure (I.14) : Fonctionnement d'une cellule solaire.

(<http://www.alterenergies.fr/photo/cellulesolaire.gif>)

## IX.4. Energie solaire thermique

Le solaire thermique [18] consiste à utiliser des capteurs solaires afin de capter l'énergie du rayonnement solaire à l'intérieur d'un liquide, parfois de l'air mais le plus souvent dans de l'eau. Grâce à cela, nous pouvons utiliser l'énergie récupérée dans la production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire), chauffage de piscines et d'habitations ainsi que le séchage de céréales.

### IX.4.1. Chauffe-eau solaire

C'est certainement la production d'eau chaude domestique qui est l'application la plus connue dans le domaine du solaire thermique actif.

Les panneaux solaires utilisent le même principe que les tuyaux enroulés sur les cabanons pour chauffer l'eau d'une piscine.

Il est généralement composé des éléments suivants :

- Les capteurs solaires,
- La tuyauterie isolée,
- Le réservoir de stockage d'eau chaude avec échangeur de chaleur,
- La pompe,
- Le régulateur.

Les capteurs absorbent l'énergie du rayonnement solaire (Voir Figure I.15) et la transmettent au fluide caloporteur ; ce fluide circule en boucle fermée dans les capteurs et à travers la tuyauterie isolée jusqu'au réservoir d'eau chaude

Un serpentin y joue le rôle d'échangeur de chaleur, permettant au fluide de céder sa chaleur, sans contact direct, à l'eau domestique qui sera ainsi préchauffée. Tant que la température du fluide caloporteur est suffisamment élevée, le régulateur active la pompe électrique pour recommencer le cycle. Dépendant de la configuration du système, un apport supplémentaire d'énergie peut augmenter la température de l'eau directement dans le réservoir de stockage.

L'eau préchauffée peut également être transférée dans un second chauffe-eau, traditionnel celui-là, où un apport de chaleur peut être fourni, en cas de besoin, par un élément électrique ou par la combustion de gaz naturel [17].

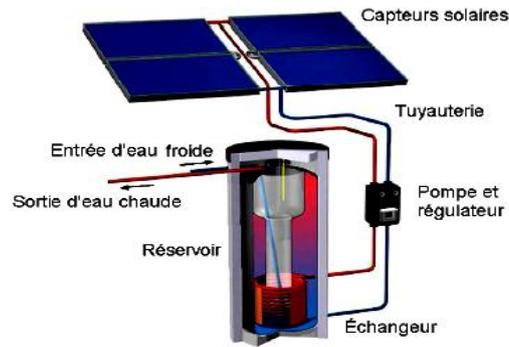


Figure (I.15) : *Système de capteurs solaires et réservoir d'eau chaude [17].*

#### IX.4.2. Distillateur solaire

Le distillateur solaire [19] a été utilisé dès 1872 dans les mines de nitrates du nord du Chili. Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer.

Son fonctionnement repose une fois de plus sur l'effet de serre :

- Le rayonnement solaire chauffe la membrane noire au fond du bassin. Celle-ci émet des infrarouges qui chauffent l'eau salée. L'eau s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes d'eau).
- Le sel reste donc sur la membrane noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite jusque dans les goulottes. On récupère ainsi l'eau filtrée dans ces goulottes.

#### IX.4.3. Production du froid

Le principe de base de la production de froid consiste à prélever de la chaleur sur un milieu à refroidir (air ou eau), appelé source chaude et à la transférer vers un milieu extérieur (eau ou air extérieur) qui est réchauffé (source froide).

Ce transfert d'énergie est réalisé par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène soumis en continu à un cycle thermodynamique de succession de changements d'états vapeur/liquide.

#### IX.4.4. Séchage solaire

Le séchage [9] est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau.

Cette opération est indispensable dans le processus de conservation des matières tels que :

- Les denrées agroalimentaires,
- Le fourrage animal,
- Les céréales ou le bois.

Ces matières mettent en jeu un transfert de chaleur (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide) et un transfert de masse (le liquide imprégnant le solide passe à

l'état de vapeur dans l'air asséchant). Le séchage solaire permet à la fois de respecter l'environnement et d'améliorer la qualité des productions.

## **X. CONCLUSION**

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de la terre, c'est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, cette énergie étant de l'ordre de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'utilisation de cette énergie peut se faire de trois manières: énergie thermique, énergie thermodynamique et l'énergie photovoltaïque.

Dans cette étude, un récapitulatif de quelques notions de base relatif au gisement solaire, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement, la connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire pour le séchage des produits agro-alimentaires.

# **CHAPITRE II**

## **Le séchage solaire et ces applications**

## I. INTRODUCTION

Le séchage est une opération permettant d'éliminer ou bien évaporer le solvant (généralement l'eau) qui se trouve à l'intérieur du produit humide, cette opération est assurée par plusieurs méthodes par exemple : l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolée thermiquement pour assurer l'opération de séchage [20].

Au cours de cette opération, différentes transformations physico-chimiques (modification structurale, dégradations des constituants organiques, etc.) peuvent avoir lieu au sein du produit. En agro-alimentaire, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher.

Il existe plusieurs critères [20] pour classer les séchoirs solaires ; parmi les méthodes les plus importantes on peut citer le séchage direct et le séchage indirect.

Parmi les produits agro-alimentaires les plus utilisés et consommés, il y a la tomate ; après la saison de récolte on voit qu'il ya parfois un excès de production, donc le séchage est une bonne solution pour conserver cette excès de production.

Ce chapitre est consacré à la présentation des paramètres essentiels qui gouvernent le phénomène de séchage, les différentes théories de séchage, les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide enfin une présentation des différents types de séchoir utilisé.

## II. TOMATE

Le nom tomate vient de l'Espagnol tomate ; c'est un mot universel utilisé dans de nombreuses langues avec de faibles variations phonétiques et orthographiques.

La tomate de nom scientifique (*Lycopersicon esculentum*) est l'un des produits les plus importants dans l'alimentation humaine, qui se consomme frais ou transformé. La tomate est devenue un élément incontournable de la gastronomie de nombreux pays. La plante est cultivée en plein champ ou sous serre, sous presque toutes les latitudes. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentré, de sauce, notamment le ketchup, de jus et de conserve. Compte tenu de son importance économique, elle est l'objet de nombreuses recherches scientifiques et elle est considérée parmi les produits agricoles les plus commercialisés au monde.

La tomate (Voir Tableau (II.1)) est un produit contenant des composés bénéfiques pour la santé ; c'est une source de caroténoïdes et d'acide ascorbique (vitamine C). Elle nous fournit aussi du fer, potassium, et vitamine B ; elle est une bonne source de fibres diététiques.

Elle contient environ 93% d'eau ; cette large quantité d'eau qu'elle contient la rend périssable ; la composition chimique de la tomate dépend des conditions de culture, du degré de maturité et des conditions environnementales où elle est cultivée [9].

Valeur calorifique	17kcal	Vitamine E	0,9 mg	Zinc	0,15 mg
Eau	94,2 g	Calcium	8,9 mg	Fibre	1g
Protide	0,95 g	Fer	0,31 mg	Chlore	30 mg
Lipide	0,21 g	Potassium	235mg		
Provitamine A	0,6 mg	Magnésium	11 mg		
Vitamine B <sub>1</sub>	0,06 mg	Sodium	3,3 mg		
Vitamine B <sub>2</sub>	0,04 mg	Phosphore	22 mg		
Vitamine C	19 mg	Glucide	2,6 g		

Tableau (II.1) : Valeur nutritionnelle de 100g de tomate.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Tomate>.

Le séchage naturel de la tomate [9] est une méthode traditionnelle pour conserver l'excès de production des produits agricoles après la récolte. Néanmoins cette méthode a prouvé ses limites, car l'opération se fait avec un temps de séchage important qui peut porter préjudice à la qualité du produit séché d'autant plus que cette qualité est intimement liée aux conditions climatiques et est sujette à la contamination par les animaux.

### III. Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, devant être éliminé au cours du séchage.

#### III.1 L'humidité absolue (X)

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau [9]; représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau ( $m_{v,e}$ ) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec ( $m_{a,s}$ ) contenue dans ce même volume.

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

Avec :  $m_{v,e}$  : Masse de la vapeur d'eau [kg].

$m_{a,s}$  : Masse d'air sec [kg].

### III.2 L'humidité relative( $\varphi$ )

L'humidité relative ( $\varphi$ ) [9] est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air ( $P_v$ ) et la pression de saturation ( $P_{s,\theta}$ ) à la température  $\theta$ .

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

En pratique, on utilise beaucoup plus de l'humidité absolue ( $X$ ) que l'humidité relative ; par conséquent on donne le rapport entre l'humidité absolue ( $X$ ) de l'air pour une certaine température  $\theta$  et l'humidité absolue ( $X_s$ ) correspondante à l'état de saturation pour la même température  $\theta$ ; rapport appelé degré de saturation  $\Psi$  [9].

$$\psi = \frac{X}{X_s} \quad (\text{II.3})$$

### III.3. Caractéristiques des solides humides

#### III.3.1. Humidité absolue

L'humidité absolue d'un solide [9] appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.4})$$

#### III.3.2. Humidité relative

L'humidité relative d'un solide [9] 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.

$$\varphi = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{II.5})$$

## IV. Formes d'eau dans les aliments

L'eau dans un aliment [9] peut généralement se présenter sous trois formes :

### 1. Eau d'hydratation

L'eau d'hydratation est retenue soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide ou dans les espaces interstitiels et les pores par des forces de capillarité liées à la tension superficielle du liquide cette eau est appelée "eau libre"; si elle est retenue d'une façon plus intime, par des forces de cohésion plus importantes avec la matrice solide et/ou avec les autres molécules d'eau; cette eau est appelée "eau liée".

### 2. Eau de constitution

L'eau de constitution participe à la structure moléculaire intime du solide, comme par exemple l'eau contenue dans les gels. Son élimination, plus ou moins complète, constitue

une déshydratation et modifie la structure même du solide. La déshydratation est accompagnée d'une modification de la structure moléculaire primitive du produit.

### 3. Vapeur d'eau

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

## V. CINETIQUE DE SECHAGE

Le séchage peut être suivi graphiquement de différentes façons [12], (Voir Figure II.1).

1. Le premier graphique (I) : montre l'évolution en fonction du temps du taux d'humidité du solide  $X$  (rapporté à la matière anhydre).
2. Le deuxième graphique (II) : Présente la vitesse de séchage (c'est-à-dire la quantité d'eau enlevée par kilogramme de matière sèche et par unité de temps) en fonction du taux d'humidité du solide  $X$ .
3. Le dernier graphique (III) : donne l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

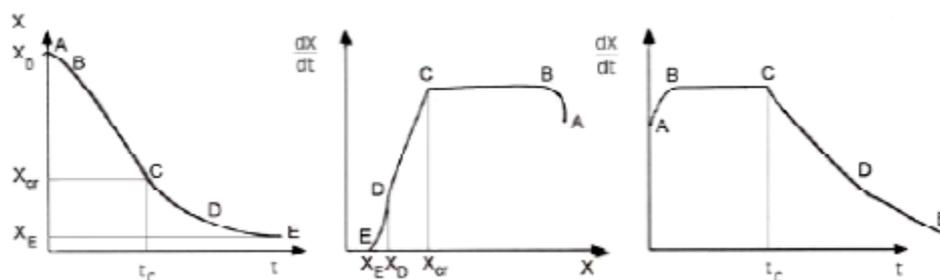


Figure II.1 : caractéristiques des courbes de séchage [12].

Les évolutions de la teneur en eau et de la vitesse de séchage [12] d'un solide humide exposé à un flux d'air aux caractéristiques constantes (Vitesse, Température et Humidité), présentent trois parties distinctes montrant chacune une phase différente du processus :

- phase 1 : phase transitoire, de mise en régime thermique (Figure II.1, AB),
- phase 2 : phase de séchage à vitesse constante (Figure II.1, BC),
- phase 3 : phase de séchage à vitesse décroissante (Figure II.1, CE).

### V.1 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique du séchage

#### V.1.1 Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence [21] est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température.

### **V.1.2. Influence de la vitesse de l'air**

La vitesse de l'air [21] agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

### **V.1.3. Influence de l'humidité de l'air**

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence [21] est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente.

## **V.2. Temps de séchage**

Il dépend de l'ensoleillement, de l'humidité de l'air et de l'épaisseur des aliments ; plus les aliments sont épais plus le temps de séchage sera long. De manière générale, les plantes sécheront plus rapidement (quelques heures) que les fruits plus juteux (plusieurs jours).

Pour savoir si les aliments sont bien secs, on peut les disposer dans un sac plastique fermé et les laisser durant une journée dans un endroit abrité et sec. Si de la condensation s'est créée, les aliments ne sont pas encore secs, il faut les replacer dans le séchoir.

## **VI. QUALITE DES PRODUITS SECS**

### **VI.1. Modification biochimique**

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique.

Ces modifications, généralement considérées comme indésirables sont nombreuses. Mais les plus importantes [21] sont les suivantes :

- Réaction de MILLARD : brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides,
- Rancissement : oxydations des matières grasses,
- Destruction de vitamine,
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant,
- Réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement  
Préalable : oxydation des polyphénol qui entraîne par exemple un brunissement des produits séchés.

## VI.2 Pertes d'aromes

Le séchage est un procédé de séparation [21] basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas il s'agit des aromes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

## VI.3 Pertes de la couleur du produit

L'étude de noircissement des feuilles de certaines plantes pendant le séchage a révélé que la couleur verte de ces feuilles est maintenue à condition que le séchage s'effectue à une température inférieure ou égale à 55°C [21].

## VI.4. Modifications physiques et mécaniques des produits secs

Le séchage provoque [21] chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- La migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être en général être consommé réhydrate,
- La fusion et migration des matières grasses,
- Les modifications de la forme : En règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui même.

Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

## VII. DOMAINE D'UTILISATION DE SECHAGE

Si le séchage consomme autant d'énergie c'est qu'il intervient dans de nombreuses industries. Les produits concernés nous touchent souvent de près dans la vie de tous les jours.

Le choix d'une opération de séchage [12] peut être effectué pour diverses raisons :

- Le produit humide se conserve mal.
- Le liquide doit être enlevé pour le déroulement de la suite du procédé.
- L'enlèvement de l'eau donne la texture et structure finale du produit et constitue une étape à part entière du procédé.
- Le coût du transport est plus élevé en présence de liquide.

Toutefois, vu le haut coût énergétique du séchage, celui-ci n'est généralement réalisé que lorsque des techniques moins coûteuses, essentiellement mécaniques, ont atteint leur performance maximale.

### **VII.1. Industrie agroalimentaire**

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou avoir un rôle dans la conservation de l'aliment.

On peut citer [12] par exemple :

- Pâtes alimentaires,
- Viande fumée: Saucisson,
- Fromages : Séchage dans une ambiance contrôlée,
- Sucre cristallisé est obtenu par évaporation,
- Légumes (pois...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots...).
- Certains biscuits apéritifs sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs,
- Jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation,
- Sel (gisement minier) est concassé, dissous, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné,
- Conservation de beaucoup de types de céréales ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices,
- Certains produits en poudre: Cacao, lait...

### **VII.2. Industrie du bois**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans des conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois. Aussi le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés [12].

Afin de garantir le meilleur vieillissement des vins, une attention toute particulière est portée à la qualité des bouchons de liège. Au cours de leur fabrication, l'opération de séchage doit être parfaitement maîtrisée, au risque de donner un goût de moisi au vin.

### **VII.3. Biotechnologie et industrie pharmaceutique**

- Levure en poudre,
- Antibiotiques,
- Séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage.

### **VII.4. Matériaux de construction**

- briques, carrelages,...

## VIII. DIFFERENTS MODES DE SECHAGE

### VIII.1 séchage par convection ou par entraînement

Il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques.

Pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité) [22].

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection [22] est un mode de transfert rapide.

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « *artificiel* » (ventilation, pompage d'un fluide,...), on parle de « *convection forcée* ».
- Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « *naturelle* ».

Ce type de transfert est régi par l'équation suivante :

$$q = h * S * (T_p - T_F) \quad (\text{II.6})$$

Avec :  $q$  : Quantité de chaleur transférée par unité de temps [W].

$S$  : Surface d'échange [m<sup>2</sup>].

$T_p$  : Température de la paroi solide [K].

$T_F$  : Température du fluide [K].

$h$  : Coefficient d'échange par convection [W. m<sup>-2</sup>. k<sup>-1</sup>].

### VIII.2. Séchage par conduction

Le produit se trouve en contact avec une paroi conductrice de chaleur qui est chauffée par un fluide caloporteur (air, eau, gaz et vapeur d'eau). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise. La vapeur formée est entraînée par action d'un léger courant de gaz auxiliaire ou par dépression.

Ce type de séchage est donc très intéressant lorsque l'on désire réduire la quantité d'effluents gazeux rejetés.

Le transfert de chaleur par conduction [9] assure le passage de l'énergie vers les couches internes du produit selon la loi de Fourier :

$$\phi_{cond} = -\lambda * S_p \frac{dT_p}{dx}. \quad (II.7)$$

$\phi_{cond}$  : Flux de chaleur transmis par conduction [W].

$S_p$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur [m<sup>2</sup>].

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

$\frac{dT_p}{dx}$  : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit [K/m].

### VIII.3. Séchage par rayonnement

Ce mode de séchage [22] est destiné aux produits en plaque (carton, viande) ou en film (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faible épaisseur (1 à 2 cm). L'énergie est apportée au produit à sécher par des ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques, soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Suivant la longueur d'onde ou la fréquence des radiations émises, on distingue les infrarouges et les radiofréquences.

Le flux thermique est donné par la relation suivant :

$$Q = \sigma * \varepsilon_p * S (T_p^4 - T_\infty^4). \quad (II.8)$$

Avec :  $Q$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W].

$\sigma$  : Constante de Stephan [5,67 10<sup>-8</sup> W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-4</sup>].

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface [-].

$T_p$  : Température de la surface [K].

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface [K].

$S$  : Aire de la surface [m<sup>2</sup>].

#### VIII.3.1. Séchage par rayonnement infrarouge

Les radiations infrarouges sont des radiations comprises entre les longueurs d'onde 0,72 et 20  $\mu$ m. La technique de séchage par radiation infrarouge s'effectue le plus souvent dans l'industrie, les matériaux soumis au séchage, absorbent les radiations infrarouges et les transforment pour dégradation énergétique.

Ces radiations sont généralement émises par des lampes à incandescence émettant un taux de radiation infrarouge important où à filament de Magnésium ou de Tungstène. Le facteur d'absorption constitue une caractéristique de chaque corps et dépend de l'état de sa surface.

Les rayons IR ont une profondeur de pénétration dans le produit généralement limitée à quelques millimètres, réalisant un chauffage de la surface « éclairée » par la source. À l'intérieur d'un produit épais, cette chaleur va ensuite pénétrer par conduction. Les IR permettent éventuellement des densités de flux d'énergie transmise au produit très élevées, comparées à la convection dans l'air [23].

### VIII.3.2. Séchage par rayonnement micro-ondes et hautes fréquences

Le rayonnement électromagnétique dit par « micro-ondes » correspond au domaine de fréquence de 0,3 à 3 GHz. Le facteur d'absorption  $\epsilon'$  du produit pour ce type de rayonnement dépend de la fréquence utilisée et de la teneur en eau du produit. La puissance réellement transmise au produit est plus souvent constatée que prévue, car elle dépend beaucoup du couplage entre la source (générateur) et la cible (le produit), ce couplage variant avec la teneur en eau du produit qui évolue au cours du séchage, avec la taille ou la masse du produit présent dans l'enceinte, sa température, sa géométrie, sa position dans l'enceinte...

Le rayonnement micro-ondes a une profondeur de pénétration nettement plus grande que les IR, de l'ordre de quelques centimètres, ce qui permet une « génération » de chaleur à l'intérieur du produit humide. Cela justifie l'utilisation des micro-ondes pour sécher un produit massif épais en complément du séchage par air chaud, qui ne chauffe le produit qu'à partir de la surface externe (en l'absence de micro-ondes). Le rayonnement dit « hautes fréquences HF » correspond au domaine de fréquences 3 à 30 MHz, réputé plus pénétrant dans le produit [23].

## IX. DIFFERENTS TYPES DES SECHOIRS SOLAIRES

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires [24] développés pour le séchage des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité.

On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs lorsque la matière à sécher reçoit directement l'énergie solaire, soit les séchoirs indirects lorsque l'énergie solaire est captée par un dispositif appelé généralement capteur solaire qui permet alors de préchauffer l'air qui sera ensuite envoyé vers les produits à sécher.

La chaleur ainsi apportée au produit va diffuser à l'intérieur de celui-ci qui verra alors sa température augmenter, l'eau contenue dans le produit va migrer du produit vers la surface puis s'évaporer. Afin d'éviter que l'humidité reste dans l'air ambiant, un renouvellement de l'air est alors réalisé soit par un écoulement d'air naturel ou forcé.

### IX.1. Séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant.

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir [22] est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont :

- Pertes du produit mal séché ou gâchés lors du remuage,
- Destruction de vitamines,
- Dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

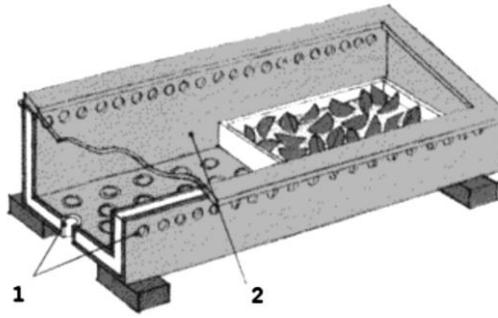
### IX.2. Séchoirs solaires directs

Le séchage solaire direct (Voir Figure II.2), utilise les rayons directs du soleil pour sécher les aliments. Il est simple à réaliser. Il nécessite par exemple une boîte en bois ou en carton, trouée en bas et en haut pour laisser l'air froid entrer par le bas et l'air chaud sortir par le haut. Cette boîte contient les claies où seront séchés les aliments, et elle est recouverte d'une vitre pour augmenter l'effet de serre.

Ce type de séchage [22] présente deux avantages :

1. Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
2. 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, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels.

Toutefois on note une évolution dans ce mode de séchage [24] qui consiste à placer cette fois-ci les produits à sécher dans une enceinte de séchage qui peut être en verre, en métal ou en bois tout en assurant une circulation d'air grâce à des ouvertures bien positionnées.



1. Trous d'aération (pour qu'il n'y ait pas de condensation).
2. plaque de verre ou de plastique transparent.

Figure (II.2) : *Séchoir solaire direct* (Source : [www.Ekopedia.fr](http://www.Ekopedia.fr)).

### IX.3. Séchoirs solaires indirects

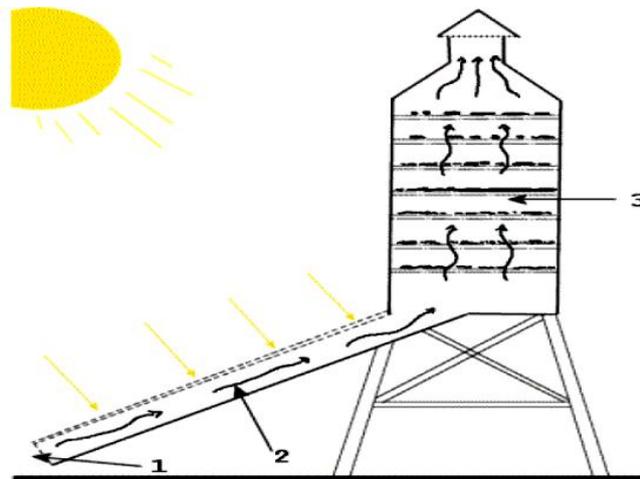
Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher.

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 [22].

Le séchage solaire indirect (Voir figure II.3), permet de sécher les fruits, les plantes grâce au soleil sans que les rayons du soleil atteignent directement ce qui est séché ; ainsi la couleur, le goût et les propriétés du fruit ou de la plante sont conservées (vitamines, matières nutritives) [24].

Dans ce cas, le séchoir comprend deux parties,

1. Une partie constituée d'un capteur solaire qui préchauffe ainsi l'air de séchage.
2. Une deuxième partie qui constitue la chambre de séchage.



1. Entrée d'air
2. insolateur plan
3. claies
4. cheminée

Figure (II.3) : *schéma d'un séchoir solaire indirect* [9].

#### IX.4. Séchoirs solaires tunnels

Dans un séchoir tunnel (Voir figure II.4), il y a sur la longueur du séchoir, une succession d'états de température et d'humidité.

Ils sont tous à ventilation mécanique, soit à l'aide d'un simple ventilateur, placé en dehors du séchoir, soit par des ventilateurs multiples placés à l'intérieur de celui-ci.

Il existe des séchoirs tunnels [22], non seulement pour les industries du bois mais aussi pour le séchage de peinture, de vernis, et le séchage avant cuisson des produits céramiques (tuiles, briques, poteries culinaires, assiettes, etc.).

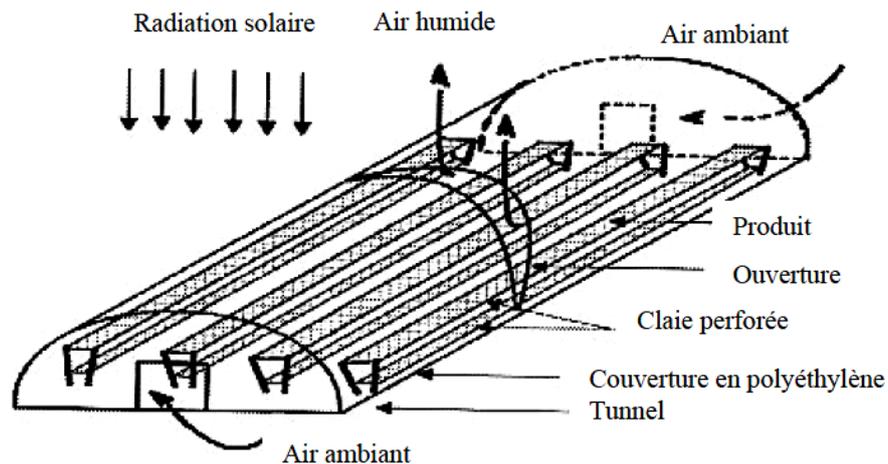


Figure (II.4) : Séchoir solaire tunnel [25].

#### IX.5. Séchage par convection

Lorsqu'un produit humide est placé dans une enceinte en présence d'air chaud et sec, des différences de température et de pression partielle vont se créer entre le produit et l'air. On peut alors observer :

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet d'un gradient de température.
- Un transfert de matière (eau) du produit vers l'air sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau [24] est égale à celle apportée par l'air chaud on dit que le séchage est isenthalpique. Cet air chaud peut être assimilé à un gaz et les propriétés thermophysiques qui le constituent lui permettent d'être un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée. Lorsque cet écoulement d'air peut se faire de manière naturelle on parle alors de convection naturelle, mais parfois l'ajout de ventilateurs permet de passer de la convection naturelle à la convection forcée.

### IX.5.1. Séchoirs à convection naturelle

Le séchage par convection naturelle [9] utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher.

Les trous d'aération doivent être réalisés en haut et en bas de l'espace de séchage pour permettre une circulation d'air par convection, mais celle-ci est très limitée. Le problème majeur de ces séchoirs malgré leur faible coût de fabrication est qu'ils sont inadaptés à l'application industrielle.

En effet, les quantités de produit à sécher [25] sont souvent faibles de 10 jusqu'à 20kg en raison de la circulation d'air limitée et les produits à sécher sont essentiellement des produits agricoles, des fruits, des herbes.

### IX.5.2. Séchoirs à convection forcée

Le fluide asséchant [9] est forcé par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement la convection forcée (Voir Figure II.5) l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du séchage.

Cette classe de séchoir solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacué rapidement et de façon continue.

Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, et nécessite un approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur.

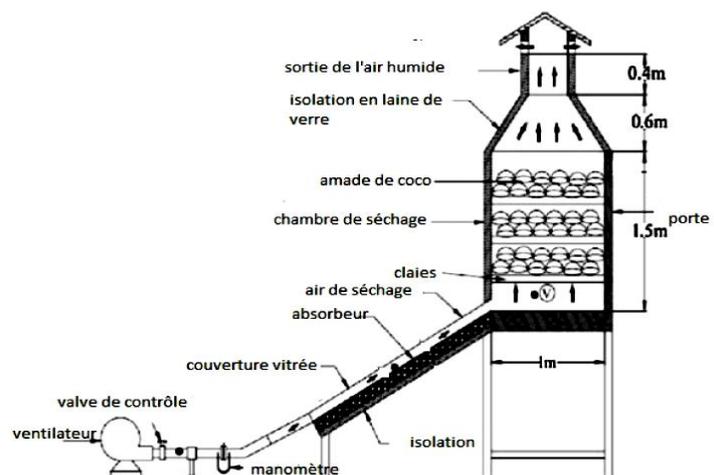


Figure (II.5) : Séchoir à convection forcée [24].

## IX.6. Séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects [9]. Dans ce type de séchoir, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

## IX.7. Séchoirs solaires hybrides

Dans ce type de séchoir hybride [9] (Voir Figure II.6) on utilise une des sources d'énergie auxiliaires (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermorégulateurs.

Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit.

Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, et nécessite un approvisionnement local en électricité, gaz, pièces de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance.

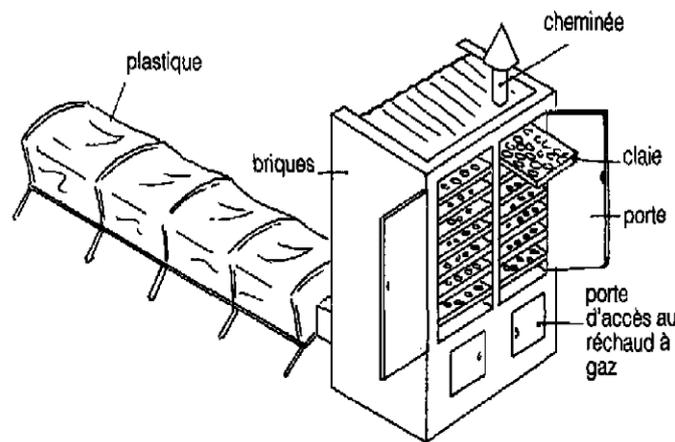


Figure (II.6) : Séchoir solaire hybride solaire gaz [9].

## X. EVALUATION DES SECHOIRS SOLAIRES

Les paramètres généralement reportés lors de l'évaluation d'un séchoir [9] se résument comme suit:

### X.1. Caractéristiques physiques du séchoir

- Type, forme et dimension du séchoir,
- Capacité du séchage/ densité de charge,
- Surface de la claie et nombre de claies (applicable),
- Convenance de la charge et décharge des produits.

## X.2. Performances thermiques

- Temps de séchage et vitesse de séchage,
- Température et humidité de l'air asséchant,
- Flux de l'air asséchant,
- Efficacité du séchoir.

## X.3 Qualité du produit séché

- Qualités organoleptiques (couleur, saveur, goût, arôme, texture),
- Eléments nutritifs,
- Capacité de réhydratation.

## XI. CHOIX DU SECHOIR

La sélection d'un séchoir doit d'abord tenir compte du comportement mécanique du produit initial (liquide/solide/fragile, etc.) et de la forme du produit final (poudre, paillettes, morceaux, etc.), de sa sensibilité à la chaleur, des modes de manipulation, des débits à traiter, de l'énergie disponible, etc.

### XI.1 Choix du séchoir indirect à convection forcée par rapport aux autres procédés

Une étude comparative, relevant les avantages et les inconvénients entre les différents types de séchoirs solaires qui a été faite dans le Tableau (II.2)

Séchoirs	Avantages	Inconvénients
Naturel	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ils utilisent directement le soleil et l'air</li> <li>2. Procédé simple et non coûteux.</li> <li>3. N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Intervention humaine pour protection ou ramassage du produit en cas de pluie,</li> <li>2. Malaxages fréquents, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure.</li> <li>3. Destruction de vitamines, dégradation par les intempéries et les insectes nuisibles</li> <li>4. Longue durée du séchage (possibilité de moisissures).</li> </ol>
Direct	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Il est simple à réaliser.</li> <li>2. les produits sont mieux protégés</li> <li>3. ils sont soumis à un effet de serre, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher,</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. les conditions de séchage changent</li> <li>2. Beaucoup de produits sont détruits par : contamination par la saleté,</li> <li>3. le séchage prend un temps important.</li> </ol>

Indirect	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Le produit à sécher est protégé dans une enceinte,</li> <li>2. Un capteur assure le réchauffement de l'air</li> <li>3. La conservation des propriétés du produit</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. les conditions de séchage changent</li> <li>2. le séchage prend un temps long.</li> </ol>
Convection naturelle	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Coût moins cher.</li> <li>2 Protection du produit.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Quantité de produit à sécher est faible</li> <li>2. Circulation d'air limitée,</li> <li>3. Le séchage prend un temps important.</li> </ol>
Convection forcée	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La cinétique de séchage est plus élevée,</li> <li>2. Une meilleur contrôle de l'opération de séchage.</li> <li>3. L'augmentation de pouvoir évaporateur</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cout élevé</li> <li>2. Nécessite un approvisionnement local en électricité.</li> </ol>

Tableau II.2 : *Avantages et inconvénients de chaque type de séchoir solaire.*

L'étude dénote que le séchage indirect à convection forcée est plus attractif que d'autres types de séchage solaire pour les avantages suivants:

- **Consommation énergétique** : Est importante parce qu'on utilise un ventilateur allumé par une source électrique.
- **L'incidence du rayonnement solaire sur le produit** : n'est pas direct, ce qui évite des dommages thermiques localisés et la caramélisation.
- **La sauvegarde de la qualité aromatique du produit.**
- **Maîtrise et maintient les paramètres aérothermiques** constants lors de l'opération de séchage, car dans le séchage à convection forcée nous pouvons contrôler le débit d'air.
- **Mode de fonctionnement du séchoir « discontinu »** : Le séchoir indirect à convection forcée assure le fonctionnement pendant le jour c'est-à-dire pendant les heures d'ensoleillement ce qui permet la protection du produit et évite la surchauffe.
- **La cinétique de séchage** : Ce présent séchoir avait l'avantage d'avoir une vitesse de séchage plus grande que dans les autres types de séchoirs à cause du ventilateur, donc le produit à sécher dans une durée très importante.
- **La structure du produit « Tomate »** : La teneur de 94,2 g d'eau dans 100g de tomate nécessite un débit d'air constant assuré par le ventilateur.
- **Le mode d'apport de chaleur** : dans le séchoir solaire indirect à convection forcée, la conduction et la convection, permettent un grand échange thermique avec le produit.

- **Temps d'utilisation de l'appareil** : Le gisement solaire de notre pays « Algérie » et plus particulièrement Tlemcen qui dispose d'une grande densité d'énergie solaire, ne nécessite pas une source d'énergie d'approvisionnement pour le séchage pendant la nuit.
- **Le séchoir indirect assure des grandes températures** dans l'enceinte où nous plaçons notre produit, à cause de la couche transparentes.
- **La quantité de produit séché** par jour ou par opération est très importantes ce qui est dû à la grande capacité de l'enceinte et au débit d'air constant assurant la convection forcée.

## XII. CONCLUSION

Le choix d'une technologie ne repose pas exclusivement sur les cinétiques de séchage et sur les propriétés à l'équilibre thermodynamique du matériau mais doit d'abord tenir compte du comportement mécanique du produit initial (liquide/solide/ pompable, fragile, etc.) et de la forme du produit final (poudre, paillettes, morceaux, etc.), de sa sensibilité à la chaleur, des modes de manipulation, des débits à traiter, de l'énergie disponible, etc. Donc Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

Nous avons fait une étude comparative qui relève les avantages et les inconvénients entre les différents types de séchoirs solaires ; le résultat nous permet de conclure que le séchage indirect à convection forcée est le meilleur choix pour notre étude.

# **CHAPITRE III**

## **Optimisation d'un système de séchage solaire**

## I. INTRODUCTION

Le séchage consiste à diminuer l'activité de l'eau des produits séchés jusqu'à une valeur assurant leur conservation. Le processus doit respecter certains critères de qualité liés au produit tout en garantissant, pour la chaîne de production, une cadence et un coût raisonnables.

De nombreux modèles mathématiques empiriques ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires.

Le but du modèle est de déterminer l'évolution de la teneur en eau du produit à sécher en fonction du temps en tenant compte des principaux paramètres aérothermiques (température, hygrométrie et débit massique de l'air asséchant)

Dans le secteur agroalimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération de séchage [9]. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché.

Les cinétiques de séchage de tomate sont étudiées, à l'aide d'un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée. Les différents essais consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, humidité de l'air, débit) sur le processus de séchage.

Dans ce chapitre, nous allons décrire une modélisation de notre système avec une étude de l'influence des différents paramètres tels que la température et le débit d'air sur le processus du séchage.

## II. CHOIX ET DESCRIPTION DU SYSTEME

Le système étudié, présenté sur la figure (III.1) est un séchoir indirect à convection forcée. Il est constitué des éléments suivants :

### ➤ Une unité de production d'air chaud

Constitué d'un capteur solaire plan à air dont la configuration est parallélépipédique de surface  $1\text{m}^2$ , à simple circulation et à simple vitrage transforme le rayonnement solaire en énergie thermique qui permet de chauffer l'air dans la partie comprise entre la vitre et la plaque absorbante à des températures élevées. Il est incliné de  $34,56^\circ$  (Latitude de la ville de Tlemcen) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.

Les matériaux simulés constituant le capteur sont :

Une tôle galvanisée peinte en noir, d'épaisseur 1 cm est utilisée comme absorbeur ; ce dernier est couvert en haut par du verre ordinaire d'épaisseur 0,5cm, laissant passer le rayonnement solaire ; les côtés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec un isolant (polystyrène) d'épaisseur 2 cm. L'air qui circule est aspiré à l'aide d'un ventilateur posé en aval. Le contact air-absorbeur, ainsi que l'effet convectif servent à augmenter la température de l'air.

### ➤ Une chambre de séchage

C'est une boîte de forme parallélépipédique dont la partie supérieure est surmontée d'une toiture en forme de 'V'. la chambre ayant des dimensions (hauteur = 1m, largeur = 1m et profondeur = 1m), En outre elle est munie d'une cheminée sur le toit ainsi que d'une ouverture sur sa base pour l'admission de l'air chaud provenant du capteur.

Le matériau simulé constituant ce séchoir est :

La brique pleine d'épaisseur 10 cm avec une isolation externe (en polystyrène) d'épaisseur 2 cm pour minimiser l'échange de chaleur avec le milieu extérieur.

Le séchoir comporte 4 claies de forme rectangulaire galvanisées et grillagées pour permettre le passage de l'air, sur lesquelles sont posés les produits à sécher. Les claies sont distantes les unes des autres de 15 cm, espace suffisamment important pour que la circulation de l'air puisse se faire de la meilleure façon.

Cheminée verticale: Permet d'évacuer l'air humide.

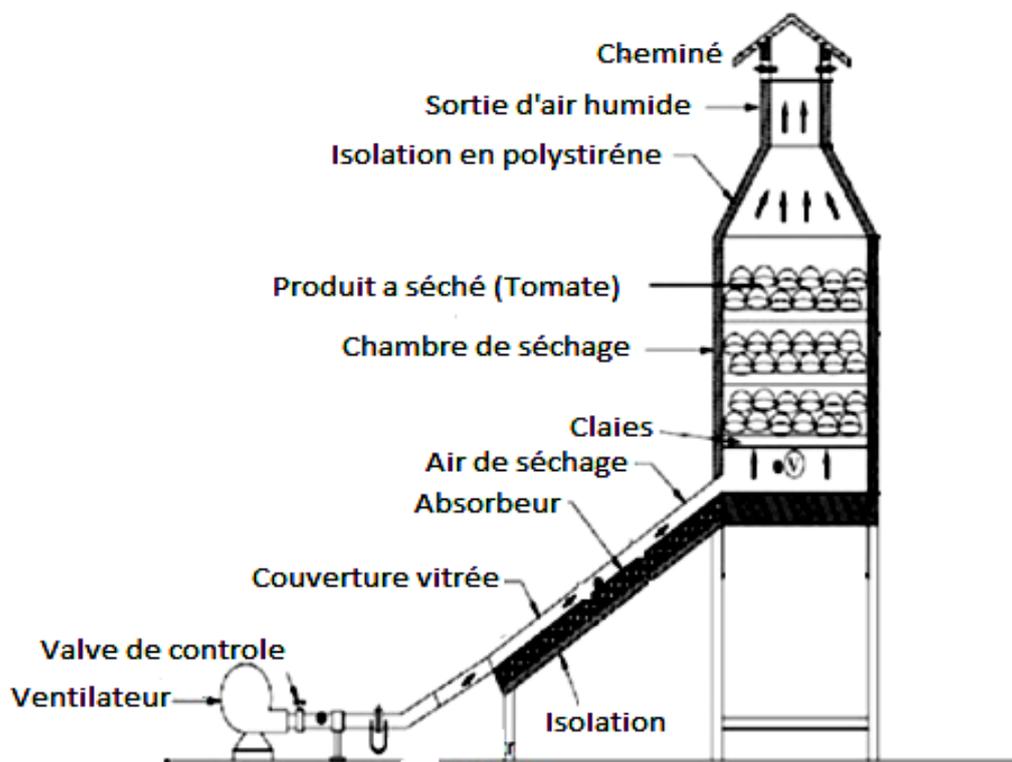


Figure (III.1) : schéma descriptif de notre système de séchage.

### ➤ **Fonctionnement du système**

L'air frais capté de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, par le contact air absorbeur qui lui permet d'élever sa température. L'air chaud à la sortie du capteur solaire atteint l'entrée de la chambre de séchage à travers une gaine qui relie les deux compartiments du séchoir solaire. Ce dernier arrive à l'entrée de l'armoire de séchage et ensuite traverse les claies. L'air se met en contact avec le produit à sécher, puis il est évacué vers l'extérieur à travers une conduite (cheminée).

## **III. Classification des modèles de séchage**

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

### **III. 1 Modèles empiriques**

Ces modèles [26] basés essentiellement sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est très limitée car chacun d'eux est spécifique à un type de produit ainsi qu'aux conditions expérimentales de son séchage, ce qui ne permet pas l'extrapolation au-delà des limites de l'expérience.

### **III. 2. Modèles diffusifs**

Ces modèles, [21] point de départ de la théorie de séchage, sont basés sur la loi de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D\nabla W) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$D$  : coefficient de diffusion massique du produit qui est fonction de l'humidité [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

$W$  : humidité du produit [ $\text{kg d'eau/kgMs}$ ].

$t$  : temps [ $\text{s}$ ].

Neuman et Sherwood [26] ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation en haut devient :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \quad (\text{III.2})$$

### **III.3. Modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse**

Les modèles [26] basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent plus les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Il est permis de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov, Philip et De Vries, Krischer, Glaser et Whitaker ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

Les plus connus de ces modèles sont les suivants:

### III.3.1 Modèles issus de la Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles (TPI)

Afin d'expliquer les phénomènes physiques ayant lieu au cours du séchage et restés inexplicables par les précédentes théories, Benneta a exploité la thermodynamique des phénomènes irréversibles de la thermodynamique en s'inspirant des travaux de Luikov qui ont fait leurs preuve dans ce domaine [26].

### III.3.2. Modèle de Luikov

Ce modèle [21] consiste en la description des phénomènes de transport à l'intérieur des corps poreux capillaires par les principes de la thermodynamique des processus irréversibles. Le flux de diffusion de vapeur et de liquide est soit le fait d'un gradient de concentration totale et soit d'un gradient de température.

Ce modèle est assez puissant pour décrire les phénomènes de transfert simultanés de chaleur et de masse dans un milieu poreux. Les équations différentielles constituant ce système sont les suivantes:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div} \left( a_m \overrightarrow{\text{grad}W} + \delta \overrightarrow{\text{grad}T} \right); \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left( a_q \overrightarrow{\text{grad}T} \right) + \frac{\varepsilon L_v}{C} \frac{\partial W}{\partial t}; \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$a_m$  : diffusivité massique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$a_q$  : diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$C$  : chaleur spécifique [ $\text{J}/\text{kg K}$ ],

$L_v$  : chaleur latente massique d'évaporation de l'eau [ $\text{J}/\text{kg}$ ],

$T$  : température [ $\text{K}$ ],

$t$  : temps [ $\text{s}$ ],

$\varepsilon$  : taux de changement de phase [s.u],

$\delta$  : Coefficient du gradient thermique basé sur la différence de teneur en eau.

L'utilisation du système d'équations différentielles de Luikov [26] dans des travaux entrepris par des scientifiques a prouvé l'efficacité pour l'analyse de la distribution de la température et de l'humidité à l'intérieur des produits poreux durant le séchage.

La contribution la plus importante de ce modèle est la mise en évidence de l'influence de la température et de la pression interne sur la migration de l'humidité. Toutefois, le seul inconvénient de ce modèle est que le taux de changement de phase est présent dans l'équation de

transfert de chaleur n'est pas issu d'une loi physique, ce qui rend sa détermination empirique délicate.

### III.3.3 Modèle de Philip et De Variés

Ce modèle [21] se base sur la théorie que les transferts simultanés de chaleur et de masse sont une combinaison de gradients de température et d'humidité.

Le système d'équations décrivant ce modèle est le suivant:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \text{div} \left( D_m \overrightarrow{\text{grad}W} + D_T \overrightarrow{\text{grad}T} - \frac{\rho_e}{\rho_0} K \right); \quad (\text{III.5})$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left( \lambda^* \overrightarrow{\text{grad}T} \right) + \rho_e \cdot L_v \left( D_{MV} \overrightarrow{\text{grad}W} + D_{TV} \overrightarrow{\text{grad}T} \right); \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$D_m$  : Coefficient de diffusion massique isotherme [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$D_T$  : Coefficient de diffusion massique non isotherme [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$D_{MV}$  : Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$D_{TV}$  : Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$K$  : Conductivité hydraulique de milieu [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ],

$\rho C$  : Capacité calorifique équivalente [ $\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$ ],

$\rho_0$  : Masse volumique de la phase solide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\rho_e$  : Masse volumique de la phase liquide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\lambda^*$  : Conductivité thermique apparente [ $\text{W}/\text{m K}$ ].

L'utilisation pratique de ce modèle [4] par certains auteurs a montré qu'il est spécifique pour les sols et les matériaux de construction pour lesquels la pression joue un rôle très secondaire.

### III.3.4. Modèle de Whitaker

Ce modèle [21] appelé aussi modèle de la prise de la moyenne a été développé par Whitaker dont la contribution dans la théorie du séchage est très fructueuse. Ce modèle tient compte de la morphologie du milieu poreux, constitué d'une matrice solide inerte comportant des capillaires et des pores, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (mélange de vapeur d'eau et d'air).

La modélisation de tels milieux n'est utilisable qu'à l'échelle macroscopique, après avoir effectué un changement d'échelle. Le passage des équations de l'échelle de pores (du milieu réel discontinu) aux équations macroscopiques (à un milieu continu fictif dans lequel les équations de la mécanique classique sont applicables) s'effectue par la technique de la prise de la moyenne.

Une valeur moyenne de chaque grandeur physique prise sur un volume élémentaire représentatif (VER) figure (III.2) [26], est affectée à un point.

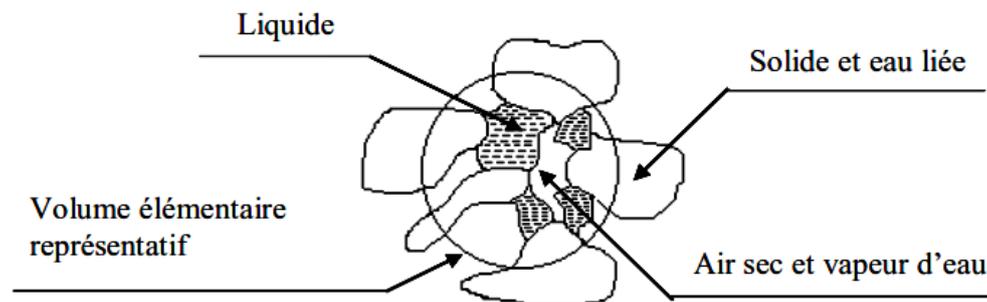


Figure (III.2) : Schéma du milieu poreux et du volume élémentaire représentatif.

#### IV. MODELISATION MATHÉMATIQUE

Le principe [27] repose sur un découpage fictif du séchoir en un certain nombre de tranches, dans la direction de l'écoulement de l'air. En ce qui concerne le séchoir, une 'tranche' est définie par le volume délimité par deux claies et les parois du séchoir. Cette méthode est appelée la méthode de la couche mince.

Rappelons que pendant un intervalle de temps et pour des paramètres météorologiques donnés, la circulation d'air au sein du séchoir entraîne une évolution des flux de chaleur et de masse entre le corps à sécher et l'air d'un bout à l'autre du séchoir.

En considérant chaque 'tranche' comme une entité indépendante des autres, il est possible de décrire [27] l'évolution des transferts thermiques et massiques au sein des différents milieux en présence (air, produits, parois...) en notant que, dans chacune, les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la tranche précédente.

L'application de l'analogie électrique aux transferts thermiques et massiques permet de déterminer à chaque instant à l'aide d'un calcul itératif la distribution de la température en divers points du séchoir et d'en déduire les teneurs en eau de l'air et du produit (tomate) au sein de chaque 'tranche'. Rappelons que les températures sont assimilées à des potentiels, les flux thermiques et massiques à des intensités et les coefficients d'échange à des résistances.

La loi d'ohm appliquée en chaque nœud du réseau électrique visualisant les différents transferts ayant lieu au sein d'une 'tranche' considérée comme indépendante de ses voisines, débouche sur la mise en équation du bilan thermique et massique au sein de cette 'tranche'.

Le modèle est basé sur les bilans d'énergie dans l'air asséchant et dans le produit (tomate).

Le produit à sécher (tomate) est soumis à un écoulement forcé d'air chaud perpendiculaire à la surface horizontale de la claie. La température et l'hygrométrie de l'air à l'entrée du séchoir peuvent varier au cours du séchage.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont utilisées :

- les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés,
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés (La conduction claie-produit),
- Les pertes thermiques et pertes de charge dans les conduits de liaisons sont négligées,
- 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.
- la température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit,

## V. EQUATION ENERGETIQUE DU SYSTEME

On applique alors le premier principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie d'un système :

$$\varphi_e = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\varphi_e : \text{Flux de chaleur entrant } \varphi_e = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{III.8})$$

$$\varphi_s : \text{Flux de chaleur sortant } \varphi_s = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} \quad (\text{III.9})$$

$$\varphi_{st} : \text{Flux de chaleur stocké } \varphi_{st} = \rho \cdot V \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu [W/m.°C],

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux [m],

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur [m<sup>2</sup>],

$\rho$  : Masse volumique de l'élément de surface [kg/m<sup>3</sup>],

$V$  : Volume de l'élément de surface [m<sup>3</sup>],

$C$  : Chaleur massique [J/kg.C],

$T$  : Température [°C],

$t$  : Temps [s].

## VI. ANALOGIE LOI D'OHM - LOI DE FOURIER.

La loi de Fourier appliquée à un mur plan est :

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{th}} \quad (\text{III.11})$$

Présente une certaine analogie avec la loi d'Ohm :

$$I = \frac{(V_1 - V_2)}{R_{elec}} \quad (\text{III.12})$$

Où la différence de potentiel joue le rôle de la différence de température et le flux de chaleur celui du courant électrique.

De même :

$$\vec{J} = -k \overrightarrow{\text{grad}T}$$

Est à rapprocher de

$$\vec{J} = \sigma \overrightarrow{\text{grad}V}$$

On peut ainsi établir les correspondances suivantes :

- Loi d'Ohm → Loi de Fourier,
- Potentiel → Température,
- Courant → Puissance transmise,
- Champ électrique → Gradient de température,
- Densité de courant → Flux thermique,
- Résistance électrique → Résistance thermique.

On pourra donc, pour analyser un problème thermique, effectuer une transposition en construisant le schéma électrique correspondant (circuit en série, en parallèle) et adopter le même type de calcul.

### VII. BILAN ENERGETIQUE ET MASSIQUE DE LA CHAMBRE DE SECHAGE

Ensuite, un bilan énergétique et massique est effectué sur la chambre de séchage (enceinte de séchage). On aboutit aux équations suivantes :

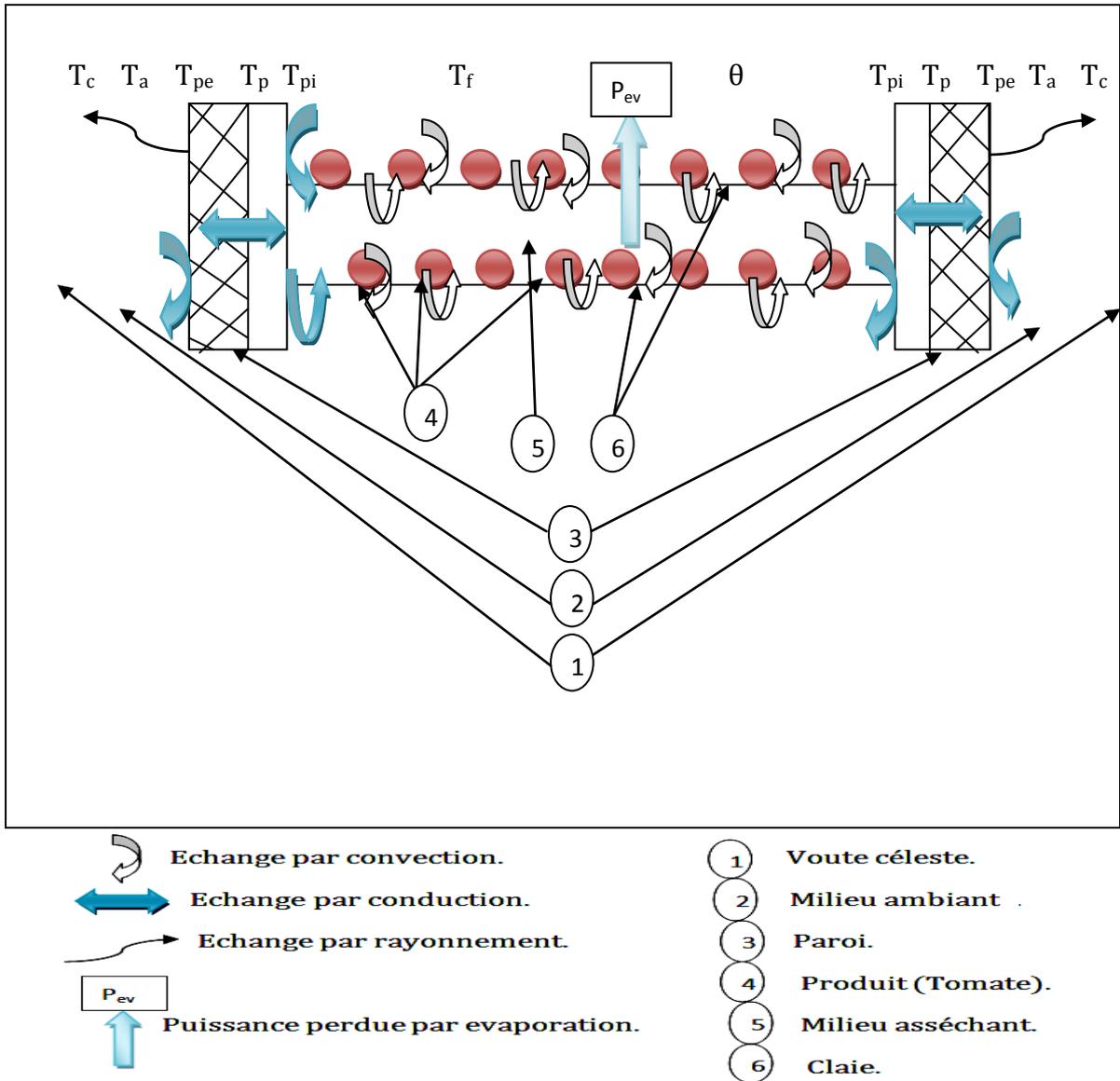


Figure (III.3) : Echanges thermiques dans la chambre de séchage.

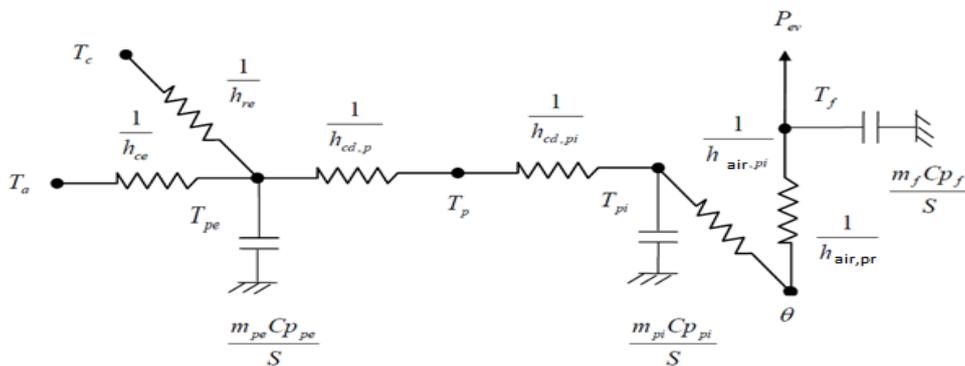


Figure (III.4) : Schéma électrique relatif au transfert de chaleur dans la chambre de séchoir.

### VII.1. Bilan d'énergie de la face externe de la paroi :

$$m_{pe} \cdot Cp_{pe} \left( \frac{dT_{pe}}{dt} \right) = h_{ce} \cdot S_p (T_a - T_{pe}) + h_{re} \cdot S_p (T_c - T_{pe}) + h_{cd,p} \cdot S_p (T_p - T_{pe}) \quad (\text{III.13})$$

Si on divise sur la surface, on obtient :

$$\frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{dT_{pe}}{dt} \right) = h_{ce} (T_a - T_{pe}) + h_{re} (T_c - T_{pe}) + h_{cd,p} (T_p - T_{pe}). \quad (\text{III.14})$$

L'évolution de bilan énergétique la face externe de la paroi au cours du temps :

$$\frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{T_{pe}^{t+\Delta t}(j) - T_{pe}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{ce} (T_a - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)) + h_{re} (T_c - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)) + h_{cd,p} (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)). \quad (\text{III.15})$$

### VII.2 Bilan d'énergie de la face interne de la paroi :

$$m_{pi} \cdot Cp_{pi} \left( \frac{dT_{pi}}{dt} \right) = h_{cd,pi} \cdot S_p (T_p - T_{pi}) + h_{air,pi} \cdot S_p (\theta_{(j-1)} - T_{pi}) \quad (\text{III.16})$$

Si on divise sur la surface, on obtient :

$$\frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{dT_{pi}}{dt} \right) = h_{cd,pi} (T_p - T_{pi}) + h_{air,pi} (\theta_{(j-1)} - T_{pi}). \quad (\text{III.17})$$

L'évolution de bilan énergétique de la face interne de paroi au cours du temps :

$$\frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - T_{pi}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{cd,pi} (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{pi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{air,pi} (\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_{pi}^{t+\Delta t}(j)). \quad (\text{III.18})$$

### VII.3 Bilan d'énergie de la surface intermédiaire entre la paroi interne et externe

$$m_{pe} \cdot Cp_{pe} \left( \frac{dT_p}{dt} \right) + h_{cd,p} \cdot S_p (T_p - T_e) = m_{pi} \cdot Cp_{pi} \left( \frac{dT_p}{dt} \right) + h_{cd,pi} \cdot S_p (T_{pi} - T_p) \quad (\text{III.19})$$

Donc on obtient :

$$\frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{dT_p}{dt} \right) + h_{cd,p} (T_p - T_e) = \frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{dT_p}{dt} \right) + h_{cd,pi} (T_{pi} - T_p) \quad (\text{III.20})$$

L'évolution du bilan énergétique de la surface intermédiaire entre la paroi externe et interne au cours de temps :

$$\frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{T_p^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)}{\Delta t} \right) + h_{cd,p} (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_e) = \frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{T_p^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)}{\Delta t} \right) + h_{cd,pi} (T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)) \quad (\text{III.21})$$

#### VII.4 Bilan d'énergie de l'air asséchant

$$Q \cdot C_p (\theta_{(j)} - \theta_{(j-1)}) = h_{air,pi} \cdot S_p (T_{pi} - \theta_{(j-1)}) + h_{air,pr} \cdot S (T_f - \theta_{(j-1)}). \quad (III.22)$$

L'évolution de bilan énergétique de l'air asséchant au cours de temps :

$$Q \cdot C_p (\theta^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) = h_{air,pi} \cdot S_p (T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) + h_{air,pr} \cdot S (T_f^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) \quad (III.23)$$

#### VII.5. Bilan d'énergie du produit (la tomate)

$$m_f \cdot Cp_f \left( \frac{dT_f}{dt} \right) = h_{air,pr} \cdot S (\theta_{(j-1)} - T_f) - P_{ev} \quad (III.24)$$

Si on devise sur la surface de produit, on obtient :

$$\frac{m_f \cdot Cp_f}{S} \left( \frac{dT_f}{dt} \right) = h_{air,pr} (\theta_{(j-1)} - T_f) - P_{ev} \quad (III.25)$$

L'évolution de bilan énergétique de la tomate au cours du temps :

$$\frac{m_f \cdot Cp_f}{S} \left( \frac{T_f^{t+\Delta t}(j) - T_f^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{air,pr} (\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_f^{t+\Delta t}(j)) - P_{ev} \quad (III.26)$$

Avec :

$C_p$  : Capacité calorifique massique de l'air [J/kg.K],

$Cp_f$  : Capacité calorifique massique de produit [J/kg.K],

$Cp_p$  : Capacité calorifique massique des parois [J/kg.K],

$dt$  : pas de temps [s],

$h_{ce}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre la paroi externe du séchoir et l'air extérieur [W/m<sup>2</sup>.K],

$h_{air,pr}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et les produits [W/m<sup>2</sup>.K],

$h_{cd,p}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans les parois du séchoirs [W/m<sup>2</sup>.K],

$h_{air,pi}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la paroi interne [W/m<sup>2</sup>.K],

$h_{re}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la paroi externe et la voute céleste [W/m<sup>2</sup>.K],

$m_f$  : Masse des produits [kg],

$m_p$  : Masse des parois [kg],

$P_{ev}$  : Puissance d'évaporation [W],

$Q$  : Débit massique de l'air [kg/s],

$S$  : Surface d'échange produit-air pour une claie [m<sup>2</sup>],

$S_p$  : Surface des parois du séchoir dans la tranche  $j$  [m<sup>2</sup>],

$T_a$  : Température ambiante [K],

$T_c$  : Température de la voute céleste [K],

$T_f$  : Température des produits [K],

$T_p$  : Température entre les deux parois [K],

$T_{pe}$  : Température de la paroi externe [K],

$T_{pi}$  : Température de la paroi interne [K],

$\theta$  : Température de l'air asséchant [K],

Donc à partir de ces résultats, on obtient ce système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{T_{pe}^{t+\Delta t}(j) - T_{pe}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{ce}(T_a - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)) + h_{re}(T_c - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)) + h_{cd,p}(T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{pe}^{t+\Delta t}(j)), \\ \frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - T_{pi}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{cd,p}(T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{pi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{air,pi}(\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_{pi}^{t+\Delta t}(j)), \\ \frac{m_{pe} \cdot Cp_{pe}}{S_p} \left( \frac{T_p^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)}{\Delta t} \right) + h_{cd,p}(T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{pe}^t(j)) = \frac{m_{pi} \cdot Cp_{pi}}{S_p} \left( \frac{T_p^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)}{\Delta t} \right) + h_{cd,p}(T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)), \\ Q \cdot C_p(\theta^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) = h_{air,pi} \cdot S_p(T_{pi}^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) + h_{air,pr} \cdot S(T_f^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)), \\ \frac{m_f \cdot Cp_f}{S} \left( \frac{T_f^{t+\Delta t}(j) - T_f^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{air,pr}(\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_f^{t+\Delta t}(j)) - P_{ev} \end{array} \right.$$

Un système d'équations de cinq inconnues est obtenu, ces inconnues sont :

$T_{pe}$ ,  $T_{pi}$ ,  $T_p$ ,  $T_f$ ,  $\theta$ .

## VIII. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT THERMIQUE

### VIII.1 Coefficient par convection entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant

$$h_{air,pi} = \frac{Nu_{pi} \cdot \lambda_{air}}{\Delta Z} \quad (III.27)$$

Avec :

$\Delta Z$  : est le pas d'espace.

$$Nu_{pi} = 0,35 \cdot Re_{pi}^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$$

$$Re_{pi} = \frac{U \cdot D_{pr} \cdot \rho_{ah}}{\mu_{ah}} \quad , Re \text{ est le nombre adimensionnel de Reynolds.}$$

$$Pr = \frac{\mu_{air} \cdot Cp_{air}}{\lambda_{air}} \quad ; Pr \text{ est le nombre adimensionnel de Prandtl.}$$

$D_{pr}$  : Diamètre moyen du produit [m],

$\rho_{ah}$  : Masse volumique de l'air chaud [kg/m<sup>3</sup>],

$\mu_{ah}$  : Viscosité dynamique de l'air chaud [kg/m.s],

$C_{p_{air}}$  : Chaleur massique de l'air [W/kg.K],

$\lambda_{air}$  : Coefficient de conductibilité thermique de l'air [W/m.K],

$U$ : Vitesse moyenne du fluide [m/s].

### VIII.2 Calcul du coefficient de convection entre l'air asséchant et le produit (surface de la tomate)

$$h_{air,pr} = \frac{Nu_D \cdot \lambda_{air}}{D_{pr}} \quad (III.28)$$

Avec :

$$Nu_D = 0,37 \cdot Re^{0,6}$$

$$Re_{pi} = \frac{U \cdot D_{pr} \cdot \rho_{ah}}{\mu_{ah}}$$

Calcul de la puissance perdue par la tomate  $P_{ev}$  :

C'est une puissance perdue par le produit à sécher. Elle est donnée par la formule :

$$P_{ev} = m_{sec} \cdot L_v \cdot \frac{dX}{dt} \quad (III.29)$$

Avec:

$$L_v : 4186,8(597-0,56 \cdot T_p)$$

Où

$T_f$ : Température de produit (tomate)[K],

$m_{sec}$ : Masse sèche du produit [kg],

$L_v$ : Chaleur latente d'évaporation de l'eau [J/kg].

( $dX/dt$ ) : La vitesse de séchage du produit exprimée en [kg eau/kg MS/s].

### VIII.3. Calcul de coefficient d'échange par conduction à travers la paroi de chambre de séchage

$$h_{cd,p} = \frac{\lambda_p}{e_p} \quad (III.30)$$

$\lambda_p$  : Conductivité thermique du paroi [W/m<sup>2</sup>.K],

$e_p$  : L'épaisseur de paroi [m].

### VIII.4. Calcul de coefficient d'échange par convection entre la paroi extérieure de chambre de séchage et l'air ambiant

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86 \cdot V_v \quad (III.31)$$

$V_v$  : Vitesse de vent [m/s].

### VIII.5 Calcul du coefficient d'échange radiatif entre la paroi extérieure de la chambre de séchage et la voûte céleste :

$$h_{re} = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_{pe} + T_c) \cdot (T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (\text{III.32})$$

Avec

$$T_c = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

$\sigma$ : Constante de Stephan-Boltzmann.  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{k}^4\text{]}$ .

$\varepsilon_p$ : est l'émissivité de la paroi du séchoir.

### IX. Organigramme du programme

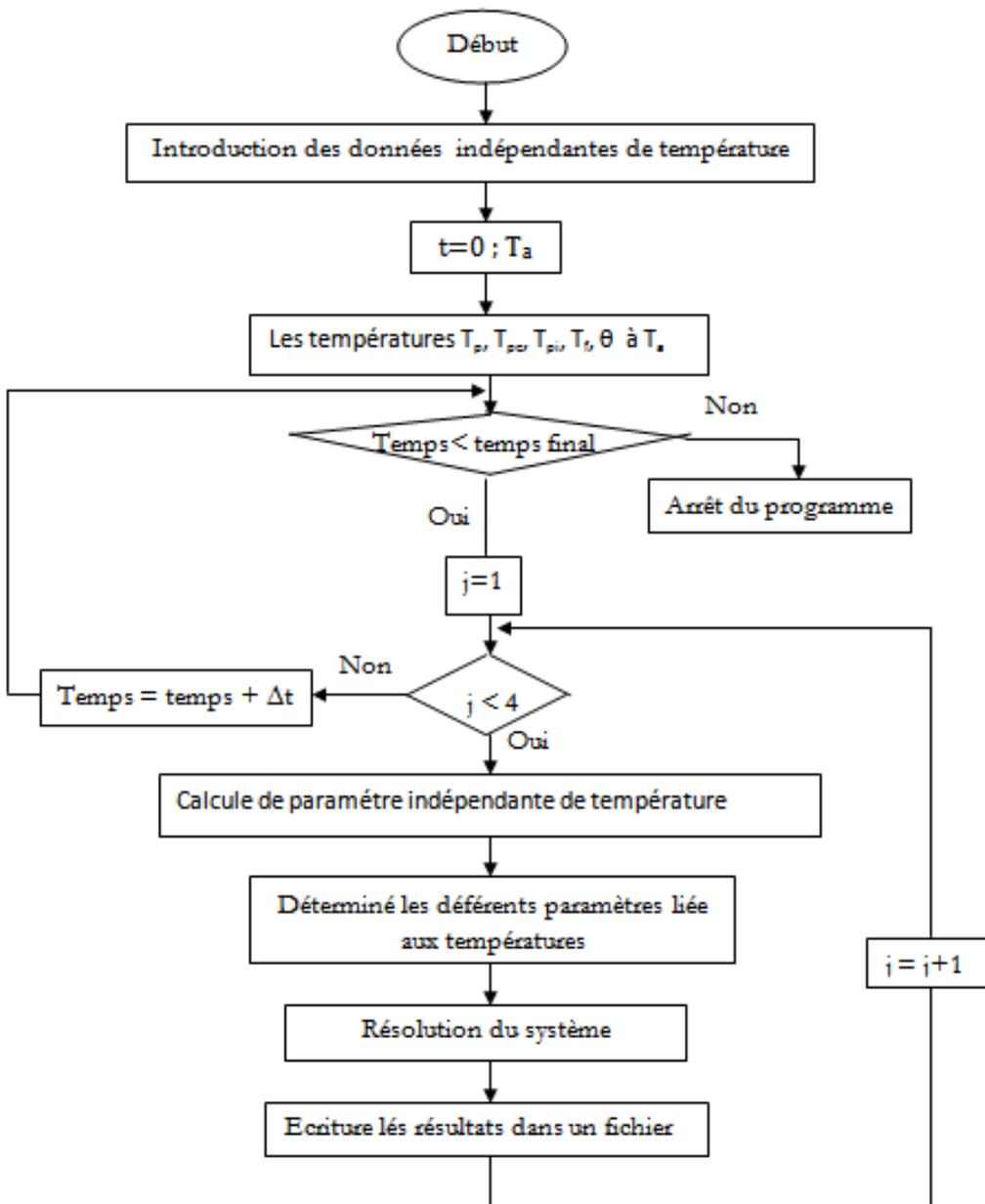


Figure (III.5) : organigramme développé pour la simulation de la chambre de séchage.

## X. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, on présente les différents résultats obtenus par la simulation du processus de séchage de la tomate dans un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée.

On étudie la distribution des températures, les teneurs en eau, et humidités absolues de la tomate, ensuite l'influence des paramètres de l'air asséchant qui sont la température et la vitesse sur le processus du séchage.

Au cours du séchage, il se produit un double transfert de chaleur et de masse. Ce qui fait que l'air à la sortie a une humidité plus grande, tandis que la température diminue, alors que l'humidité relative du produit diminue et la température augmente. Pour illustrer les transferts de chaleur et de masse observés, des courbes caractéristiques de séchage sont tracées qui représentent les variations de:

- La variation de l'Humidité absolue (la teneur en eau) en fonction du temps,  $X = f(t)$ .
- La variation de la température de tomate au cours du séchage,  $T(t)$ .
- La vitesse de séchage en fonction du temps,  $f(t) = dX/dt$ .
- La variation de l'humidité absolue de Tomate en fonction du temps pour les différentes claies.
- La variation de la température de Tomate en fonction de temps pour les différentes claies.
- Influence de la température de l'air asséchant sur l'humidité absolue de Tomate.
- Influence de la température de l'air asséchant sur la température de Tomate.
- Influence de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité absolue de Tomate.

### X.1 Evolution de la température du produit au cours du séchage

La figure (III.6), représente l'évolution de la température du produit (tomate) en fonction du temps pour la 1<sup>ère</sup> claie. On remarque que la température du produit au début du séchage (290 K) augmente de façon très importante et rapide jusqu'à atteindre une valeur maximale de l'ordre de (305 K) ; cette augmentation est due à un échange thermique de deux manières (convection forcée et conduction) ; la convection se fait entre le produit et l'air asséchant et la conduction entre le produit et la paroi de l'armoire de séchage ; on remarque aussi que le temps nécessaire pour atteindre la température maximale de séchage est de l'ordre de 7h ce qui correspond à un temps plus court pour la 1<sup>er</sup> claie parce que l'air asséchant est à la température initiale de l'ordre de (313 K) et ne contient aucune humidité absolue (air sec).

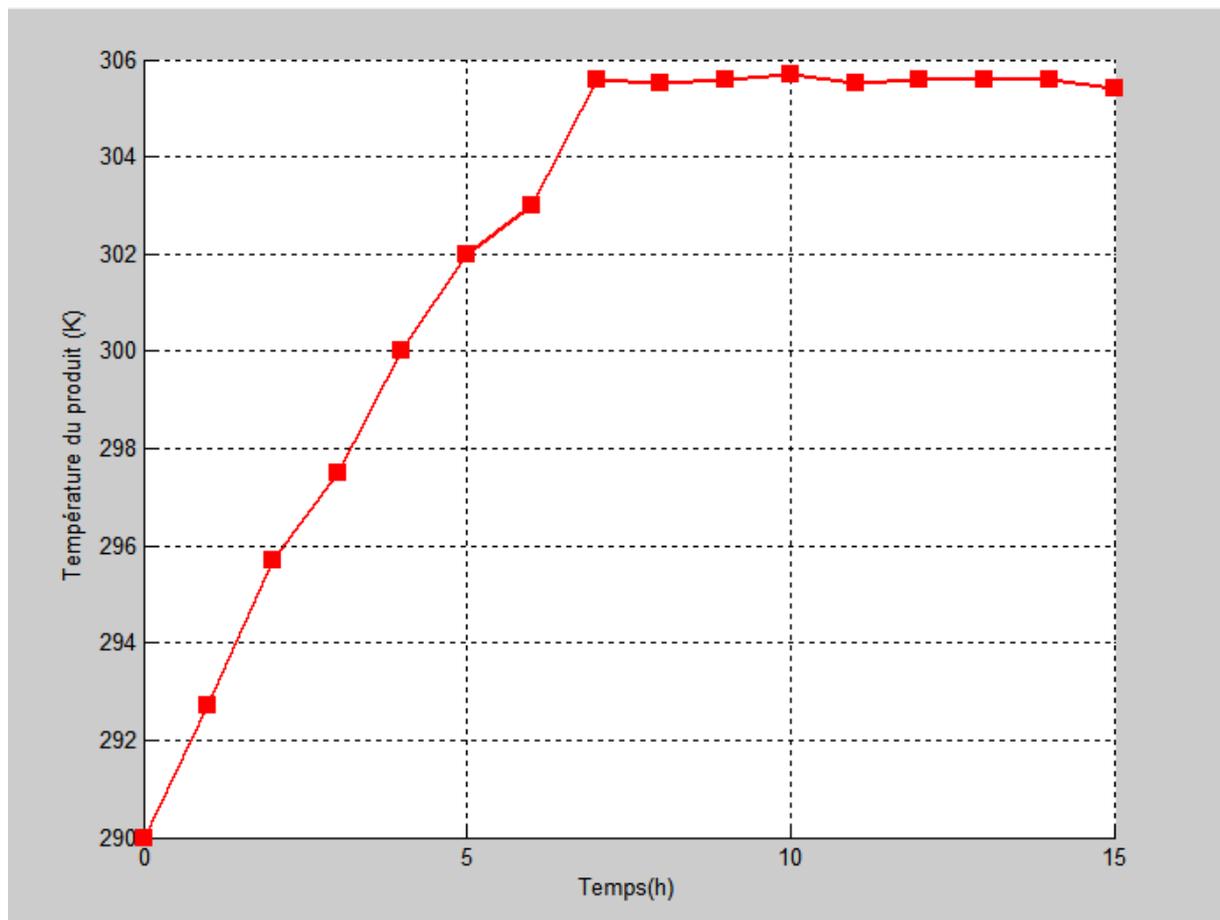


Figure (III.6) : Evolution de la température du produit au cours du séchage.

## X.2. Variation de l'Humidité absolue de la tomate au cours du séchage

Plus le temps de séchage augmente, plus l'humidité absolue du produit diminue sous l'effet de l'augmentation de la température.

La figure (III.7), montre la courbe de variation de la teneur en eau de la Tomate en fonction de la durée de séchage. On remarque que celle-ci décroît fortement jusqu'à d'atteindre une allure plus stable à partir de 11h. De fait, l'air entre sec et chaud avec une teneur en eau faible, puis traverse les diverses claies, s'humidifiant et se refroidissant a cause du transfert de chaleur et de masse avec le produit. Ainsi une diminution de 15 à 3 (kg eau/kg Ms) qui correspond à 80 % de l'humidité initiale, ce qui explique l'évaporation d'une quantité d'eau importante.

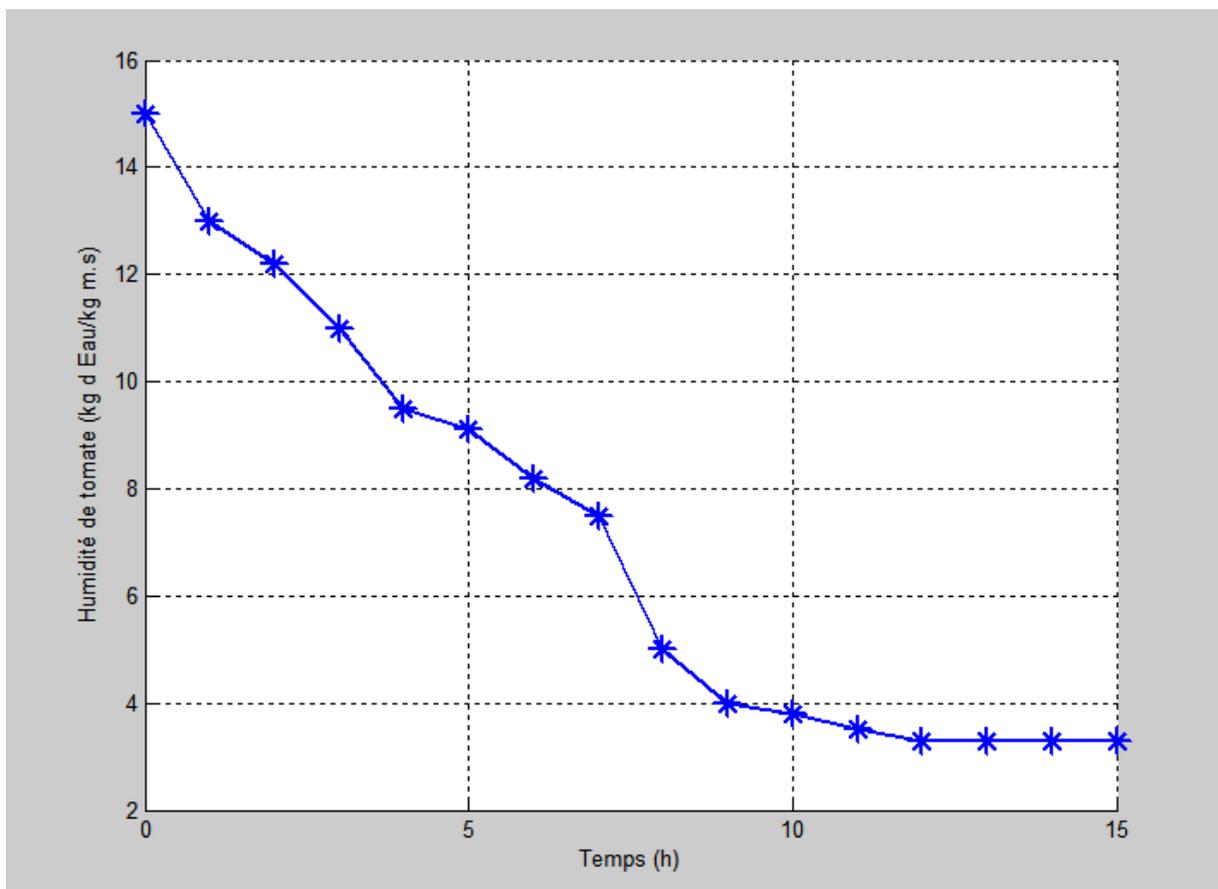


Figure (III.7) : Evolution de l'humidité absolue de Tomate en fonction de temps.

### X.3 Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps

La Figure (III.8), présente la vitesse de séchage en fonction du temps ; on constate bien que plus la température de séchage augmente, plus la vitesse de séchage est élevée ; car si on augmente la température, l'humidité absolue baisse rapidement et par conséquent une vitesse de séchage devient élevée et le temps de séchage est réduit.

Ensuite on remarque une chute de la vitesse de séchage parce que l'humidité diminue. La vitesse de séchage est influencée de façon très importante par la température. Ceci est dû à l'accroissement de la chaleur fournie au produit et à l'accélération de la migration de l'humidité à l'intérieur de produit (tomate).

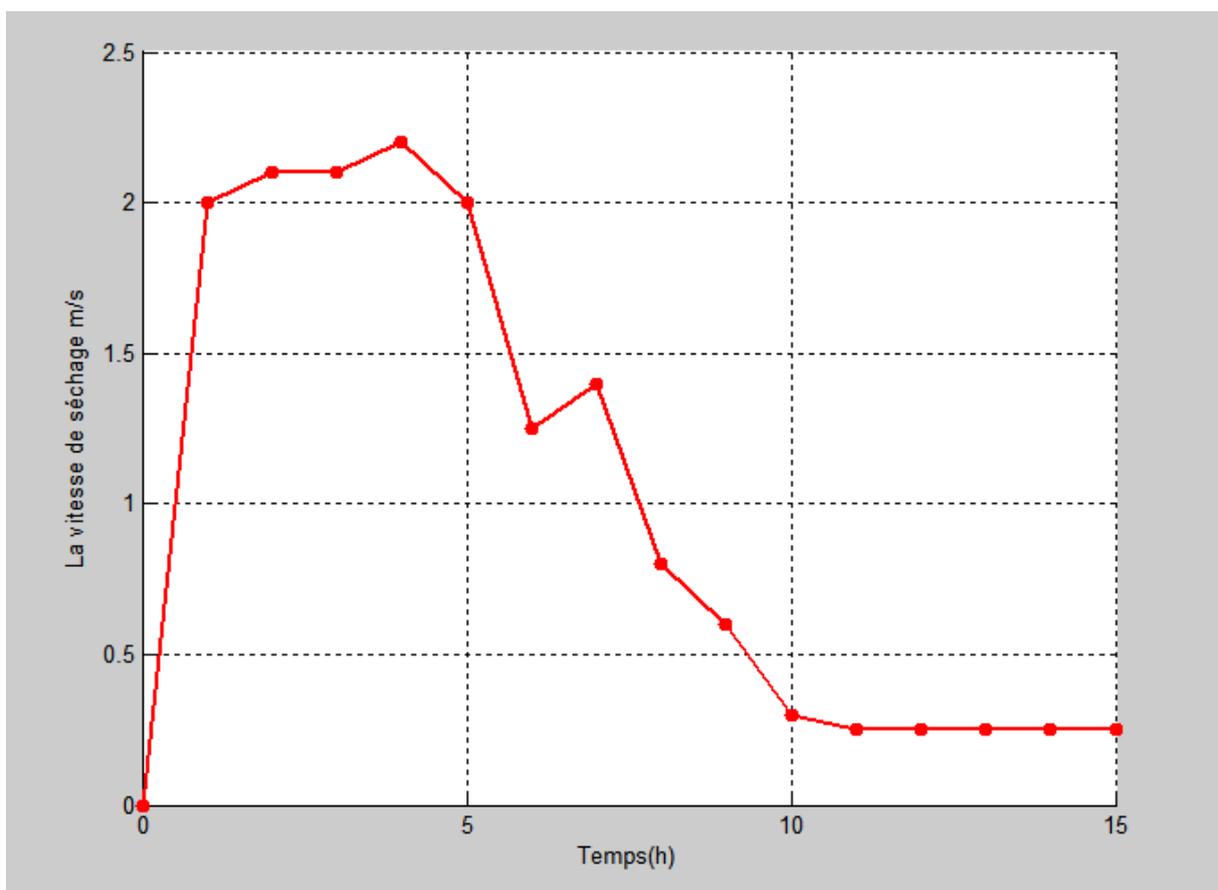


Figure (III.8) : Variation de la vitesse de séchage en fonction de temps.

#### X.4 Variation de l'humidité (teneur en eau) pour les différentes claies

La figure (III.9), donne l'évolution en fonction du temps, de la teneur en eau dans la tomate, au niveau des différentes claies du séchoir. Le produit sèche plus vite dans les premières claies, comparé au produit posé sur les dernières. Quand l'air avance dans le séchoir, sa température diminue et son humidité augmente. Autrement dit, le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il régit une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air qu'à la surface de la tomate. L'augmentation de la température permet de donner plus de chaleur au produit, donc plus d'évaporation d'eau. Pour la 1<sup>ère</sup> claie, la chaleur apportée par l'air est importante et pour la deuxième claie la température de l'air va baisser, ce qui va diminuer la quantité d'évaporation de l'eau, le même phénomène se traduisant au niveau des autres claies.

Le temps de séchage du produit augmente, lorsque l'on passe de la première à la dernière claie, car l'acheminement de l'air dans l'armoire se fait de bas en haut. En passant d'une claie inférieure à une claie supérieure, la température de l'air baisse et son taux hygrométrique augmente. Ceci engendre un accroissement de la pression de vapeur d'eau dans l'air et une diminution du potentiel d'échange qui est définie par la différence entre la pression de vapeur à la surface du produit et la pression de vapeur d'eau dans l'air. On remarque aussi qu'il y a une diminution de 15 à 3 (kg eau/kg Ms) de l'humidité initiale pour les différentes claies ce qui correspond à 80 % avec un temps de séchage différent.

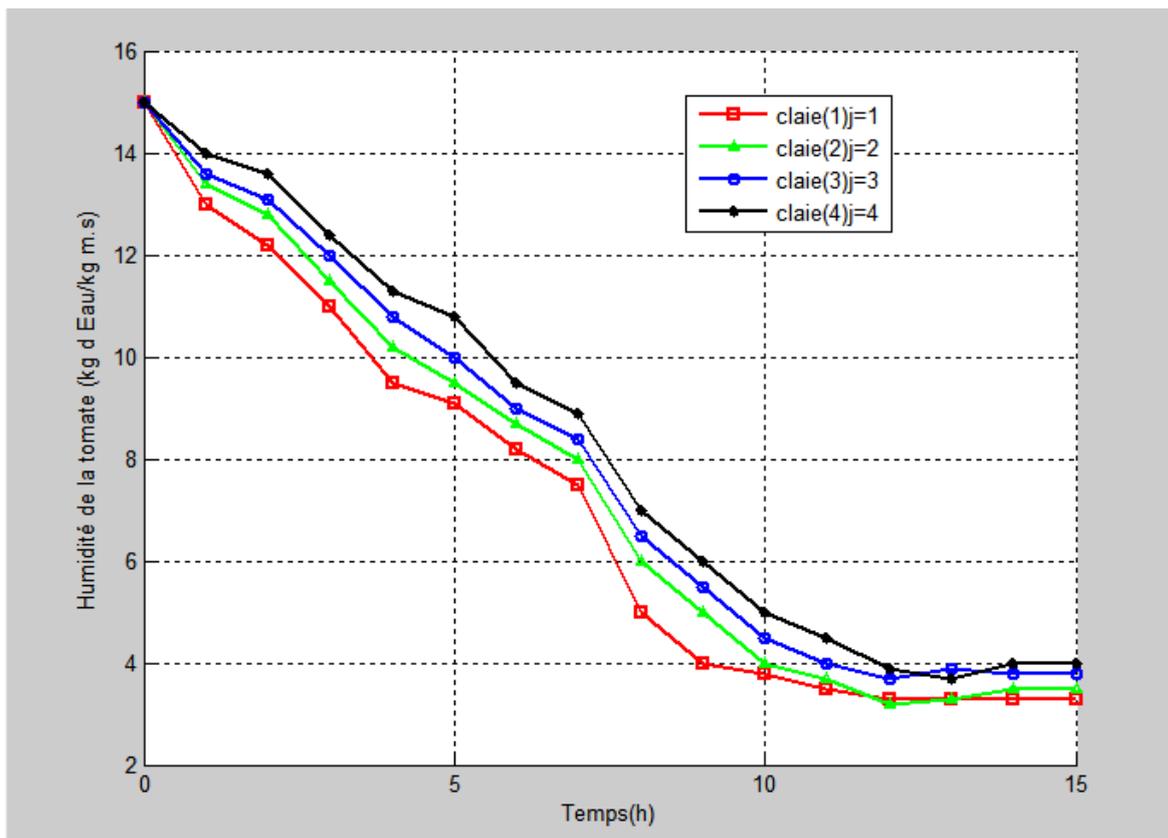


Figure (III.9) : Variation de l'humidité absolue de la Tomate en fonction de temps pour les différentes claies.

### X.5 Variation de la température de Tomate pour les différentes claies

La figure (III.10), exprime la variation de la température du produit durant le séchage dans les claies, où on remarque que la température maximale atteinte correspond à une disposition des 1<sup>ères</sup> claies. Par contre, lorsque le produit est disposé à la dernière claie ( $j=4$ ) sa température est faible. Et on remarque qu'il y a une augmentation de température du produit durant le temps de séchage, et ce grâce à l'échange convectif entre l'air chaud et le produit humide. Cependant, pour la dernière claie, on voit une nette diminution de la température du produit parce que la température de l'air asséchant est moins importante et contient plus d'humidité. Donc on constate que le produit dans la première claie sèche plus rapidement que dans les claies supérieures.

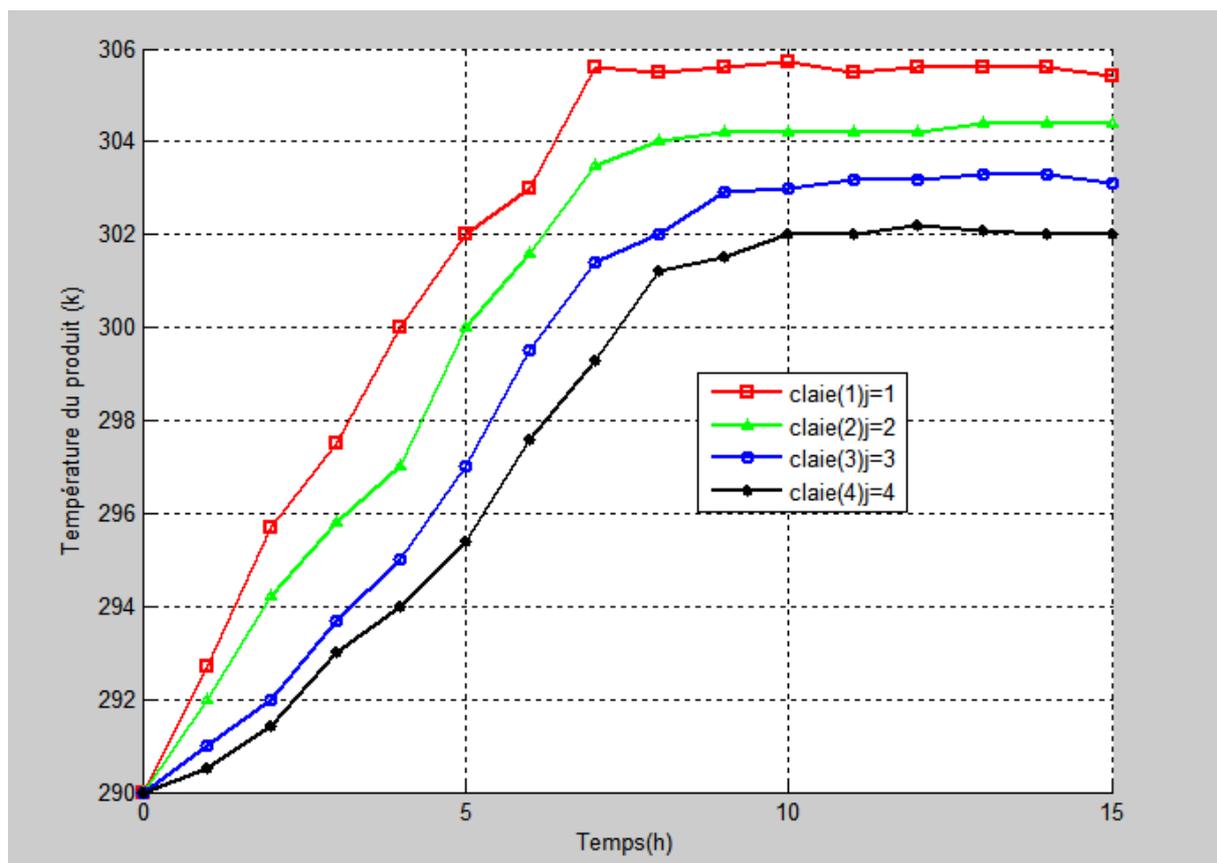


Figure (III.10) : Variation de la Température de Tomate en fonction de temps pour les différentes claies.

## X.6 L'influence de la température de l'air asséchant sur l'humidité du produit

La figure (III.11) montre l'influence de la température de l'air asséchant qui varie entre 313 K et 328 K avec un pas de 5K en fonction de l'humidité du produit, pour une masse de 1kg de tomate posé sur chaque claie. Pour la 1<sup>ère</sup> claie l'augmentation de la température de l'air asséchant permet de donner plus de chaleur au produit, donc plus d'évaporation d'eau due à l'augmentation de la pression de l'eau à l'intérieur du produit qui accélère la migration de l'eau du produit vers l'extérieur.

Pour un temps donné, la teneur en eau pour une température de l'air à 328 K est inférieure à celle de l'air à 313 K donc le temps de séchage diminue quand la température augmente, ce qui s'explique par l'accroissement du potentiel d'échange entre l'air asséchant et le produit.

D'après cette figure (III.11), on constate que la température de séchage est un paramètre important dans le processus du séchage car le temps de séchage est plus court quand la température est élevée ainsi une vitesse de séchage importante.

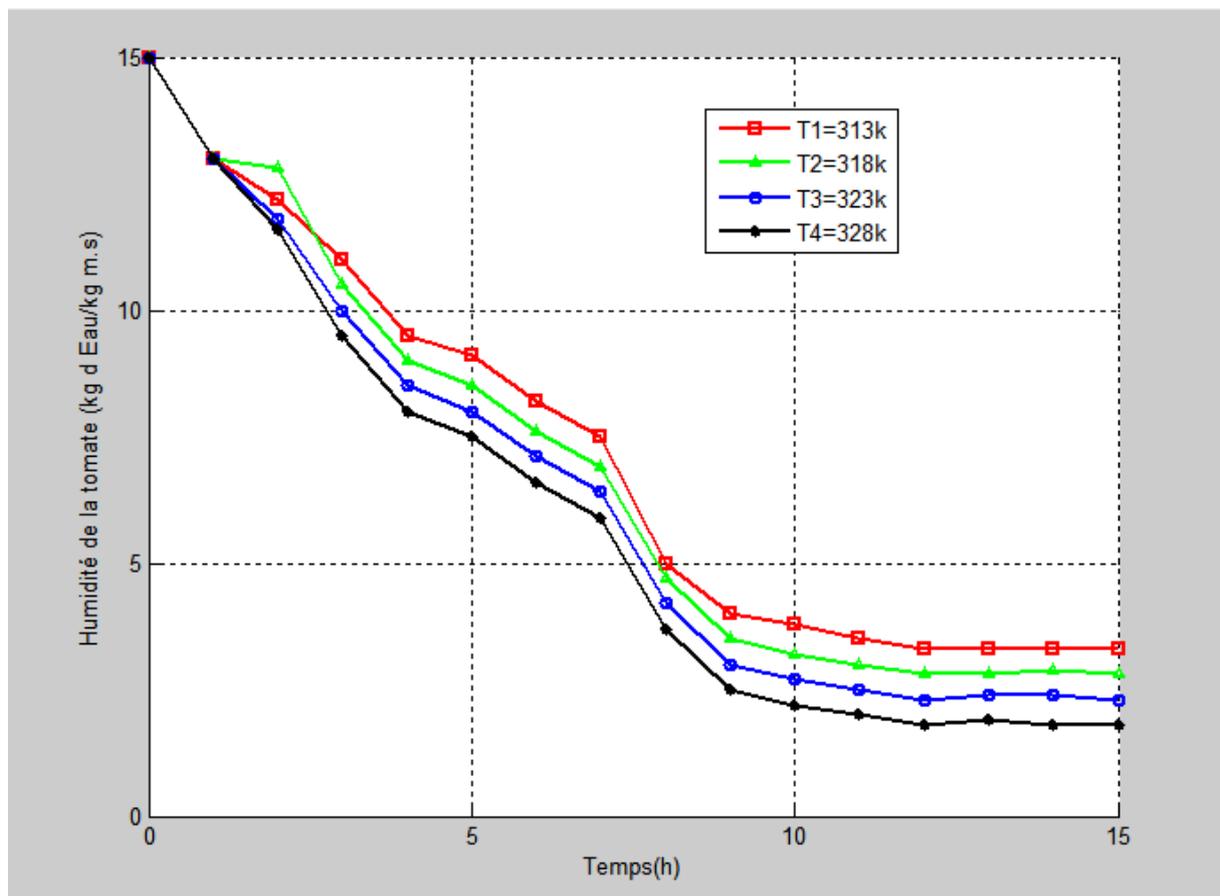


Figure (III.11) : Effet de la température de l'air asséchant sur l'humidité de Tomate pour  $j=1$ .

### X.7 L'influence de la température de l'air asséchant sur la température du produit (tomate)

La figure (III.12), présente l'évolution de la température du produit (tomate) au niveau de la première claie, au cours du temps pour différentes valeurs de la température de l'air asséchant de 313 K, 318 K, 323 K et 328 K ; on remarque que l'influence la température apparaît comme un paramètre important dans le processus de séchage car l'augmentation de la température de l'air chaud permet de donner plus de chaleur au produit d'où sa température augmente.

L'air à 328 K dispose de plus de chaleur pour évaporer l'eau et augmenter la température du produit comparée à 313 K. On remarque que pour une durée de 10 heures de séchage, la température de la tomate atteint 310 K pour une température de l'air chauffé de l'ordre de 328 K et 305 K pour température de l'air 313 K.

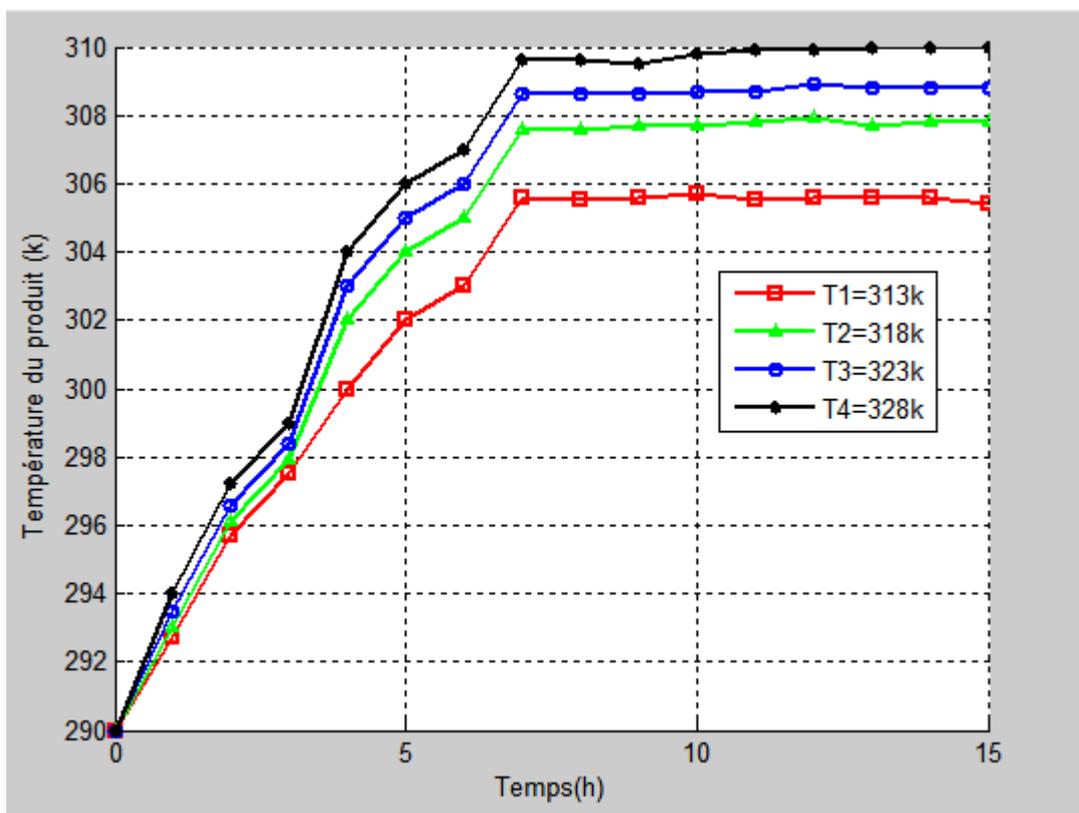


Figure (III.12) : Effet de la température de l'air asséchant sur la température de Tomate pour  $j=1$ .

### X.8 L'influence de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité du produit

La figure (III.13), présente la variation de la teneur en eau du produit pour différentes vitesses de l'air asséchant, la vitesse varie pour des valeurs de 0,5 m/s, 1m/s, 1.5 m/s, 2 m/s avec une masse de 1kg posé sur la 1<sup>ère</sup> claie et une température de 313 K.

On remarque que l'augmentation de la vitesse de l'air provoque la diminution de la teneur en eau du produit, et par conséquent, une diminution du temps de séchage. La rapidité du processus de séchage, peut s'expliquer par l'augmentation de l'échange convectif à la surface du produit et l'air asséchant et par conséquent l'augmentation du taux d'évaporation. De même pour la vitesse de l'air caloporteur, une augmentation de 0,5 m/s à 2 m/s engendre une diminution relative du temps de séchage, cela est dû à l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur et de masse entre le produit et l'air asséchant.

L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température de l'air. Ceci s'explique aussi par le fait que la température du produit baisse (refroidissement) causé par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant d'où une diminution de la pression de la vapeur d'eau ce qui implique une diminution de l'évaporation de l'eau.

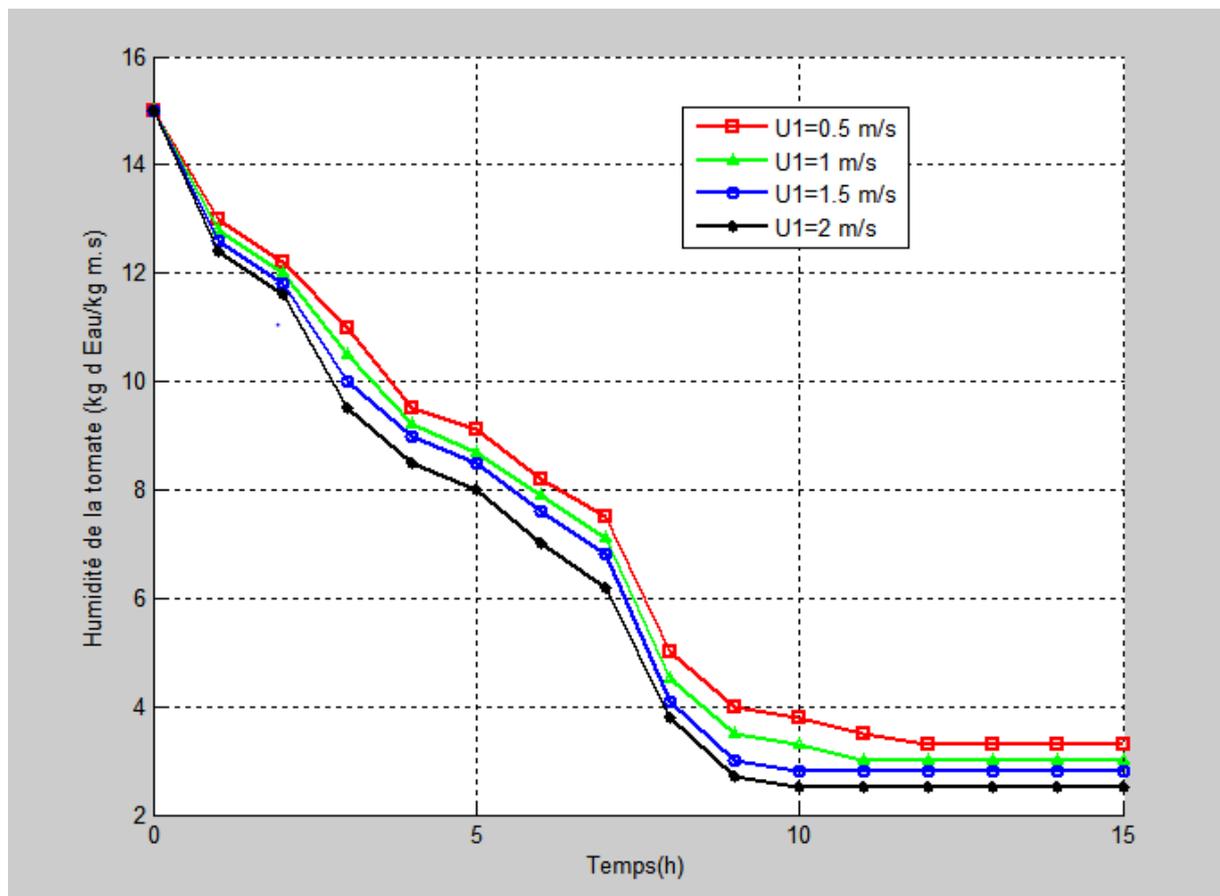


Figure (III.13) : Effet de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité de Tomate pour  $j=1$ .

## CONCLUSION

L'étude théorique de l'enceinte de séchage permet, de distinguer une différence de séchage du produit qui se trouve sur les différentes claies du séchoir. L'étude permet également de déterminer l'influence des différents paramètres comme la température et la vitesse de l'air asséchant sur la variation de la température et la teneur en eau de produit à sécher.

Un modèle numérique qui décrit le comportement thermique du séchoir est développé et permet de calculer et de tracer l'évolution des différents paramètres tels que l'humidité et la température de produit et la variation de ces paramètres en fonction des claies.

La progression de l'air chauffé en hauteur, c'est-à-dire son passage par plusieurs claies dans le séchoir, conduit à l'augmentation de la teneur en eau du produit de ces claies. La cause de cela est l'eau dégagée du produit sous forme de vapeur d'eau, récupérée par l'air ce qui diminue sa température et par conséquent la chaleur apportée à ce produit.

De ce fait, l'augmentation de la température et la vitesse de l'air asséchant (élévation du pouvoir évaporateur de l'air asséchant) permet d'accroître les échanges thermiques et massiques et par conséquent elle permet d'élever les quantités d'eau évaporées et la température du produit à sécher.

De même pour la température du milieu à sécher, les premières claies ont presque atteint la température de l'air asséchant après un temps plus court, tandis que les dernières sont à la température ambiante. Ceci, disparaît graduellement dans le temps.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

**N**otre travail consiste en l'étude de l'optimisation d'un système de séchage des produits agro-alimentaires et plus particulièrement la tomate avec un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée. Ce travail, nous a permis d'étudier les effets de quelques paramètres sur le séchage et d'en préciser les plus influents.

Pour ce faire, nous avons procédé à la simulation mathématique de notre séchoir, en développant un modèle pour la chambre de séchage. Dans ce modèle théorique, nous avons introduit des formules tenant compte des différents paramètres affectés par le changement de l'état de produit en cours de déshumidification. Pour la résolution de ce modèle, nous avons choisi la méthode de résolution numérique 'méthode de Déterminant' pour résoudre les équations qui décrivent le comportement thermique des séchoirs, dont la solution donne les différentes températures du modèle, permettant ainsi de calculer les différentes grandeurs énergétiques recherchées.

Afin de valider notre séchoir, nous avons comparé certains de nos résultats, représentés sous forme de courbes, aux résultats des travaux publiés dans la littérature. Les résultats comparés nous ont permis de conclure à la validité de notre modèle.

A partir du modèle élaboré, nous avons simulé le séchage de la tomate dans des conditions aérothermique diverses. Quant aux facteurs qui influencent la cinétique de séchage, on peut affirmer que la vitesse et le temps de séchage de la tomate dépendent de plusieurs facteurs.

- L'augmentation de la température de l'air asséchant, qui est le paramètre le plus influent, conduit à l'augmentation de taux d'humidité au sein du séchoir et par conséquent, la réduction de la durée de séchage.
- 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.
- On note également une réduction notable de la durée de séchage avec l'augmentation de la vitesse et de la température de l'air asséchant. Cette amélioration est plus influencée par la température que par la vitesse de l'air asséchant.
- La variation de la disposition du produit sur les claies 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 le produit, autrement, lorsque le produit à sécher est disposé sur les dernières claies, la température de produit va diminuer par la suite d'un faible transfert de chaleur qui se traduit par une faible vitesse de séchage.
- L'utilisation des vitesses d'air chaud différentes ce qui est assuré par le moyen d'un variateur de vitesse (ventilateur), en vue de modifier le transfert de chaleur permet d'abaisser ou d'augmenter la température de l'air chaud afin de faire varier l'humidité de l'air asséchant.

L'objectif de cette étude était de rechercher les paramètres optimaux permettant au séchoir de réduire considérablement l'humidité du produit séché dans un temps relativement court. Le contrôle des paramètres étudiés nous amène à une augmentation dans la vitesse de séchage et par conséquent la possibilité d'améliorer les performances de ce procédé.

L'étude du séchage de la tomate posée sur les différentes claies, nous a permis de constater que les paramètres aérothermiques (vitesse et température) de l'air asséchant sont les plus influents sur le processus du séchage du produit.

Les résultats de simulation sur la tomate étant prometteurs, nous avons pu définir les valeurs des différents paramètres de séchage, conduisant à la meilleure performance du séchoir.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Salah Eddine Bensalem, « *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires* », Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2011.
- [2] Amina Benhammou, « *Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales* », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Février 2010.
- [3] Hasni Hadjèr, « *Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire* » ; Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [4] (<http://dspace.univ-tlemcen.dz>, Analyse des pertes thermiques, chapitre I, 2012, 2016.
- [5] « *Jacques Teller* », [www.lemma.ulg.ac.be](http://www.lemma.ulg.ac.be), Confort Thermique, Université de Liège, 2016.
- [6] Abdelaziz Benkhelifa, « *Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur* » ; Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [7] Kamelia Helali, « *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative* » ; Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2013.
- [8] Rayonnement solaire – *Aspects géométriques et énergétiques*, Technique de l'ingénieur.
- [9] Slimane Boughali ; « *Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques* », Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna ,2010.
- [10] Fariza Meziani, « *Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG* » ; Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.
- [11] Alain Ricaud Jan ; « *Gisement solaire et transferts énergétiques* », Master Energies Renouvelables, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [12] Abdellouahab Benseddik, « *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs indirects fonctionnant en convection forcée* », Thèse de Magister, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, 2011.
- [13] [www.lyc-emperi.ac-aix-marseille.fr](http://www.lyc-emperi.ac-aix-marseille.fr), L'énergie solaire 'Dossier Ressource' ; DR-NRJ, 2016
- [14] Fayçal Kalla, « *Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire* », Thèse de Magister, Université de Batna, 2014.
- [15] Souad Saadi, « *Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan* » Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.

- [16] [www.regie-energie.qc.ca](http://www.regie-energie.qc.ca), Développement de l'énergie solaire, Demande R-3671-2008 AEE-9, Document 4.2016.
- [17] [www.cea.fr](http://www.cea.fr), CLEFS CEA - N°50/51 - HIVER 2004-2005. 2016.
- [18] Loick Nossent et Loick Hamel, « *L'énergie solaire : Thermique et Photovoltaïque* », Gymnase de Nyon, 2008-2009.
- [19] « *David Wilgenbus* », <http://www.inrp.fr>, Dossier « *L'énergie solaire* » ;
- [20] Houhou Hatem, « *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires* », Thèse de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [21] Boumediene Touati, « *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte* », Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 2008.
- [22] Boussalia Amar, « *Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux* », Thèse de Magister ; Université Mentouri – Constantine, 2010.
- [23] Jean Vasseur, « *Séchage industriel : principes et calcul d'appareils* », Technique de l'ingénieur, 2011.
- [24] ([www.fapu.org](http://www.fapu.org)), 2016.
- [25] Lyes Bennamoun, « *Contribution à l'étude des transferts couples avec changement de phase dans un milieu poreux. Influence des conditions d'air variables sur les cinétiques de séchage et le comportement global d'un séchoir solaire* », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Mentouri Constantine.
- [26] Mouafki Achoura, « *Modélisation-Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe* », Thèse de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [27] N. Chalal et al, « *Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect* », Revue des Energies Renouvelables, SMSTS'08, Alger, (2008) pp. 117 - 126.

NOM : MISSOUM

Date de soutenance : 19 Juin 2016

Prénom : Djamel Eddine

Titre : Optimisation d'un Système de Séchage Solaire des Produits Agro-alimentaires

Nature : Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables

### ملخص

التجفيف هي واحدة من التقنيات الرئيسية لحفظ المنتجات الزراعية والغذائية؛ في هذه الدراسة تركز النظرية على تحسين نوع الغير مباشر للمجفف الشمسي الذي يتحرك فيه الهواء بطريقة قسرية. ويتألف من تطوير نموذج رياضي لوصف السلوك الحراري والطاقة الحيوية للمجفف. وقد تم الحصول على هذا النموذج الرياضي من خلال تطبيق قوانين انتقال الحرارة والكتلة في مختلف الشرائح المشكلة للمجفف الشمسي. هذا النموذج محقق من صحته من قبل العديد من الدراسات على الطماطم والتي بعد ان تجف، هي ذات أهمية كبيرة لصناعة المواد الغذائية. وبالتالي فإنه يتكون من نظام معادلات لحلها نستخدم برنامج المحاكاة MATLAB حققنا نتائج التي تصف تغير درجة الحرارة والرطوبة بدلالة الزمن و وفق الاطباق المختلفة و مختلف درجات حرارة وسرعة هواء التجفيف. وأظهرت النتائج أن وضع المنتج (الطماطم) في حجرة التجفيف و درجة حرارة وسرعة هواء التجفيف من المؤثرات الهامة جدا على عملية التجفيف.

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف, المجفف الشمسي, المنتجات الزراعية والغذائية- التحسين.

### Abstract

Drying is one of the main techniques of preservation of agricultural and food products. The theoretical study focuses on optimizing an indirect type of solar dryer running in forced convection. It consists to develop a mathematical model to describe the thermal behavior and the energetic power of the dryer. This mathematical model has been obtained by application of heat transfer laws and mass in the various slices constituting the solar dryer. The model is validated by several studies on tomato which after being dried and ground, is of great interest to the food industry. It therefore consists of a system of equations to solve it using a MATLAB software'. We have achieved results that describe the variation of temperature and humidity according to time for different screens and different temperatures and air speed drying. The results show that the disposition of product in the drying cabinet as well as that of the drying temperature and the air speed are very important parameters that influence the drying process in very important ways.

**Key words:** drying, solar dryer, agricultural food product, optimizing.

### Résumé

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits agricoles et alimentaires. L'étude théorique menée sur l'optimisation d'un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée. Elle consiste à développer un modèle mathématique permettant de décrire le comportement thermique et le pouvoir énergétique de ce séchoir. Ce modèle mathématique a été obtenu par application des lois de transfert de chaleur et de masse au niveau des différentes tranches constituant le séchoir solaire. Ce modèle est validé par plusieurs études sur la tomate qui, après être séchée et broyée, présente un grand intérêt pour l'industrie alimentaire. Il est donc constitué d'un système d'équations pour le résoudre on à utiliser 'le logiciel MATLAB'. Nous avons obtenu des résultats qui décrivent la variation des températures et l'humidité en fonction du temps pour les différents claies et pour différents températures et vitesse de l'air asséchant. Les résultats montrent que la disposition de produits dans l'armoire de séchage ainsi que la température et la vitesse de l'air asséchant sont des paramètres qui influent de façons très importantes le processus de séchage.

**Mots clés :** séchage, séchoir solaire, produit agroalimentaire, optimisation.