

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Mécanique & Energétique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : ENERGETIQUE  
Thème

**Bilan thermique d'un sécheur de tomate de  
type à tambour rotatif**

Soutenu : le 15/09/2020

Présenté Par :

Mr : BENBAHI Mohamed

Mr : MORAKCHI Billel Abdelilleh

Devant les jurys composés de :

Pr. BOUAFIA Farida

CUBBAT

Président

Dr. BELHAMIANI Mohamed

CUBBAT

Encadrant

Pr. OUDAD Wahid

CUBBAT

Examineur

*Année universitaire 2019/2020*

## **Remerciement**

*Nos remerciements vont tout premièrement à « Allah » tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour terminer ce travail.*

*Nous remercions notre encadreur M. BELHAMIANI Mohamed pour sa collaboration et pour son orientation avec nous.*

*Nous adressons nos remerciements à tous les orienteurs, tous ceux qui d'une façon ou d'une autre a fait part de leur aide.*

*Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Nous remercions vont aussi à nos familles*

***Merci***

## **Résumé**

Ce travail présente une étude expérimentale du procédé de séchage d'un produit agro-alimentaire (la tomate) dans un séchoir tambour rotatif.

Le principal objectif étant d'une part l'étude de la cinétique de séchage de la tomate et d'autre part l'étude comparative des phénomènes de transfert de chaleur.

**Mots clés :** séchage, tomates cinétiques, transfert de chaleur, tambour rotatif.

## Tables des matières

I.1 Introduction.....	4
I.2 Le séchage.....	4
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Historique.....	4
I.2.3 Domaines d'utilisation .....	5
a. <b>Industrie agroalimentaire</b> .....	5
b. <b>Industrie papetière</b> .....	5
c. <b>Industrie du bois</b> .....	5
d. <b>Bouchons de liège</b> .....	6
e. <b>Matériaux de construction</b> .....	6
f. <b>L'industrie céramique</b> .....	6
I.3 Caractéristiques de l'air de séchage .....	6
I.3.1 Humidité absolue .....	6
I.3.2 Humidité relative.....	6
I.3.3 Degré de saturation .....	7
I.3.4 Températures caractéristiques de l'air humide .....	7
a. <b>Température de bulbe sec</b> .....	7
b. <b>Température de bulbe humide</b> .....	7
c. <b>Température de rosée</b> .....	8
d. <b>Température de saturation adiabatique <math>T_{sa}</math></b> .....	8
I.4 Caractéristiques des solides humides.....	8
<b>I.4.1 Porosité volumique d'un produit</b> .....	8
I.4.2 Description du solide humide .....	9
I.4.3 Humidité absolue (teneur en eau à base sèche).....	10
I.4.4 Humidité relative (teneur en eau à base humide).....	10
I.4.5 Hygroscopicité .....	10
I.5 Modes de transfert de la chaleur .....	11
I.5.1 Conduction.....	11
I.5.2 Convection .....	12
I.5.3 Rayonnement .....	12
I.6 Procède de séchage .....	13
I.7 Les modes de séchage.....	13
I.7.1 Séchage Thermique.....	13

## Tables des matières

<i>a.</i>	<i>Au soleil</i> .....	13
<i>b.</i>	<i>Séchage a l'air libre</i> .....	14
<i>c.</i>	<i>Séchage par entraînement</i> .....	14
<i>d.</i>	<i>Séchage par ébullition</i> .....	15
<i>e.</i>	<i>Le séchage à l'étuve</i> .....	15
<i>f.</i>	<i>Le séchage par micro-onde</i> .....	15
I.7.2	Non thermiques .....	16
<i>a.</i>	<i>La lyophilisation</i> .....	16
<i>b.</i>	<i>Le séchage osmotique</i> .....	16
I.8	Classifications des séchoirs industriels .....	17
<b>I.8.1</b>	<b>Propriété physique de la matière</b> .....	17
<b>I.8.2</b>	<b>Méthode d'approvisionnement en énergie</b> .....	17
I.8.3	La gamme de température.....	17
<b>I.8.4</b>	<b>Mode de répartition des nourritures</b> .....	17
<i>a)</i>	<i>Séchage en couche mince</i> .....	17
<i>b)</i>	<i>Séchage en couche épaisse</i> .....	17
I.9	Appareillage.....	17
I.9.1	Sécheur à chariots à claies .....	17
I.9.2	Sécheur à tambour rotatif.....	18
I.9.3	Sécheur tunnel.....	18
I.9.4	Séchage par fluidisation .....	19
I.9.5	Broyeur-Sécheur par fluidisation.....	19
I.9.6	Séchage par atomisation.....	20
I.10	Conclusion sur les avantage et inconvénient de séchage .....	21
I.10.1	Les avantages du séchage .....	21
I.10.2	Les inconvénients du séchage .....	22
II.1	Définition.....	25
II.2	Fonction globale .....	25
<b>II.2.1</b>	<b>Les organes</b> .....	25
<b>II.2.2</b>	<b>Les commandes</b> .....	25
<b>II.2.3</b>	<b>Schéma du principe de fonctionnement du séchoir rotatif</b> .....	25
II.2.4	Architecture du séchoir.....	26
II.3	Produit à sécher.....	26
II.3.1	Fiche technique.....	26
II.4	Principe de fonctionnement .....	27

## Tables des matières

II.4.1 Hypothèses.....	27
a) <i>Par convection</i> .....	27
b) <i>Par conduction</i> .....	28
c) <i>Par rayonnement</i> .....	28
II.5 Caractéristiques du système.....	28
II.5.1 L'air asséchant.....	28
a) <i>Masse volumique</i> .....	28
b) <i>Vitesse de l'air</i> .....	28
c) <i>Viscosité dynamique et Conductivité thermique de l'air</i> .....	29
II.5.2 Le cylindre .....	30
II.5.3 La tomate .....	30
a) <i>Aire d'échange de tomate</i> .....	30
II.6 Les coefficients de transfert thermique.....	32
II.6.1 Transfert thermique par conduction.....	32
a) <i>Conductance du cylindre avec calorifuge</i> .....	32
b) <i>Conductance entre deux volumes de tomate consécutive</i> .....	33
II.6.2 Transfers thermique par convection .....	33
a) <i>La convection naturelle</i> .....	33
b) <i>La convection forcée</i> .....	35
c) <i>Le coefficient de convection entre l'air asséchant et la tomate</i> .....	35
II.7 Chaleur latente massique de vaporisation.....	37
II.8 Les capacités thermiques .....	38
a) <i>La capacité thermique C :</i> .....	38
b) <i>Le cylindre</i> .....	39
c) <i>La tomate</i> .....	39
III.1 Présentation .....	41
III.2 Principe de fonctionnement.....	41
III.2.1 Saisie de schéma.....	42
III.2.2 Barre d'icônes d'OrCad.....	42
a) <i>Barre d'icônes d'OrCad Capture spécifique à la simulation</i> .....	42
b) <i>Barres d'icônes d'OrCad PSpice</i> .....	43
c) <i>Barre d'icônes « File »</i> .....	43
d) <i>Barre d'icônes « Curseur »</i> .....	44
e) <i>Barre d'icônes « View »</i> .....	44
f) <i>Barre d'icônes « Simulate »</i> .....	44

## Tables des matières

III.2.3 Appel des composants .....	44
III.2.4 Dénominations des principaux éléments simulables : .....	46
<b>a) Les composants analogiques</b> .....	<b>46</b>
<b>b) Les composants numériques</b> .....	<b>46</b>
<b>c) Les sources</b> .....	<b>46</b>
III.2.5 Connexions et paramètres des composants .....	47
III.2.6 Les sources et leurs paramètres .....	47
<b>a) Sources analogiques</b> .....	<b>47</b>
III.3 Simuler et observer les résultats .....	48
III.4 Simulations réalisées sur PSPICE .....	48
III.4.1 Sources de chaleur .....	49
III.4.2 Les capacités thermiques .....	49
III.4.3 Les résistances .....	49
<b>a) Entre la paroi externe et le milieu ambiant</b> .....	<b>49</b>
<b>b) A travers les parois du cylindre</b> .....	<b>49</b>
<b>c) Entre l'air de séchage et la paroi interne du cylindre</b> .....	<b>49</b>
<b>d) Entre l'air de séchage et la tomate</b> .....	<b>50</b>
<b>e) Entre deux volumes de contrôle de la tomate</b> .....	<b>50</b>
III.5 Connexion des résistances thermiques .....	50
III.5.1 Désignation des différents nœuds .....	51
III.5.2 Désignation des résistances thermique .....	52
III.6 Description du réseau thermique .....	53
III.6.1 Dessin du réseau thermique .....	53
III.6.2 Description du réseau en l'absence du schéma .....	53
III.6.3 Sources liées : Evalue et Gvalue .....	53
III.7 Le flux d'énergie contenu dans la vapeur quittant la tomate .....	54
III.7.1 La simulation et résultats obtenus .....	57
<b>a) Au niveau de l'air</b> .....	<b>59</b>
<b>b) Au niveau de la tomate</b> .....	<b>60</b>

# Nomenclature

## I. Indices

a:	air asséchant
am:	ambiance extérieure
c:	cylindre
cl:	calorifuge
e:	extérieur
i:	intérieur
pe:	paroi extérieur
pi:	paroi intérieur
t:	tomate

## II. Lettres latines

$T_a$  : température L'air chaud

$T_t$  : température de la tomate

$D$  : diamètre

$D_i$  : diamètre intérieur

$D_e$  : diamètre extérieur

$V_{tr}$  : volume de tronçon

$V_t$  : volume de la tomate

$A$  : surface totale d'échange

$S_{t,a}$  : surface total d'échange entre l'air asséchant et la tomate

$l$  : la longueur

$m_a$  : Débit d'air

$S$  : surface

$V$  : vitesse d'air

$P_a$  : pression atmosphérique

$e_{cl}$  : Épaisseur de calorifugeage

$L_v$  : La chaleur latente massique de vaporisation

$L_{vi}$  : la chaleur de vaporisation de l'eau libre

$C_{p_{vs}}$  : capacité calorifique massique à pression constante de la vapeur au voisinage de la courbe de saturation (J/kg.K)

$C_{p_l}$  : capacité calorifique massique à pression constante de l'eau liquide au voisinage de la courbe de saturation (J/kg.K)

$C_p$  : Chaleur massique de l'élément (J/kg.k)

## Nomenclature

$h_c$ : coefficient d'échange thermique par conduction ( $W/m^2.K$ )

$h_v$ : coefficient d'échange thermique par convection ( $W/m^2.K$ )

### III. Lettres grecques

$\mu_a$  : viscosité dynamique

$\Delta\theta$  : Différence température

$\rho$  : La masse volume de l'élément ( $kg/m^3$ )

$\varepsilon$  : la porosité

$\lambda_c$  : Conductivité thermiques

# Introduction générale

## Introduction Générale

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits agricoles et alimentaires. C'est par ailleurs un procédé qui intervient dans la fabrication de nombreux produits alimentaires, comme étape à part entière de la transformation ou à titre accessoire (congélation, cuisson, ...). La compréhension des phénomènes mis en jeu repose sur une bonne connaissance des équilibres entre l'air et le produit et sur la maîtrise des cinétiques de séchage et de transformation du produit.

Pour sécher on peut étaler le produit à l'air libre pendant un temps assez long, c'est ce qu'on appelle le séchage naturel. Il présente des inconvénients du fait que le temps de séchage est relativement long selon les conditions météorologiques mais aussi le produit ne sera pas à l'abri des poussières et des microbes de toute nature.

Cette méthode n'étant pas adaptée pour une production semi industrielle ou industrielle, on est dans l'obligation de trouver un équipement de séchage qui va permettre d'obtenir la teneur en humidité en un temps minimal sans dégradation du produit mais également capable de produire à l'échelle industrielle.

De ce fait il ne faut pas oublier aussi que la difficulté fondamentale d'une conception d'un équipement de séchage réside dans la connaissance des propriétés thermo physiques des produits à sécher.

Notre contribution sur le développement de ce type d'activité pour une meilleure satisfaction de la demande est la mise sur pied d'un séchoir à cylindre rotatif dont l'identification des conditions optimales de séchage est basée sur une étude purement théorique en application de l'analogie thermo-électrique.

Pour mener à bien le travail nous avons adopté la méthodologie suivante :

Le premier Chapitre : présente une synthèse bibliographique comme la définition de séchage et les différences modes de séchage, les appareillages ainsi que les domaines des séchages.

Le deuxième Chapitre : nous allons caractériser le système de séchage et établir les équations qui le régissent c'est-à-dire son architecture et son principe de fonctionnement ce qui va nous amener à l'identification des différents phénomènes thermiques et les équations mathématiques qui les modélisent.

## **Introduction générale**

Le troisième chapitre : C'est seulement à partir de ce moment qu'on peut passer à la partie simulation à partir du logiciel PSPICE en faisant une variation des paramètres d'entrés jusqu'au point de fonctionnement optimal.

# **Chapitre I**

## *Généralités sur les Sécheurs*

## **I.1 Introduction**

Par définition, le séchage est une opération qui permet d'extraire plus ou moins une partie de l'eau présente dans un matériau. C'est l'un des procédés les plus anciens utilisés pour la conservation des denrées agro-alimentaires.

Cette partie est consacrée à quelques rappels sur les principes du séchage et à la présentation des principaux modèles de séchage.

## **I.2 Le séchage**

### **I.2.1 Définition**

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle ; Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants. Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés. Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant.

### **I.2.2 Historique**

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois), ou pour les textiles (lavage, teinture, ...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.)[1].

### **I.2.3 Domaines d'utilisation**

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 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.

#### ***a. 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 un rôle dans la conservation de l'aliment. Il n'existe pas moins de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire.

On peut citer par exemple :

- Les pâtes alimentaires
- La viande fumée : saucisson, jambon...
- Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée
- Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation
- Les 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.
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné.
- La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices... Certains produits en poudre : cacao, lait, ...

#### ***b. Industrie papetière***

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

#### ***c. Industrie du bois***

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois.

**d. Bouchons de liège**

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.

**e. Matériaux de construction**

Briques, carrelages, ...

**f. L'industrie céramique**

Assiettes, bols, plats...

**g. La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique**

Levure en poudre Antibiotiques [1]

**I.3 Caractéristiques de l'air de séchage**

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes ; O<sub>2</sub> : 0,210, N<sub>2</sub> : 0,781, Ar : 0,009 L'air humide peut être considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

**I.3.1 Humidité absolue**

On définit l'humidité absolue  $H_a$  (kg<sub>v</sub> /kg<sub>as</sub>) comme la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air en kg par kg d'air sec. Cette humidité est donnée par la relation :

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (I.1)$$

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

**I.3.2 Humidité relative**

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

$$H_r = \frac{p_v}{p_s} \quad (I.2)$$

### I.3.3 Degré de saturation

Soit  $H_a$  la valeur de l'humidité absolue de l'air pour une certaine température et  $H_{as}$  la valeur de l'humidité absolue de l'air saturé pour la même température ; on appelle degré de saturation de l'air, le rapport :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I.3)$$

### I.3.4 Températures caractéristiques de l'air humide

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

#### a. Température de bulbe sec

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment :

Température sèche :  $t_s$  en °C.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante.

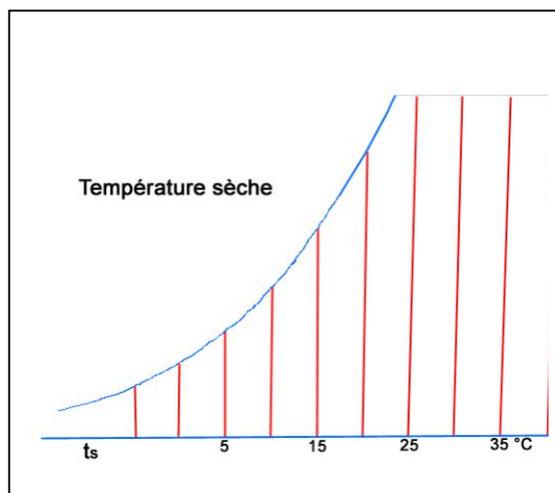


Figure I.1 : Température sèche

#### b. Température de bulbe humide

Si d'un point A du diagramme on se déplace sur une isenthalpique, on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide  $t_h$  du point initial considéré. On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé psychromètre.

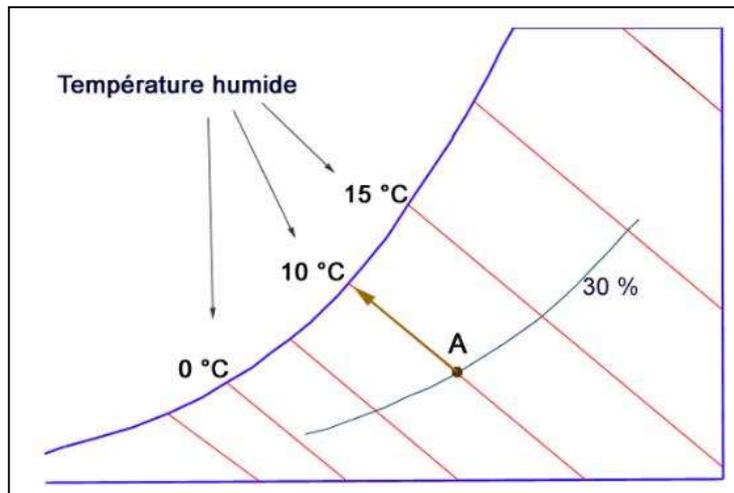


Figure I.2 : Température humide

*c. Température de rosée*

Si on se déplace à partir d'un point A du diagramme, sur une iso hydre, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé point de rosée, dont la température lue sur l'axe horizontal est la température de rosée de A :  $t_r$

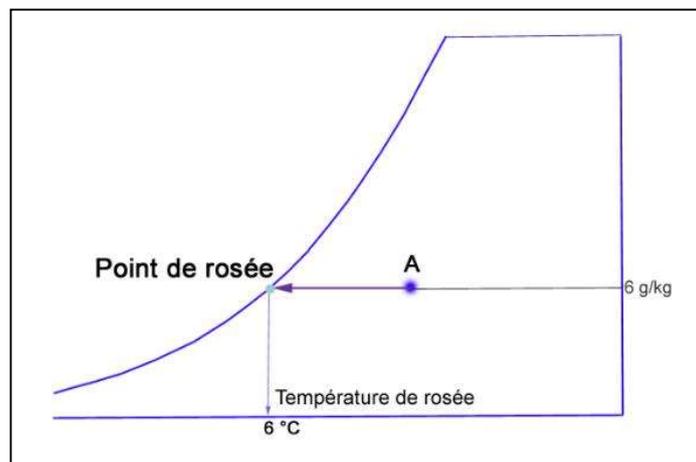


Figure I.3 : Température de rosée

*d. Température de saturation adiabatique  $T_{sa}$*

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température  $T$  [2].

**I.4 Caractéristiques des solides humides**

**I.4.1 Porosité volumique d'un produit**

La porosité volumique  $\varepsilon$  (figure I.4) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad (\text{I.4})$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

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

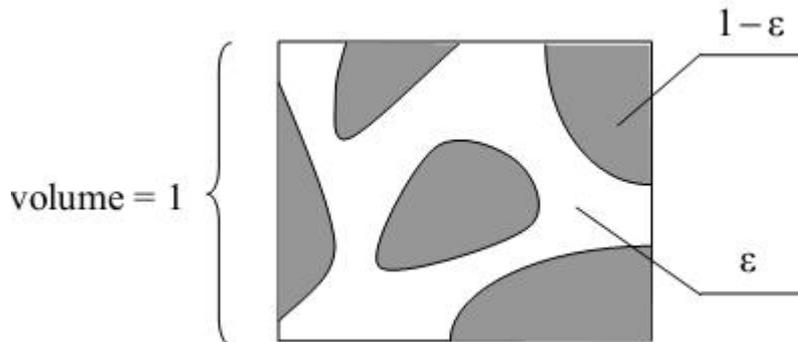


Figure I.4 : Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.5). La définition est équivalente.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de l'amas} - \text{volume du produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad (\text{I.5})$$

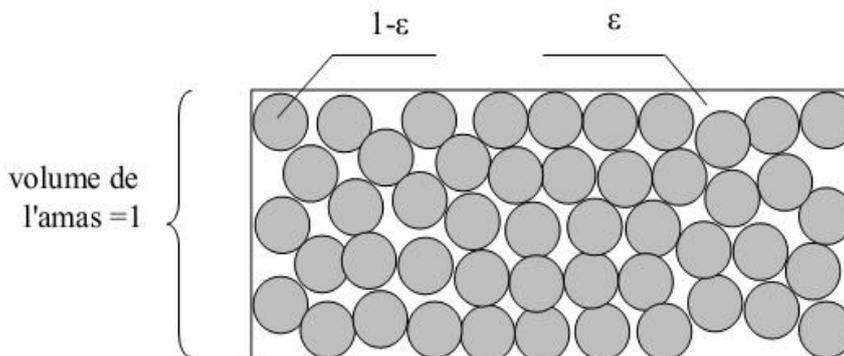


Figure I.5 : Volume de contrôle macroscopique

### I.4.2 Description du solide humide

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses [3].

Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure I.6.

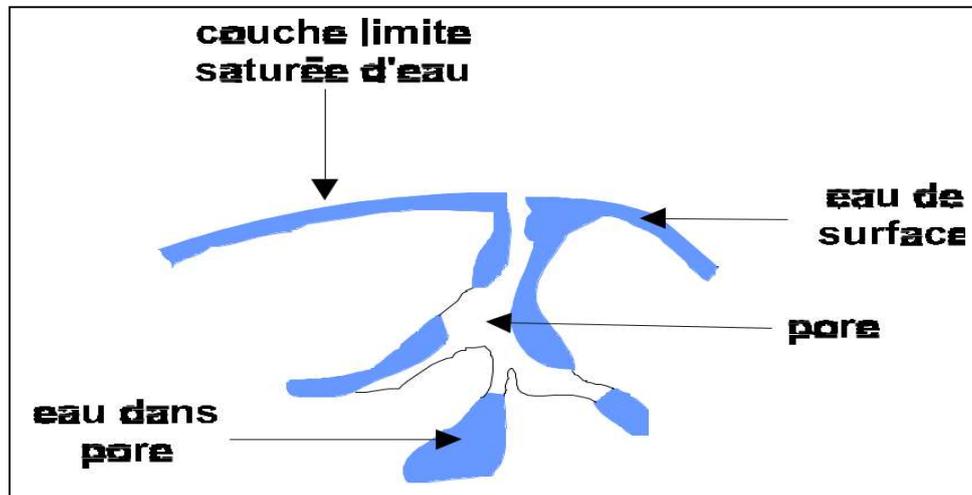


Figure I.6 : Description du solide humide

#### I.4.3 Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse sèche de ce produit.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.6})$$

#### I.4.4 Humidité relative (teneur en eau à base humide)

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport la masse humide de ce produit.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{I.7})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [3] :

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r} \quad (\text{I.8})$$

$$X_r = \frac{X}{1 + X} \quad (\text{I.9})$$

#### I.4.5 Hygroscopicité

Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air et non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air [3].

### I.5 Modes de transfert de la chaleur

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques. Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- L'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- L'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- La réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons [4] :

- Par conduction,
- Par rayonnement,
- Par convection

#### I.5.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence de différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier :

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

qui relie la densité de puissance (unité  $\text{Wm}^{-2}$ ) et le gradient local de température.  $k$  est la **conductivité thermique** du matériau considéré (unité  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

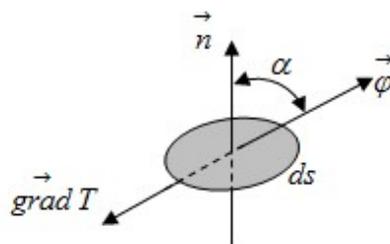
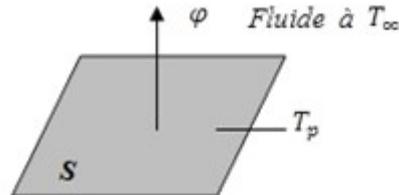


Figure I.7 : Lois de Fourier

### I.5.2 Convection

La convection est un transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = hS(T_p - T_{\infty})$$



Avec : $\varphi$	Flux de chaleur transmis par convection	(W)
$h$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$T_p$	Température de la surface	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\infty}$	Température du milieu environnant la surface	( $^{\circ}\text{C}$ )
$S$	Aire de la surface de contact solide / fluide	( $\text{m}^2$ )

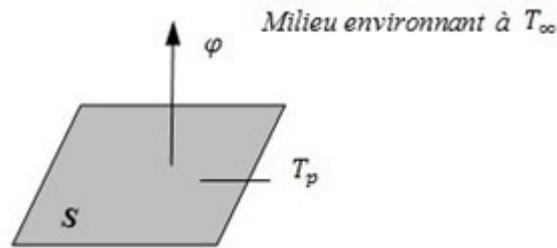
**Figure I.8** : Définition d'un élément de surface d'échange

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

### I.5.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas, nous avons la relation [5]:

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4)$$



Avec : $\varphi$	: Flux de chaleur transmis par rayonnement	(W)
$\sigma$	: Constante de Stephan	( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )
$\varepsilon_p$	: 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	( $\text{m}^2$ )

**Figure I.9** : Élément en rayonnement

## I.6 Procède de séchage

- CIRCULATION air/produit à CONTRE-COURANT : le plus rationnel car cela permet de saturer au maximum l'air par contact avec le produit. Cependant le produit sortant est au contact avec l'air le plus chaud (risque de détérioration) [6].
- CIRCULATION air/produit à CO-COURANT : en pratique la plus utilisée. Elle permet d'attaquer le produit avec un aîtres chaud, donc le début du séchage est très rapide[6].
- CIRCULATION air/produit à COURANT CROISES : il est simple et se prête bien au cas d'un produit transporté sur un tapis. L'air est recirculé en contre et en co-courant [6].
- SYSTEMES MIXTES : (section à co-courant + contre-courant) avec des recyclages partiels d'air sur le séchoir [6].

## I.7 Les modes de séchage

### I.7.1 Séchage Thermique

#### a. Au soleil

Le séchage au soleil s'est largement développé dans les zones arides ou semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée. Le séchage s'effectue sur le sol, sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons. Ce système présente deux principaux avantages pour les communautés : peu de travail et pas d'investissement, mais, très souvent, les résultats obtenus sont médiocres car les produits sont souillés de sable et de poussière, ils subissent les attaques des animaux, des insectes et des micro-organismes, les pertes sont ainsi importantes. De plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui dégrade fortement leur qualité.



**Figure I.10** : Image de séchage de la tomate sous le soleil

***b. Séchage à l'air libre***

Le séchage à l'air libre est réalisé dans l'ombre, avec une circulation naturelle de l'air. La température moyenne de la chambre est de  $22 \pm 2$  °C. Le séchage est contrôlé par convection naturelle.

***c. Séchage par entraînement***

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- Le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation
- L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau.

La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et elle est ensuite entraînée par le gaz.

#### *d. Séchage par ébullition*

Le séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude, séchoirs cylindres...etc.), dans toutes ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale ou dépasse la pression totale ambiante.

#### *e. Le séchage à l'étuve*

Dans ce type de séchage, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif ; la convection est principalement impliquée. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. Le choix de ces deux critères (Taille et temps de séjours) doit être adapté au rapport surface/volume.



**Figure I.11 :** Etuve de séchage

#### *f. Le séchage par micro-onde*

Le chauffage par micro-ondes se rapporte à l'utilisation d'ondes électromagnétiques afin de produire de la chaleur dans le matériel à sécher. Le fonctionnement d'un four à micro-onde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertit l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal), les ondes produites sont dirigées vers l'agitateur d'onde et pénètrent dans l'enceinte métallique où se trouve l'aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire d'être exposé aux ondes qui pénètrent l'aliment pour atteindre les molécules d'eau .

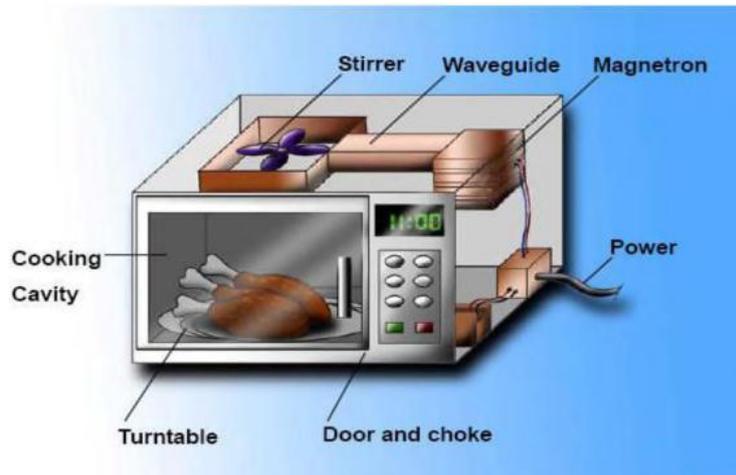


Figure I.12 : Schéma d'une micro-onde

## I.7.2 Non thermiques

### a. La lyophilisation

C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles. La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé « sublimation ». La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'une fraction d'eau liée, à une température de plus en plus élevée. En atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide, ce procédé obéit à des principes comparables à l'ébullition, mais ce séchage peut aussi se faire en présence d'un certain taux de gaz incondensables dans l'atmosphère autour du produit, tel que la pression de vapeur dans le gaz externe soit seulement une pression partielle ppa.

### b. Le séchage osmotique

Ce qu'on appelle déshydratation osmotique dans le domaine de la transformation des fruits et légumes, est un procédé de réduction de la teneur en eau obtenue par immersion de ces derniers, entiers ou en morceaux, dans une solution hypertonique de sucres et/ou saline. En principe, l'osmose décrit les mouvements de l'eau et des solutés qui se produisent quand deux solutions sont séparées par une membrane semi-perméable, en raison de la pression osmotique relative de chaque composant [7].

## **I.8 Classifications des séchoirs industriels**

Les séchoirs industriels sont classés selon :

La classification des appareils peut s'effectuer suivant le procédé (continu, discontinu), le mode de séchage (convection, conduction, rayonnement,), ou le type de produits traités (solides en blocs, poudre, pâte, pulpe, film...)

### **I.8.1 Propriété physique de la matière**

Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

### **I.8.2 Méthode d'approvisionnement en énergie**

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

### **I.8.3 La gamme de température**

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures, sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

### **I.8.4 Mode de répartition des nourritures**

#### ***a) Séchage en couche mince***

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

#### ***b) Séchage en couche épaisse***

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café etc. l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée [8].

## **I.9 Appareillage**

### **I.9.1 Sécheur à chariots à claies**

- Air mis en circulation par un ventilateur
- Faisceau de chauffage à la vapeur ou électrique
- Circulation de l'air au travers des claies des chariots, sur lesquels est disposé le solide à sécher
- Réglage sortie d'air par ventaille

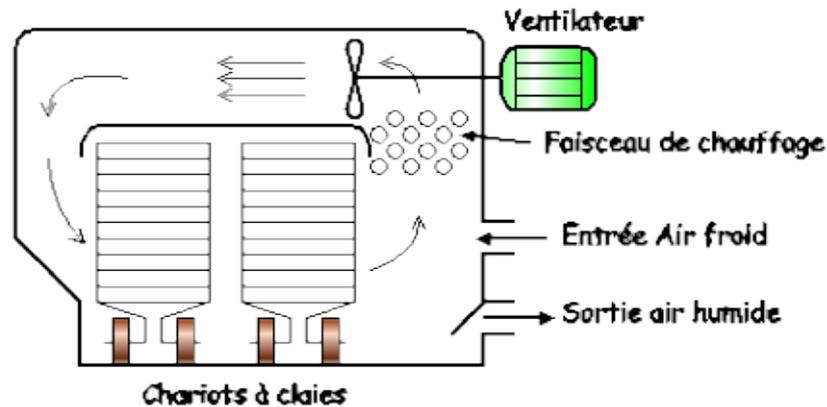


Figure I.13: Sécheur à chariots à claies

### I.9.2 Sécheur à tambour rotatif

- Solide humide alimenté par bande sans fin
- Air chaud alimenté à contre-courant (l'air chaud peut également être remplacé par les fumées chaudes issues d'un brûleur)
- Tambour cylindrique légèrement incliné ( $5^\circ$ ) et en rotation lente, assurant le mélange solide - gaz et le déplacement du solide vers la sortie
- Système d'étanchéité air non représenté

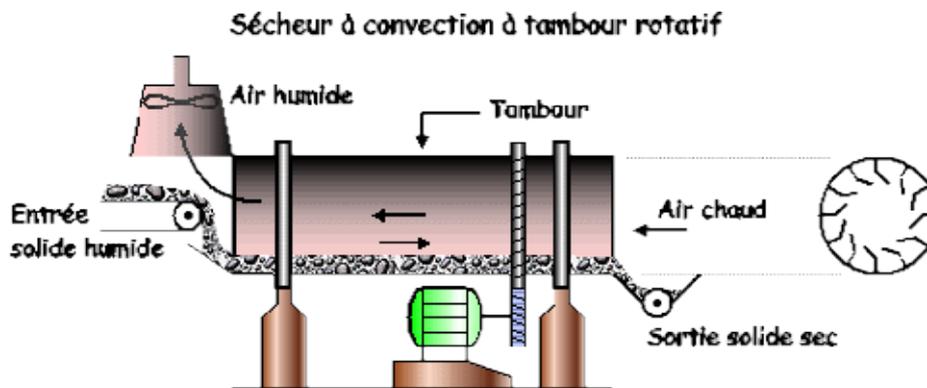


Figure I.14 : Sécheur à tambour rotatif

### I.9.3 Sécheur tunnel

- Solide humide alimenté par vanne rotative à écluses
- Déplacement du solide par bande transporteuse
- Circulation d'air chaud à contre-courant du solide, dans un tunnel formé en général par des caissons de section rectangulaire

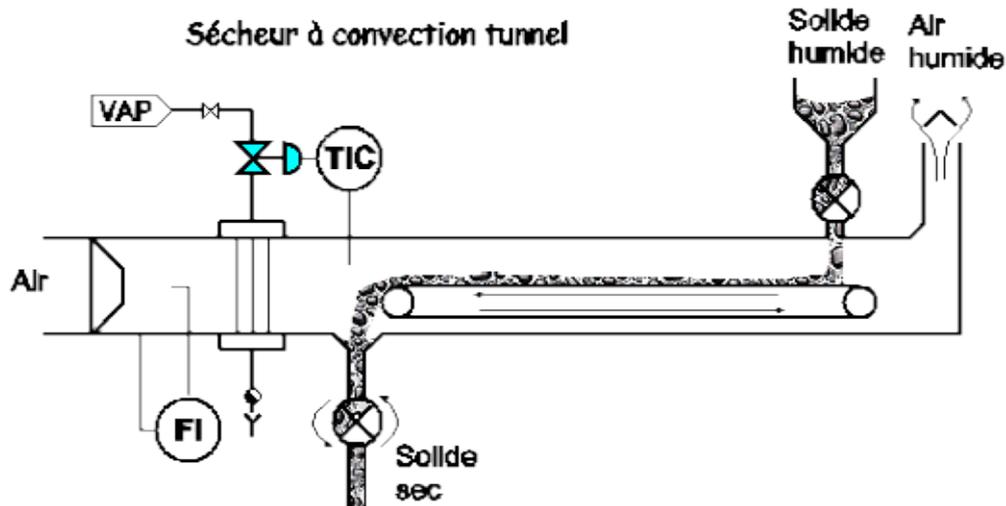


Figure I.15 : Sécheur tunnel

#### I.9.4 Séchage par fluidisation

- Alimentation solide à sécher en continu par vis sans fin
- Alimentation en air chaud répartie uniformément sur toute la surface du lit par une grille de distribution
- Mise en suspension du solide par le courant d'air chaud ascendant ainsi créée (->lit fluidisé). Il en résulte une forte agitation et une mise en contact intime de l'air et du solide, favorisant le séchage
- Cyclone sur la sortie d'air humide pour séparer le solide éventuellement entrainé (de plus faible granulométrie)

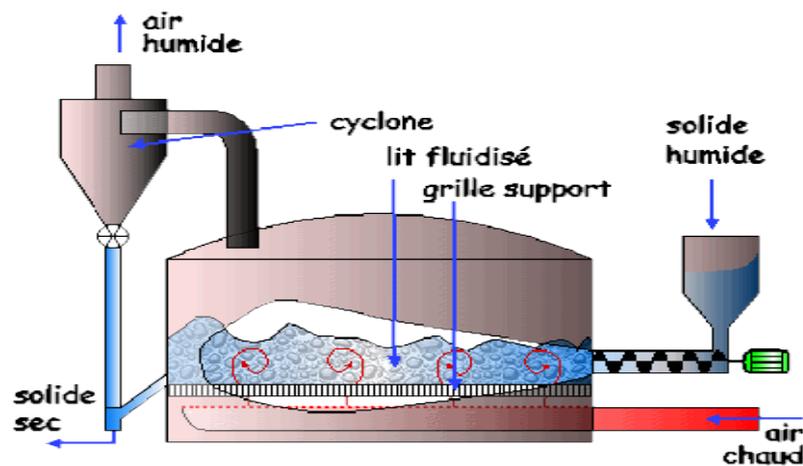


Figure I.16 : Séchage par fluidisation

#### I.9.5 Broyeur-Sécheur par fluidisation

- Alimentation du solide par vis sans fin

- Broyage du solide par rotor inférieur (pour amélioration du séchage et/ou conditionnement)
- Alimentation en air chaud au-dessous du broyeur
- Sortie air + solide par sélecteur centrifuge vertical (les grosses particules sont rejetées pour retourner au broyeur, les particules plus fines étant entraînées avec l'air vers la sortie)

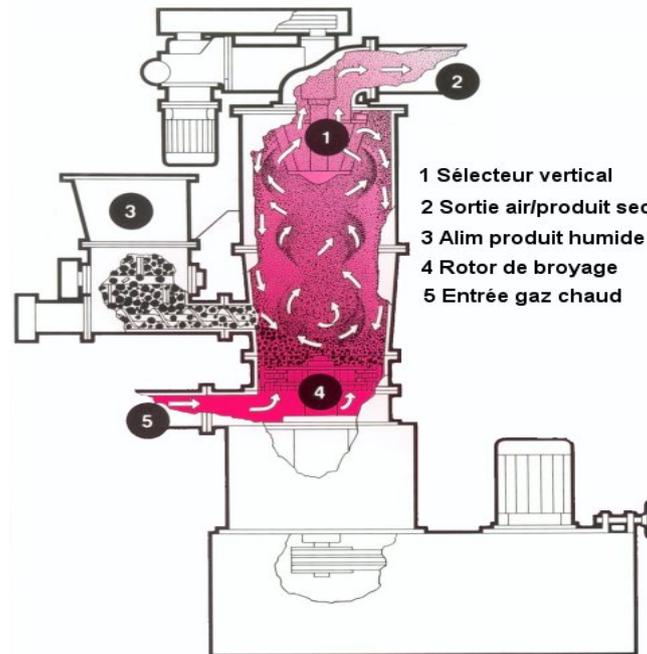


Figure I.17 : Broyeur-Sécheur par fluidisation

### I.9.6 Séchage par atomisation

Lorsque l'évaporation doit être menée jusqu'à l'obtention d'un produit sec, on peut avoir recours à la technique de l'atomisation. L'atomiseur est un appareil dans lequel la solution ou la suspension à sécher est divisée dans un courant de gaz chaud qui apporte les calories nécessaires à l'évaporation du solvant et absorbe, pour l'évacuer, l'humidité libérée par le produit en cours de séchage.

La division du liquide peut être réalisée

- Par un système de bol,
- Par un système de turbine,
- Par des pulvérisateurs sous pression,
- Par des pulvérisateurs à gaz.

Le gaz peut être, suivant le cas, de l'air ou un gaz neutre ; il peut être utilisé soit en circuit ouvert, soit en circuit fermé. Le circuit de gaz peut être soit à contre-courant, soit à concourant du trajet du produit séché.

Le chauffage du gaz peut être réalisé

- Par aérotherme à vapeur,
- Par chauffage indirect par gaz chauds,
- Par chauffage direct par des gaz de combustion,
- Par chauffage électrique.

Le solide sec est séparé du gaz d'atomisation par un (ou des) cyclone(s), ou par filtration (filtre à manches par exemple).

Les gaz rejetés peuvent, si nécessaire, faire l'objet d'une épuration par lavage.

La chaleur contenue dans les gaz rejetés peut utilement être utilisée au préchauffage de l'air d'appoint [9].

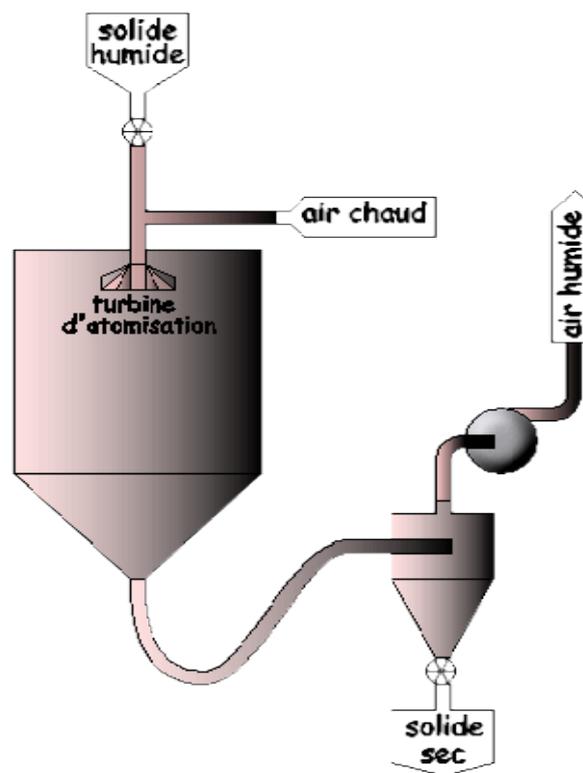


Figure I.18 : Séchage par atomisation

## I.10 Conclusion sur les avantages et inconvénient de séchage

### I.10.1 Les avantages du séchage

Les principaux avantages du procédé de séchage sont [10]:

- 
- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement
  - L'universalité du procédé, accessible à tous, y compris pour les particuliers
  - Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois
  - La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments
  - L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau
  - Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes
  - La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique.

### **I.10.2 Les inconvénients du séchage**

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier :

- Des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, des réactions de brunissement, des durcissements superficiels.
- Des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils.
- La modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

En général, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments [11].

## **Chapitre II**

*Calcul d'un bilan massique et thermique d'un sécheur*

## II.1 Définition

Le sécheur rotatif est l'un des types les plus répandus dans l'industrie. C'est une coquille cylindrique habituellement construite de tôles en acier, légèrement inclinés, d'en général 0.3 à 5 m de diamètre, de 5 à 90 m de longueur et de vitesse de rotation de 1 à 5 tr/min. Il est habituellement actionné avec de la pression interne négative pour empêcher l'échappement de la poussière. Un sécheur rotatif à deux fonctions distinctes ; il sert comme convoyeur et comme dispositif de séchage. Le mouvement des solides dans le sécheur est influencé par les mécanismes suivants : soulèvement, action de cascade, glissement et rebondissement.

## II.2 Fonction globale

Le principe du séchage au séchoir rotatif consiste à évaporer toute l'eau résiduelle après essorage par un courant d'air chaud et sec ; le linge étant constamment agité pendant l'opération de séchage.

### II.2.1 Les organes

- Le tambour : perforé, cylindrique, en acier inoxydable
- Le corps de chauffe : alimenté en vapeur (industrie) ou en électricité
- Le ventilateur : turbine qui crée une dépression, aspire l'air chaud dans le tambour et évacue les buées à l'extérieur
- Le moteur : actionne le tambour et la turbine d'aspiration

### II.2.2 Les commandes

- Réglage de la température : thermostat [12]
- Réglage du temps : minuterie [12]
- Mise en fonctionnement : marche-arrêt [12].

### II.2.3 Schéma du principe de fonctionnement du séchoir rotatif

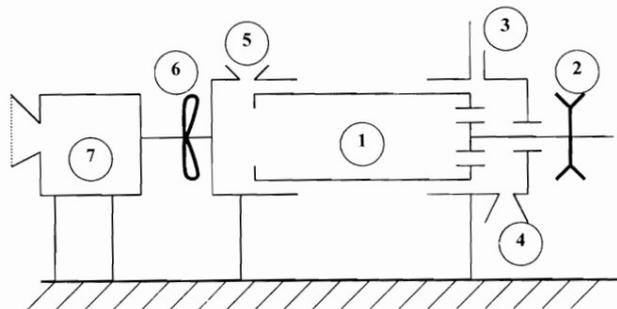


Figure II.1 : Schéma du séchoir rotatif

1. Cylindre rotatif
2. Poulie
3. Sortie air humide
4. Sortie produit
5. Entrée produit
6. Ventilateur
7. Chambre de combustion

### II.2.4 Architecture du séchoir

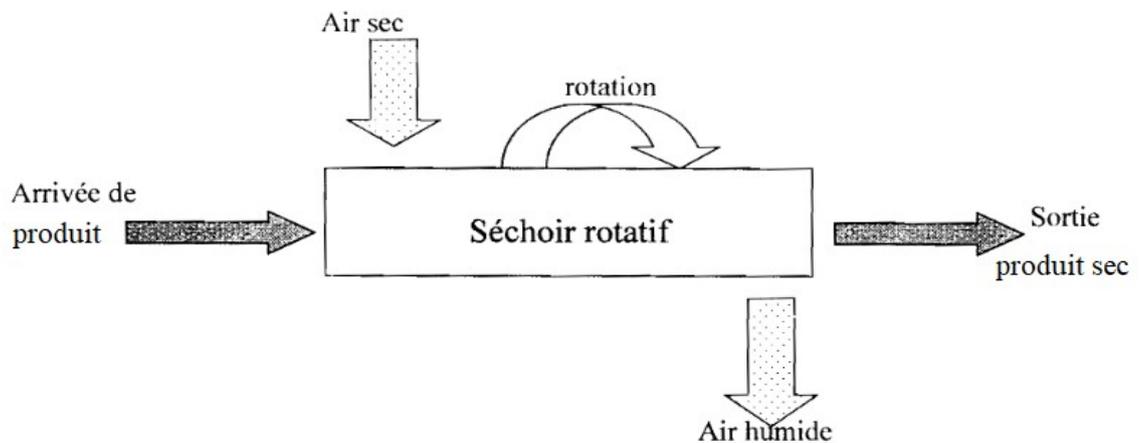


Figure II.2 : Architecture du tunnel de séchage

### II.3 Produit à sécher

La tomate (*Solanum Lycopersicum L.esculentum*) fait partie de la famille des solanacées. La tomate est le fruit du plant de tomate. Avec près de 15 kg par an et par habitant, la tomate est devenue, cinq siècles après sa découverte, le premier légume-fruit consommé en France. Cette plante est cultivée en plein champ ou sous presque toutes les latitudes, sur une superficie d'environ trois millions d'hectares, ce qui représente près du tiers des surfaces mondiales consacrées aux légumes. La tomate a donné lieu au développement d'une importante industrie de transformation, pour la production de concentré, de sauces, de jus et de conserves [13].

#### II.3.1 Fiche technique

Nom botanique : *Lycopersicon esculentum*

Cycle : plante annuelle.

Origine : Amérique centrale et le nord-ouest de l'Amérique du Sud. La tomate a été

Domestiquée pour la première fois au Mexique [14].

Sol : riche et bien drainé, avec une exposition ensoleillée [14].

Rusticité : elle ne supporte pas des températures inférieures à 2 °C [14].

Semis : en février et en mars.

Plantation : de mars à juin [14]

Valeurs nutritionnelles pour 100 g	
Énergie (kCal)	15 kCal
Protéines	0,68 g
Lipides	0,10 g
Glucides	2,80 g
Fibres	1,20 g
Eau	94 g

**Tableau II.1** : Valeurs nutritionnelles pour 100 g de la tomate [14]

#### II.4 Principe de fonctionnement

L'air aspiré par le ventilateur, traverse la chambre de combustion où il s'échauffe avant d'arriver dans le cylindre. L'air va circuler entre la paroi interne du cylindre rotatif et le cylindre grillagé qui contient la tomate. La trémie permet d'alimenter le tunnel en produit continuellement. Il faut signaler que le produit entre dans le cylindre grillagé. La circulation de tomate de l'entrée à la sortie est réalisée par la rotation du tunnel autour de son axe et de son inclinaison par rapport à l'horizontal [15].

Dans notre système on distingue les quatre milieux suivants :

- L'air
- La tomate
- Le cylindre
- Le milieu extérieur

##### II.4.1 Hypothèses

Les différents échanges de chaleur considérés se font :

###### a) *Par convection*

- \* entre l'air asséchant et la tomate
- \* entre l'air asséchant et la paroi interne du cylindre
- \* entre l'ambiance extérieure et la paroi externe du cylindre

**b) Par conduction**

- \* dans les parois du cylindre
- \* entre deux volumes de contrôle de tomate

**c) Par rayonnement**

- \* entre la voûte de la salle et la paroi extérieure du cylindre
- \* entre la tomate et le cylindre

**II.5 Caractéristiques du système**

Dans la suite de cette étude. Nous allons travailler avec les hypothèses et les caractéristiques suivantes :

- Le matériau du tunnel est en acier inoxydable
- Le rayonnement thermique est négligé

**II.5.1 L'air asséchant**

L'air est produit avec une température de 90 °C, mais avant son arrivé au niveau de la tomate du fait des pertes, sa température ne sera plus qu'au environ de 75 °C. Les deux bouts du tunnel sont ouverts à l'ambiance donc l'air asséchant y circule à la pression atmosphérique qui est de 1,013 bar.

**a) Masse volumique**

La valeur de la masse volumique, nous permet d'avoir la vitesse de circulation de l'air dans le tunnel. Cette valeur de la masse volumique dépend de la température de l'air qui varie au cours du temps suivant la progression de ce dernier dans le tunnel; mais du fait que l'air est soufflé aux environs des 75 °C et que la chute de température est faible entre l'entrée et la sortie, on va calculer la masse volumique à la température de 75 °C.

$$\rho = \frac{p_a}{r \times T_a} \quad (\text{II.1})$$

$$\rho = \frac{101300}{287 \times (75+273)} = 1.014 \text{ kg / m}^3 \quad (\text{II.2})$$

**b) Vitesse de l'air**

L'air arrive entre le cylindre rotatif de diamètre intérieur de  $D_i = 0,80$  m et le cylindre grillagé contenant la tomate qui a un diamètre de  $D = 0,6$  m. Donc la section d'entrée de l'air chaud sera sous forme annulaire c'est-à-dire l'aire entre les deux cylindres.

$$S = \frac{\pi}{4} \times (D_i^2 - D^2) \quad (\text{II.3})$$

$$S = \frac{3.14}{4} \times [(0.80)^2 - (0.6)^2] = 0.2198 \text{ m}^2 \quad (\text{II.4})$$

Pour une première approche on fixe un débit d'air de 15kg/s

$$V = \frac{m_a}{s \times \rho_a} \quad (\text{II.5})$$

$$V = \frac{15}{0.2198 \times 1.014} = 67.30 \text{ m/s} \quad (\text{II.6})$$

*c) Viscosité dynamique et Conductivité thermique de l'air*

Température °C	Viscosité dynamique (10 <sup>-6</sup> Pa.s)	Température °C	Conductivité thermique (W/m.C)
-150	9.7	-150	0.01549
-100	11.8	-100	0.01633
-50	14.6	-50	0.02052
0	17.19	-20	0.02256
50	19.26	0	0.02313
100	21.34	20	0.02512
150	23.19	40	0.02652
200	25.12	50	0.02680
250	27.04	60	0.02791
300	28.86	80	0.02931
		100	0.03070
		120	0.03198
		140	0.03326
		160	0.03442

**Tableau II.1 :** Viscosité dynamique de l'air [18]

**Tableau II.2 :** Conductivité de l'air [18]

Les variations de  $\lambda$  et de  $\mu$  avec la température peuvent être approchées pour tous les gaz par la formule de Sutherland commune à la conductivité et à la viscosité.

Pour l'air :  $\lambda = \lambda_0 \times f(T)$  et  $\mu = \mu_0 \times f(T)$  (II.7)

$\lambda_0$  et  $\mu_0$  les valeurs à la température 0°C

$$f(t) = \frac{1+125/273}{1+125/T} \sqrt{\frac{T}{273}} \text{ Avec T en kelvin} \quad (\text{II.8})$$

L'air étant à la température de 75°C donc :

$$f(t) = 1.2110 \quad (\text{II.9})$$

✓ Viscosité dynamique

$\mu_0 = 17.19 \times 10^{-6}$  et  $f(t) = 1.2110$  donc on a :

$$\mu_a = 20.81 \times 10^{-6} \text{ Pa.s} \quad (\text{II.10})$$

✓ Conductivité thermique

De la même on aura  $f(t) = 1.2110$  et on sait que  $\lambda_0 = 0.02313$  donc on a :

$$\lambda_a = 0.02801 \text{ W/m.C} \quad (\text{II.11})$$

### II.5.2 Le cylindre

Il est fait d'une tôle en acier inoxydable et cintré, ouvert aux deux bouts permettant l'entrée et la sortie des flux de tomate et d'air asséchant. Pour ces propriétés thermo physiques voir le tableau 4 de l'acier

METAUX	Température °C	$\rho_{air}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda_{air}$ (W/m.C)	Cp (Kj/Kg.C)
Aciers non allies	20	7800	53.5	0.460
	400	7800	42.5	0.627
Acier allies	20	7800	47.6	0.460
	500	7800	36.0	0.627
Aluminium	20	2700	204.0	0.879
	300	2700	233.0	1.025
cuivre	20	8900	384.0	0.398
	300	8900	366.0	0.419

Tableau II.3 : Données thermo physiques de quelques métaux [18]

✓ Masse volumique

$$\rho_c = 7800 \text{ Kg/m}^3$$

✓ Conductivité thermique

$$\lambda_c = 47.6 \text{ W/m.C}$$

✓ Chaleur spécifique

$$Cp_c = 0.460 \text{ Kj/Kg.C}$$

### II.5.3 La tomate

La tomate de cette variété est géométriquement caractérisée par un poids d'environ 30 g, et d'un diamètre moyen d'environ 30 mm.

#### a) Aire d'échange de tomate

La tomate étant assimilé à un corps poreux, donc en toute légitimité on peut calculer sa surface d'échange avec l'air de séchage en utilisant la porosité.

Il faut savoir que la porosité  $\varepsilon$  est, par définition, le rapport du volume des pores (occupés par le gaz) au volume total (gaz et solide). C'est donc la fraction de volume total occupée par le gaz tandis que  $(1 - \varepsilon)$  est celle occupée par le solide.

La valeur de la porosité oscille autour de 0.250

Les tronçons cylindriques de tomate ont une longueur de  $l = 0,5$  m et un diamètre de 0,6 m correspondant au diamètre du cylindre grillagé.

Donc le volume total d'un tronçon est :

$$V_{tr} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times l \quad (\text{II.12})$$

$$V_{tr} = \frac{3.14 \times 0.6^2}{4} \times 0.5 = 0.1413 \text{ m}^3$$

Fixons une porosité de 0,250, alors le volume de solide est de :

$$V_s = (1 - \varepsilon) \times V_{tr} \quad (\text{II.13})$$

$$V_s = (1 - 0.250) \times 0.1413 = 0.1059 \text{ m}^3$$

$d = 30$  mm donc le volume de tomate est de :

$$V_t = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3 \quad (\text{II.14})$$

$$V_t = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (0.015)^3 = 1.41 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Aire d'un granulats de tomate :

$$S_t = 4 \times \pi \times r^2 \quad (\text{II.15})$$

$$S_t = 4 \times 3.14 \times (0.015)^2 = 0.002826 \text{ m}^2$$

L'aire totale d'échange est de

$$A = \frac{V_s}{V_t} \times S_t \quad (\text{II.16})$$

$$A = \frac{0.1059}{1.41 \times 10^{-5}} \times 0.002826 = 21.22 \text{ m}^2$$

Pour une première approche on prend  $K = 1,33 \times 10^{-2}$

De ce fait la surface utile d'échange entre le volume de tomate considéré et l'air asséchant est :

$$S_{t.a} = k \times A = 0.0133 \times 21.22 = 0.28 \text{ m}^2$$

✓ Masse volumique

$$\rho_c = 1149 \text{ Kg/m}^3$$

✓ Conductivité thermique

$$\lambda_c = 0.51 \text{ W/m.C}$$

✓ Chaleur spécifique

$$Cp_c = 3.98 \text{ Kj/Kg.C}$$

## II.6 Les coefficients de transfert thermique

Ces coefficients interviennent dans les équations à travers les différents modes de transfert thermique considérés pour modéliser le système. Ce sont entre autres :

- Les échanges par conduction
- Les échanges par convection
- Les échanges par rayonnement (mais qui sont négligés)

### II.6.1 Transfert thermique par conduction

Les différents échanges de chaleur par conduction dans le système interviennent :

- Entre la paroi interne et externe du cylindre rotatif
- Entre deux volumes de contrôle de tomate consécutifs

#### a) Conductance du cylindre avec calorifuge

Cette conductance est calculée à partir de la conductivité thermique du matériau avec lequel est fait le cylindre, du calorifugeage et des dimensions géométriques.

Le cylindre a un diamètre intérieur de  $D_i = 0,80 \text{ m}$  et un diamètre extérieur de  $D_e = 0,81 \text{ m}$

$$S \times h_{cy.ca} = \frac{2 \pi \lambda_c l}{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)} + \frac{2 \pi \lambda_{cl} l}{\ln\left(\frac{D_e + 2 \times e_{cl}}{D_e}\right)} \quad (\text{II.17})$$

$l$  est la longueur du volume de contrôle de la discrétisation, qui est égale à  $0.5 \text{ m}$  Pour les caractéristiques thermo physiques voir tableau II.5.

Isolant	Température °C	$\rho_{air}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda_{air}$ (W/m.C)	Cp (Kj/Kg.C)
Amiante feutre léger fibre ou brique	105	116	0.047	0.80
	0	470	0.181	0.80
	350	470	0.180	0.80
	0	700	0.232	0.80
	400	700	0.291	0.80
Lain de roche	20	40	0.040	0.84
	100	40	0.058	0.84
	200	40	0.093	0.84
Laine de verre	20	20	0.040	0.84
	100	20	0.058	0.84

**Tableau II.4** : Données thermo physiques de quelques isolants [18]

$$S \times h_{cy.ca} = \frac{2 \times 3.14 \times 47.6 \times 0.5}{\ln\left(\frac{0.81}{0.80}\right)} + \frac{2 \times 3.14 \times 0.349 \times 0.5}{\ln\left(\frac{0.81+2 \times 0.001}{0.81}\right)} = 12026.41 \text{ W/K} \quad (\text{II.18})$$

#### *b) Conductance entre deux volumes de tomate consécutive*

Etant donné qu'un volume de contrôle de tomate est considéré comme isotherme donc il n'y a pas d'échange de chaleur au sein de ce dernier, mais il y a un transfert par conduction entre deux volumes voisins.

$$S \times h = \frac{\lambda \times S}{l} \quad (\text{II.19})$$

Les volumes considérés étant des tronçons cylindriques de diamètre identique à celui du cylindre grillagé et égale à 0,6 m. l étant la distance entre deux centres de volumes consécutifs

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{3.14 \times (0.6)^2}{4} = 0.2826 \text{ m}^2 \quad (\text{II.20})$$

$$S \times h = \frac{0.51 \times 0.2826}{0.5} = 0.2882 \text{ W/K}$$

### **II.6.2 Transfers thermique par convection**

Ce mode de transfert se fait à deux niveaux différents à savoir la convection forcée à l'intérieur du tunnel et la convection naturelle entre l'extérieur du tunnel et l'ambiance extérieure.

#### *a) La convection naturelle*

À convection naturelle se produit lorsque l'écoulement est induit par une différence de masse volumique qui varie en fonction de la température au sein du fluide [16]

Elle intervient seulement dans l'échange entre la paroi extérieure du calorifugeage et l'ambiance extérieure qui est caractérisée par sa température  $T_e$  de 30°C à la pression atmosphérique.

Il faut savoir que sur le plan pratique, la convection naturelle de l'air sur une paroi est, en général, laminaire. Nous donnons dans le tableau 6 ci-après le calcul de  $h$  appliqué à l'air, pour une différence  $\Delta\theta$  de température entre la paroi et l'air.

En plus de la différence de température entre l'air et la paroi, le coefficient  $h$  dépend également de la géométrie et de l'orientation de la paroi de l'élément considéré ; mais aussi de la dimension caractéristique de l'élément.

Géométries orientation de paroi	Coefficient de convection laminaire $h(W/m.s)$	Dimension caractéristique(m)
Plaque verticale dans la hauteur et inférieur à 30cm (au cylindre vertical)	$h=1.42 \times \left(\frac{\Delta\theta}{H}\right)^{0.25}$	H : hauteur de la plaque
Plaque verticale dans la hauteur et supérieur à 30cm (au cylindre vertical)	$h=1.78 \times (\Delta\theta)^{0.25}$	
Cylindre horizontal	$h=1.32 \times \left(\frac{\Delta\theta}{D_e}\right)^{0.25}$	$D_e$ : diamètre extérieur du cylindre
Plaque horizontal chauffant vers le haut	$h=1.32 \times \left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontal chauffante vers le bas	$h=0.66 \times \left(\frac{\Delta\theta}{L}\right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h=(1.14 + \frac{0.17}{D}) \times (\Delta\theta)^{0.25}$	D : diamètre de la sphère

**Tableau II.5 :** Valeurs des coefficients d'échange par convection naturelle [18]

Pour notre système on se situe au niveau du cas de cylindre horizontal dans la mesure où l'inclinaison de notre cylindre est très faible.

On a donc

$$h_{c,n} = 1.32 \times \left(\frac{\Delta\theta}{D_{ext}}\right)^{0.25} \tag{II.21}$$

$$D_{ext} = D_e + 2 \times e_{cl} \tag{II.22}$$

$$h_{c,n} = 1.32 \times \left(\frac{\Delta\theta}{D_e + 2 \times e_{cl}}\right)^{0.25} \tag{II.23}$$

$\Delta\theta$  : Différence température entre la paroi et l'ambiance

$D_e$  : Diamètre extérieur de cylindre

$e_{cl}$  : Épaisseur de calorifugeage

La détermination de ce coefficient d'échange cause problème du fait que sa valeur dépend de la température extérieure de la paroi. Pour cela on fixe une valeur forfaitaire de l'épaisseur du calorifugeage et ressortir la valeur de  $\Delta\theta$ .

Pour une première approche on prend  $e_{cl}= 1\text{mm}$ , avec un matériau réfractaire (tableau) on a  $\lambda_{cl}= 0.349 \text{ w/m.C}$

Soient  $r_i$  et  $r_e$  les rayons du cylindre et  $r$  le rayon après calorifuge

$$q = \frac{\Delta\theta}{\frac{1}{2\pi r_i L h_{t,p}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi l \lambda_l} + \frac{\ln(r/r_2)}{2\pi l \lambda_{cl}} + \frac{1}{2\pi r_i L h_{c,n}}} \quad (\text{II.24})$$

La valeur de  $q$  maximale est obtenue pour

$$\frac{dq}{dr} = 0 \quad \text{donc} \quad r = \frac{\lambda_{cl}}{h_{c,n}} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Et} \quad r = \frac{De + 2 \times e_{cl}}{2} \quad \text{donc} \quad (\text{II.26})$$

$$\Delta\theta = \sqrt[0.25]{\frac{\lambda_{cl}}{1.32 \times \frac{De + 2 \times e_{cl}}{2}}} \times (De + 2 \times e_{cl}) = 0.0949 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{II.27})$$

$$h_{c,n} = 1.32 \times \left( \frac{0.0949}{0.81 + 2 \times 0.001} \right)^{0.25} = 0.771 \text{ w/m}^2.\text{C} \quad (\text{II.28})$$

**b) La convection forcée**

La **convection forcée** apparaît lorsque l'écoulement est engendré par des moyens externes comme un ventilateur ou les vents atmosphériques [16].

L'écoulement forcé intervient dans les échanges thermiques entre :

- L'air asséchant et la tomate
- L'air asséchant et l'intérieur du cylindre rotatif

**c) Le coefficient de convection entre l'air asséchant et la tomate**

Ce coefficient d'échange peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des nombres adimensionnels tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que celles du produit à sécher. Ce coefficient peut être déterminé par la formule de Prandtl qui est la suivante :

$$h_{a,t} = \frac{C_f \times \rho_a \times C_{p_a} \times V}{2 \times (\text{Pr})^{2/3}} \quad \text{et} \quad \text{Pr} = \frac{C_{p_a} \times \mu_a}{\lambda_a} \quad (\text{II.29})$$

**Donc :**

$$h_{a.t} = \frac{C_f \times \rho_a \times \lambda_a^{2/3} \times V \times C p_a^{1/3}}{2 \times \mu_a^{2/3}} \quad (\text{II.30})$$

Et

$$C_f = 0.01122 \times R_e^{-0.0485} \quad (\text{II.31})$$

$$R_e = \frac{V \times \rho_a \times D_i}{\mu_a}$$

On a:

$$h_{v.a.t} = 0.01122 \times \frac{\rho_a^{0.9515} \times \lambda_a^{2/3} \times V^{0.9515} \times C p_a^{1/3}}{2 \times \mu_a^{0.6181} \times D_i^{0.485}} \quad (\text{II.32})$$

Pour l'air de séchage à la pression atmosphérique à une plage de température de 0 à 100°C, la valeur de la chaleur massique varie de 1004 à 1009 j/Kg.C donc on peut prendre une valeur moyenne de  $C_{PA} = 1005 \text{ j/Kg.C}$

T°c	$\lambda_{air}$ (W/m.C)	$\rho_{air}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{air}$ (Pa.s)	h <sub>v.a.t</sub> (W/m.C)
10	0.023814103	1.246553673	1.76984E-05	227.8166569
20	0.024487243	1.204030948	1.81987E-05	220.7146345
30	0.025149822	1.164313615	1.86911 E-05	214.05588165
40	0.025802223	1.127132915	1.9176 E-05	207.8078962
50	0.026444813	1.092253357	1.96535 E-05	201.9255465
60	0.027077939	1.059467725	2.01241 E-05	196.3796883
70	0.027701932	1.028592955	2.05878 E-05	191.1418849
80	0.028317108	0.999466721	2.1045E-05	186.186837
90	0.028923767	0.971944575	2.14959 E-05	181.4919598
100	0.029522195	0.945897555	2.19406 E-05	177.0370272

**Tableau II.6 :** Valeurs du coefficient d'échange entre l'air asséchant et la tomate [18]

L'air étant soufflé dans le tunnel à une température un peu supérieure à 75°C et la variation de température de l'entrée à-là n'étant pas grande, donc on peut adopter une valeur moyenne.

$$T_1 = 70 \text{ °C} \quad h_{a.t1} = 191.1418849 \text{ W/m.C}$$

Et

$$T_2 = 80 \text{ °C} \quad h_{a.t2} = 186.186837 \text{ W/m.C}$$

Formule de calcul d'une valeur par la méthode de l'interpolation linéaire

$$h_{a.t} = h_{a.t1} + (h_{a.t2} - h_{a.t1}) \times \frac{(T - T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (\text{II.33})$$

T<sub>1</sub>: Point inférieur sur l'abscisse

T<sub>2</sub>: Point supérieur sur l'abscisse

T: Point sur l'abscisse à interpoler

$h_{a,t1}$  : Point inférieur sur l'ordonnée

$h_{a,t2}$  : Point supérieur sur l'ordonnée

Donc à 75°C (interpolation)

$$h_{a,t} = 191.1418849 + (186.186837 - 191.1418849) \times \frac{(75-70)}{(80-70)} \quad \text{(II.34)}$$

$$h_{a,t} = 188.66436095 \text{ W/m.C}$$

**d) Le coefficient de convection entre l'air asséchant et la paroi interne du cylindre**

Entre la paroi intérieure du cylindre rotatif et l'air asséchant existe un transfert de chaleur par convection dont le calcul du coefficient d'échange est donné par la relation de La même méthode de l'interpolation

T°c	$\lambda_{air}$ (W/m.C)	$\rho_{air}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_{air}$ (Pa.s)	Hv.A.ar (W/m.C)
10	0.023814103	1.246553673	1.76984E-05	95.24814264
20	0.024487243	1.204030948	1.81987E-05	93.15774798
30	0.025149822	1.164313615	1.86911 E-05	91.17669527
40	0.025802223	1.127132915	1.9176 E-05	89.2960846
50	0.026444813	1.092253357	1.96535 E-05	87.50798748
60	0.027077939	1.059467725	2.01241 E-05	85.80531514
70	0.027701932	1.028592955	2.05878 E-05	84.18170801
80	0.028317108	0.999466721	2.1045E-05	82.63144246
90	0.028923767	0.971944575	2.14959 E-05	81.1493517
100	0.029522195	0.945897555	2.19406 E-05	79.73075829

**Tableau II.7 :** Valeurs du coefficient d'échange entre l'air chaud et la paroi interne [18]

On a calcul  $h_{a,t}$  à T= 75°C

$$T_1 = 70 \quad h_{a,p1} = 84.18170801 \text{ w/m.C}$$

Et

$$T_2 = 80 \quad h_{a,p2} = 82.63144246 \text{ w/m.C}$$

Donc on a

$$h_{a,p} = 84.18170801 + (82.63144246 - 84.18170801) \times \frac{(75-70)}{(80-70)}$$

$$h_{a,p} = 83.406575235 \text{ W/m.C}$$

**II.7 Chaleur latente massique de vaporisation**

En général, l'eau dans les produits à sécher comme la tomate se présente, soit sous forme libre (eau libre), soit sous forme liée (eau liée). Au-dessus d'un certain seuil d'hydratation correspondant à la limite entre l'eau libre et eau osmotique, les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie appelée énergie de liaison, qui devient

d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique, absorbée ou combinée chimiquement. La chaleur latente massique de vaporisation  $L_v$  de l'eau à une température bien déterminée est donc la somme de la chaleur de vaporisation de l'eau libre  $L_{vi}$  et de la chaleur de liaison de l'eau  $L_{va}$  qu'il faut fournir pour évaporer l'eau liée.

$$L_v = L_{vi} + L_{va} \tag{II.35}$$

La variation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau: eau libre ou considérée comme telle, peut se mettre sous la forme suivante:

$$\frac{dL_{lv}}{dt} = C_{p_{vs}} - C_{p_l} \tag{II.36}$$

Dans le cas de faibles températures ces valeurs sont constantes et on a :

$$L_{vi} = L_v(0^\circ\text{C}) - (C_{p_l} - C_{p_{vs}}) \times T \tag{II.37}$$

$L_v(0^\circ\text{C})$  : la chaleur massique de vaporisation à  $0^\circ\text{C}$

$T$  : la température de vaporisation exprimée en  $^\circ\text{K}$

En pratique on peut prendre l'expression de la formule empirique de RANKINE qui est la suivante:

$$L_v(\theta) = 2490 - 2.226(\theta)$$

$L_v(\theta)$  est en kJ/kg et  $\theta$  est la température de vaporisation exprimée en  $^\circ\text{C}$

### II.8 Les capacités thermiques

Pour le système on a les caractéristiques suivantes :

Quantité	Désignation	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse (kg)
1	Cylindre	7800	914.10 <sup>-5</sup>	71.32
2	Cylindre grillagé	7800	285.10 <sup>-5</sup>	22.23

Tableau II.8 : Caractéristiques du cylindre en rotation [18]

a) *La capacité thermique C :*

Elle est calculée par la formule :

$$C = \rho \times C_p \times V = m C_p \quad (\text{II.38})$$

$\rho$  : La masse volume de l'élément ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  : Chaleur massique de l'élément ( $\text{J/kg.k}$ )

$V$  : Volume de l'élément ( $\text{m}^3$ )

**b) Le cylindre**

La capacité thermique relative à un tronçon du cylindre est :

$$C = m C_p \quad (\text{II.39})$$

$$C = 460 \times 71.32 = 32807.2 \text{ J/K}$$

**c) La tomate**

La capacité thermique relative à un tronçon de la tomate est :

$$C = m C_p \quad (\text{II.40})$$

$$C = 3980 \times 0.1413 = 526.37 \text{ J/k}$$

## **Chapitre III**

*Simulation à partir du logiciel PSPICE*

### III.1 Présentation

OrCad PSpice est un logiciel de simulation mixte (analogique et/ou logique). La mise en œuvre d'une simulation repose principalement sur :

- Une description des composants et des liaisons figurant sur un schéma, sous forme de fichier « Circuit »
- Une description des signaux d'entrée appliqués sur le schéma sous forme de fichier « Stimulus »
- Une description des modèles de simulation des composants sous forme de fichiers « modèles »

La visualisation des résultats de simulation s'effectue dans une partie du logiciel appelée « Probe ». La documentation suivante mentionne les différentes étapes nécessaires pour mener à bien une simulation. Certaines actions s'effectuent :

- Sur le schéma dans OrCad Capture ;
- Dans l'éditeur de stimulus PSpice Stimulus Editor ;
- Dans le simulateur OrCad PSpice

### III.2 Principe de fonctionnement

PSpice est un logiciel complet dont on peut observer la plate-forme de la figure III.1:

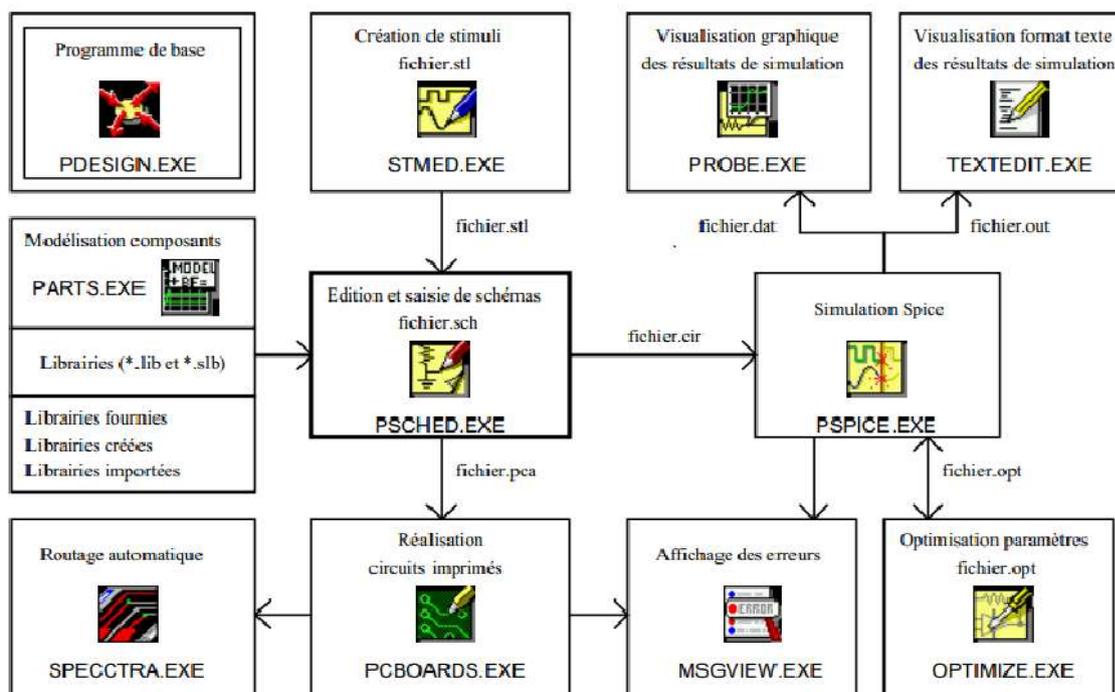


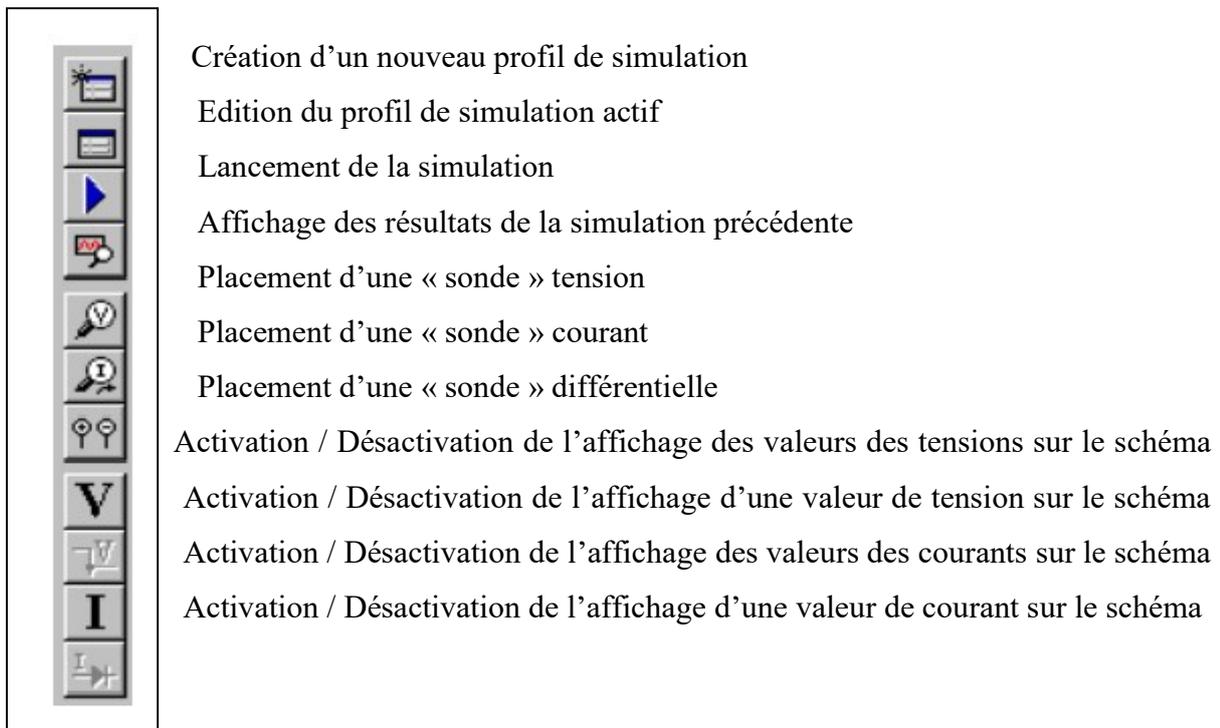
Figure III.1: Plateforme générale du logiciel PSpice

### III.2.1 Saisie de schéma

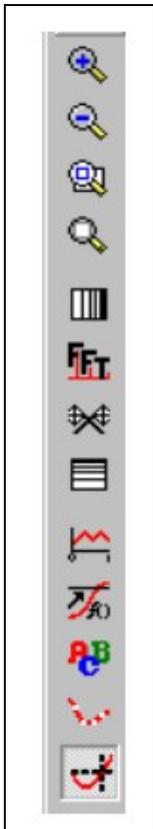
Pour créer un circuit sous PSpice, on dessine tout d'abord le schéma électrique à l'aide de l'éditeur graphique PSCHED.EXE en utilisant des composants disponibles dans des bibliothèques ou en les créant (éventuellement en utilisant PARTS.EXE qui permet de créer des modèles de composants à partir des abaques constructeurs, la version de démonstration étant limitée à la caractérisation des diodes) [15].

### III.2.2 Barre d'icônes d'OrCad

#### a) Barre d'icônes d'OrCad Capture spécifique à la simulation

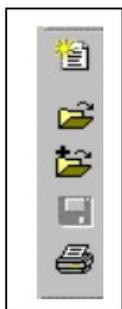


**b) Barres d'icônes d'OrCad PSpice**



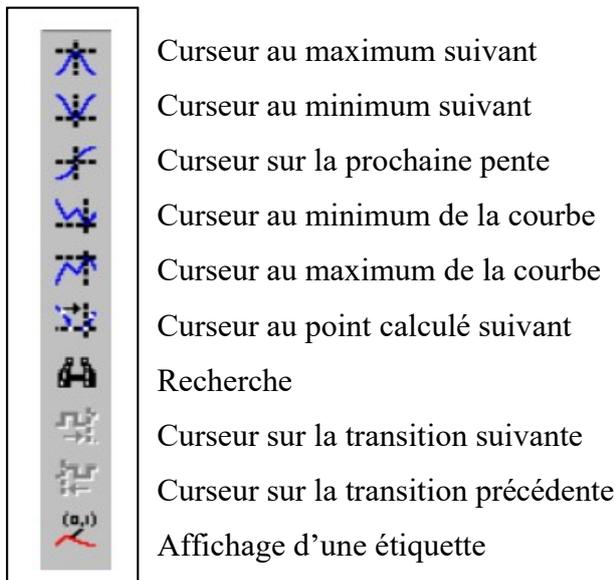
- Barre d'icônes « Probe »
- Zoom + (agrandissement)
- Zoom - (diminution)
- Zoom d'une zone
- Zoom de la totalité de la simulation
- Modification échelle linéaire / échelle logarithmique en X
- Transformée de Fourier rapide
- Analyse des performances
- Modification échelle linéaire / échelle logarithmique en Y
- Ajout d'une trace
- Evaluation d'une fonction à partir d'un tracé
- Ajout de texte
- Activation / Désactivation de l'affichage des points calculés
- Activation / Désactivation des curseurs

**c) Barre d'icônes « File »**

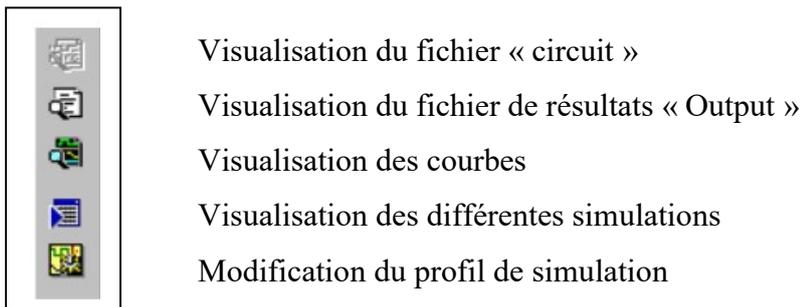


- Création d'un nouveau profil de simulation ou d'un fichier texte
- Ouverture d'un fichier de résultats de simulation
- Ouverture d'un fichier de résultats de simulation pour ajout
- Enregistrement d'un fichier texte
- Impression des courbes

*d) Barre d'icônes « Curseur »*



*e) Barre d'icônes « View »*



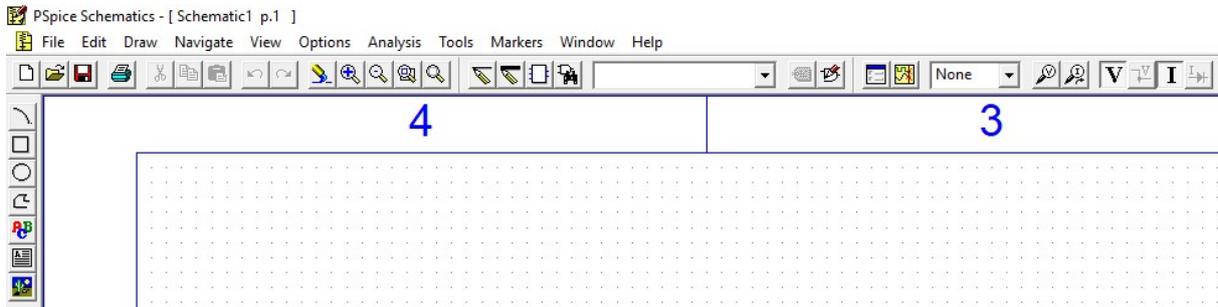
*f) Barre d'icônes « Simulate »*



### III.2.3 Appel des composants

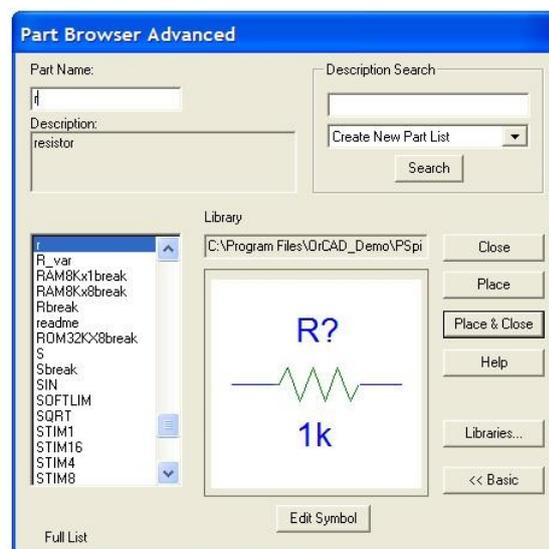
Comme sur la plupart des logiciels sous Windows, les fenêtres de PSpice se présentent avec une barre supérieure et des menus déroulants. Un ensemble d'icônes (paramétrables) sont des raccourcis pour les commandes les plus courantes. Un nouveau document est ouvert par défaut, il faut tout d'abord lui donner un nom, pour cela faire :

**File Save as en donnant un nom choisi.**



**Figure III.2 :** menu principale de shematic

On peut dès lors commencer le dessin, l'appel des composants se fait par **Draw >> Get New Part** qui affiche une fenêtre (Figure III.3) permettant la sélection (on peut aussi utiliser les icônes correspondantes si elles sont paramétrées). Pour rechercher un composant, on peut :



**Figure III.3 :** Fenêtre pour la sélection des composants

- Se « Promener » dans les librairies (Browser),
- Taper le nom du composant si on le connaît avec éventuellement les caractères \* et ? :  
Part Name = 7\*0? affichera tous les composants dont le nom commence par 7 et qui possèdent un 0 en avant-dernière position,
- Effectuer une recherche descriptive : Advanced >> Description Search = \*invert\* listera tous les composants qui possèdent la chaîne « invert » (inverseur) dans leur description. Pour avoir de nouveau accès à l'ensemble des composants des librairies, remettre ensuite

Description Search = \* et cliquer sur Search.

Une fois le composant désiré sélectionner, validez Place, Place&Close ou appuyez sur la touche Entrée. Il suffit de le placer où on désire à l'aide de la souris : Le bouton gauche permet de placer autant de composants de ce type que l'on veut, le bouton droit permet de sortir du placement. Pour tourner le composant, utilisez Edit >> Rotate ou le raccourci CTRL+R, pour faire un effet miroir utilisez Edit Flip ou CTRL+F.

### III.2.4 Dénominations des principaux éléments simulables :

Dans un souci de simplification, on se limite à l'essentiel.

#### a) Les composants analogiques

Elements	Dénomination PSpice
Elements passives	R, L, C, K (circuit magnétique) ou T (ligne de transmission)
Diode xxxx	Dxxxx
Transistor Bipolaire xxxx	Qxxxx
Transistor MOSFET xxxx	Mxxxx
Transistor JFET xxxx	Jxxxx
Transistor IGBT xxxx	Zxxxx
Corposants défini par un sous-circuit	Xxxxx

Tableau III.1 : Les composants analogiques

#### b) Les composants numériques

La version de démonstration 9.1 possède un assez large panel de composants numériques, essentiellement de la famille TTL et même un exemple de composant logique programmable (PLD ou PAL). L'appel des fonctions des divers composants se fait par leur nom (74xx) et ils sont affichés selon la norme américaine (si besoin était, on pourrait redéfinir leur dessin avec la norme européenne). PSpice étant essentiellement utilisé pour la simulation analogique, on ne s'étendra pas sur le sujet

#### c) Les sources

Sources	Dénomination PSpice
Potentiel 0	AGND
Source continue	VDC, IDC
Source continue avec composante alternative	VSIN, ISIN
Signal carré de rapport cyclique réglable	VPULSE, IPULSE

Source définie par segments ( $V_i, t_i$ ) ou ( $I_i, t_i$ )	VPWL, IPWL
Source de tension contrôlée en tension	Exxxx
Source de courant contrôlée en courant	Fxxxx
Source de courant contrôlée en tension	Gxxxx
Source de tension contrôlée en courant	Hxxxx

Tableau III.2 : Les sources

### III.2.5 Connexions et paramètres des composants

Les fils de connexion se tracent simplement avec la souris à l'aide de :

**Draw**  $\implies$  **Wire** ou à l'aide de la combinaison **CTRL+W**

Donner leurs valeurs aux composants :

Une fois le circuit créé (ou lors de sa création), il faut entrer les valeurs et les paramètres. Pour le faire, c'est tout simple, il suffit de double-cliquer sur l'élément considéré. PSpice connaît les facteurs :

$$f = 10^{-15}, p = 10^{-12}, n = 10^{-9}, u = 10^{-6}, m = 10^{-3}, k = 10^3, meg = 10^6, g = 10^9.$$

Il n'est pas nécessaire de mettre les unités (ce sont les unités standard par défaut), mais il ne faut pas faire de confusion, PSpice confondant majuscules et minuscules ( $M = m = 10^{-3}$ ). On donne ainsi les valeurs aux résistances et capacités. En double-cliquant sur un fil, on peut nommer *les signaux* (Vs pour une sortie par exemple). Pour les sources, PSpice demande un certain nombre de paramètres qui sont peut-être moins clairs et qui seront détaillés dans ce qui suit[17].

### III.2.6 Les sources et leurs paramètres

#### a) Sources analogiques

**V DC** : tension continue : utilisée pour les sources d'alimentation, quel que soit le type de simulation.

**V SIN** : tension sinusoïdale : cette source permet d'effectuer une simulation temporelle. Elle convient néanmoins pour une simulation fréquentielle, à condition de spécifier une valeur dans la propriété « AC »

**V PULSE** : tension « rectangulaire »

**V SRC** : source de tension générique : convient pour les sources d'alimentation, ainsi que les analyses continues et fréquentielles.

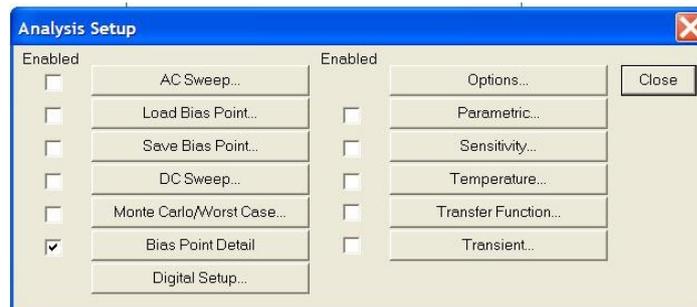
**V EXP** : tension « Exponentielle »

**V SFFM** : tension modulée en fréquence

**V PWL** : tension définie par segments [17]

### III.3 Simuler et observer les résultats

Il existe de nombreux types de simulations, on les configure à l'aide d'Analysis Setup :



**Figure III.4** : Menu Analysis Setup

Pour la plupart des applications, on peut dire que l'on utilise essentiellement les 4 simulations

- Bias Point Detail : Analyse du point de fonctionnement,
- DC Sweep : Analyse en continu,
- AC Sweep : Analyse fréquentielle petit signaux,
- Transient : Analyse temporelle (transitoire).

Ce type de source est évidemment utilisé en analyse transitoire. Si on effectue une analyse fréquentielle, la source devient sinusoïdale et utilise les paramètres AC et DC. On doit aussi noter que TF et TR ne doivent pas être nuls (ce qui correspond à la réalité). Pour avoir des signaux « carrés », il faut utiliser de très faibles valeurs [15]

### III.4 Simulations réalisées sur PSPICE

PSPICE est un logiciel employé pour la résolution des réseaux électroniques. Pour cela, il est doté d'une librairie contenant de nombreux composants (résistances, condensateurs, générateurs, diodes, etc.). Il est relativement simple d'utilisation tout en restant rapide et efficace. L'utilisation de ce logiciel en thermique est basée sur l'analogie entre la diffusion de la chaleur et la circulation des charges électriques.

Cette analogie permet d'établir facilement un réseau thermique qu'il suffit de programmer sur PSPICE pour analyser le comportement thermique d'un système.

Cette méthode présente le double avantage d'être rapide de mise en œuvre et très figurative.

Ce logiciel simule le réseau thermique incluant :

- Les sources de chaleur
- Les capacités thermiques
- Les résistances thermiques

#### III.4.1 Sources de chaleur

L'air de séchage constitue ici la principale source de chaleur. Ayant une température la plus grande par rapport aux autres températures des nœuds du système, il impose les différents transferts qui prévalent dans le tunnel. Sa température qui tourne autour des 75°C est considérée au niveau du réseau électrique comme une source de tension constante.

#### III.4.2 Les capacités thermiques

Nous avons calculé les capacités thermiques pour chaque élément du système thermique. On peut citer entre autres :

$C_1$ : capacité du cylindre rotatif

$C_2$ : capacité du volume de la tomate n°01.

$C_3$ : capacité du volume de la tomate n°02.

$C_4$  : capacité du volume de la tomate n°03.

$C_5$  : capacité du volume de la tomate n°04.

#### III.4.3 Les résistances

Ce sont les inverses des différentes conductances thermiques entre les différents éléments du système de séchage :

##### *a) Entre la paroi externe et le milieu ambiant*

$$h_{p,m} = 0.775 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$$

$$D_{\text{ext}} = 0.812 \text{ m}^2 \quad s = 0.505 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{1}{s \times h} = 2.555 \text{ k/w}$$

##### *b) A travers les parois du cylindre*

$$S \times h_{\text{cy.ca}} = 12026.41 \text{ W/K}$$

$$R = \frac{1}{s \times h} = 83.1 \text{ } \mu\text{K/W}$$

##### *c) Entre l'air de séchage et la paroi interne du cylindre*

$$h_{a,p} = 83.4 \text{ W/m.C} \quad \text{et} \quad S = \pi D_i L = 3.14 \times 0.80 \times 0.5 = 1.256 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{1}{s \times h} = 0.0095 \text{ k/w}$$

**d) Entre l'air de séchage et la tomate**

$$h_{t,a} = 188.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \quad \text{et} \quad S_{t,a} = 2.82 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{1}{h \times s} = \frac{1}{2.82 \times 188.664} = 1.879 \text{ mk/w}$$

**e) Entre deux volumes de contrôle de la tomate**

$$h \times s = 0.2882 \text{ W/K}$$

$$R = \frac{1}{h \times s} = 3.469 \text{ K/W}$$

### III.5 Connexion des résistances thermiques

L'air de séchage, la tomate (produit à sécher), le cylindre rotatif et le milieu ambiant constituent les différents éléments du système de séchage où l'ensemble des phénomènes thermiques vont se dérouler durant le séchage. Après avoir segmenté le tunnel en des tranches de 0.5 m suivant le sens de l'écoulement de l'air chaud, on a l'interconnexion suivante des différentes résistances.

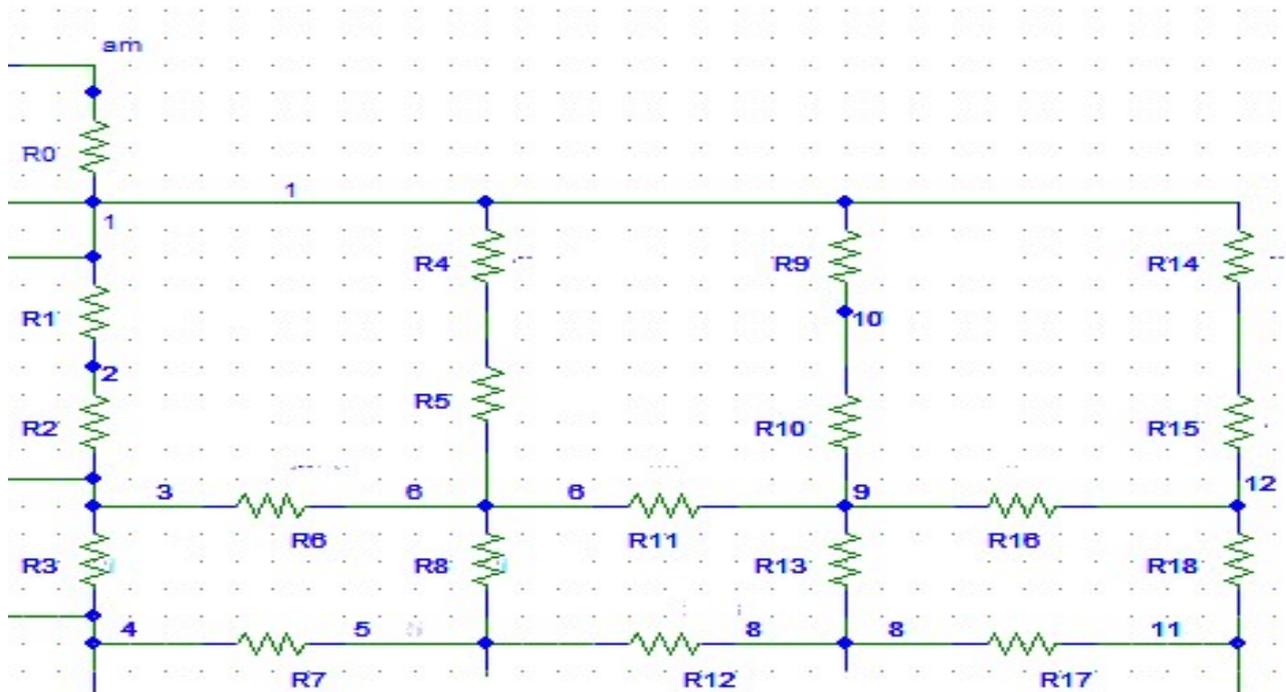


Figure III.5: la connexion des résistances

### III.5.1 Désignation des différents nœuds

**Nœud am** : le milieu ambiant

**Nœud 1** : la paroi externe du cylindre

**Nœud 2** : la paroi interne du cylindre en face de la 1<sup>ère</sup> couche d'air chaud

**Nœud 3** : l'ère couche d'air chaud

**Nœud 4** : volume de la tomate N°1

**Nœud 5** : volume de la tomate N°2

**Nœud 6** : 2<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**Nœud 7** : la paroi interne du cylindre en face de la 2<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**Nœud 8** : volume de la tomate N°3

**Nœud 9** : 3<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**Nœud 10** : la paroi interne du cylindre en face de la 3<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**Nœud 11** : volume de la tomate N°4

**Nœud 12** : 4<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**Nœud 13** : la paroi interne du cylindre en face de la 4<sup>ème</sup> couche d'air chaud

**III.5.2 Désignation des résistances thermique**

- R0 :** Convection de l'air ambiant sur la face externe du cylindre
- R1 :** Conduction à travers le cylindre au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 1ère couche d'air chaud
- R2 :** Convection au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 1ère couche d'air chaud
- R3 :** Convection entre la 1ère couche d'air chaud et le volume N°1 de la tomate
- R4 :** Conduction à travers le cylindre au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 2ème couche d'air chaud
- R5 :** Convection au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 2ème couche d'air chaud
- R6 :** Transfert entre 1ère couche et la 2ème couche d'air chaud
- R7 :** Conduction entre le volume N° 1 et N°2 de la tomate
- R8 :** Convection entre la 2ème couche d'air chaud et le volume N°2 de la tomate
- R9 :** Conduction à travers le cylindre au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 3ème couche d'air chaud
- R10 :** Convection au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 3ème couche d'air chaud
- R11 :** Transfert entre la 2ème et la 3ème couche d'air chaud
- R12 :** Conduction entre le volume N°2 et N°3 de la tomate
- R13 :** Convection entre la 3ème couche d'air chaud et le volume N°3 de la tomate
- R14 :** Conduction à travers le cylindre au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 4ème couche d'air chaud

**R15 :** Convection au niveau de la paroi interne du cylindre en face de la 4ème couche d'air chaud

**R16 :** Transfert entre la 3ème et la 4ème couche d'air chaud

**R17 :** Conduction entre le volume N°3 et N°4 de la tomate

**R18 :** Convection entre la 4ème couche d'air chaud et le volume N°4 de la tomate

### III.6 Description du réseau thermique

PSPICE permet de faire la description du réseau de deux manières :

#### III.6.1 Dessin du réseau thermique

Pour réaliser le dessin d'un circuit il faut :

- Appeler les composants à partir des librairies,
- Tirer des fils de connexions des composants
- Marquer et numéroter les connexions des composants,
- Editer les noms et les fichiers des composants
- Sauver le fichier une fois le schéma terminé
- Lancer la simulation

#### III.6.2 Description du réseau en l'absence du schéma

- Créer et sauver un nouveau fichier.
- Numéroter toutes les connexions du réseau,
- Editer la description du réseau et commandes à effectuer en respectant les règles de syntaxe,
- Sauver le fichier,
- Lancer la simulation

#### III.6.3 Sources liées : Evalue et Gvalue

Par définition la tension de sortie d'une source Evalue (source de tension dépendant d'une tension) et le courant de sortie d'une source Gvalue (source de courant dépendant d'une tension), dépendent de la tension  $V_{IN+} - V_{IN-}$  qui apparaît entre deux points du réseau. Cette dépendance est traduite par une expression mathématique à éditer dans la fenêtre intitulée « set attribute value » qui s'affiche après avoir cliqué deux fois sur la ligne  $V(\%IN+,\%IN-)$  liée aux symboles graphiques de la figure III.6.

Les sources liées Gvalue et Evalue permettent de simuler des sources liées à une tension (température), à un courant (flux de chaleur ou de masse)

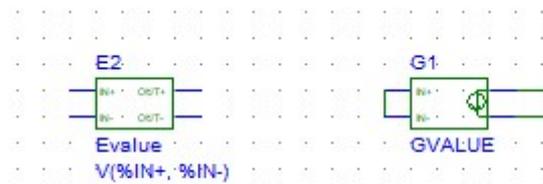


Figure III.6 : les sources liées

### III.7 Le flux d'énergie contenu dans la vapeur quittant la tomate

Nous présentons ci-dessous la méthode de modélisation du transfert de vapeur de la tomate vers l'air asséchant. Ce transfert dépend du gradient de pression qui existe entre la pression partielle de vapeur de l'air de séchage et la pression de vapeur saturante à la surface du produit (tomate). Toutes ces deux pressions dépendent des températures du milieu air et du milieu produit, donc ce transfert aura son équivalent électrique comme une source de courant dépendant d'une tension (GVALUE). Ce flux est matérialisé par une source de courant dépendant d'une tension du fait que c'est une quantité d'énergie dépendante de la température de surface de la tomate mais également de la température de l'air de séchage.

$$G = m_v \times L_v(T)$$

$$L_v(T) = 2490 - 2.226T$$

Avec T température à la surface de la tomate en °C

$$M_v = K_G A \times (P_{vs} - P_v)$$

T (°C)	Dv (m <sup>2</sup> /s)	Sc	Sh	hG (m/s)	kG (s/m)
10	2.4547E-05	0.57838443	125.815836	0.77211539	5.9055E-06
20	2.614 E-05	0.57822736	121.990643	0.79720565	5.8893 E-06
30	2.7777E-05	0.5779371	118.410819	0.82227293	5.874 E-06
40	2.9458E-05	0.57752867	115.053098	0.84731915	5.8595 E-06
50	3.1184E-05	0.57701533	111.897086	0.87234604	5.8458 E-06
60	3.2953E-05	0.57640881	108.924826	0.89735521	5.8328 E-06
70	3.4766E-05	0.57571952	106.120444	0.92234813	5.8205 E-06
80	3.6622E-05	0.5749567	103.469858	0.94732615	5.8088 E-06
90	3.8522E-05	0.57412857	100.960526	0.97229052	5.7976 E-06
100	4.0464E-05	0.57324246	98.5812452	0.99724241	5.787 E-06

**Tableau III.3 :** Grandeurs caractérisant le transfert de vapeur

Ce coefficient varie très faiblement par rapport à la variation de la température. C'est pratiquement constant : on peut adopter la valeur  $5.8 \cdot 10^{-6} \text{ s / m}$

$$K_G = 5.8 \cdot 10^{-6} \text{ s / m}$$

$$A = 0.28 \text{ m}^2$$

Pour accéder à la forme finale de G, on se propose de déterminer le terme ( $P_{vs} - P_v$ )

Le traitement des tableaux III.4 et III.5 :

Température °c	Pression de vapeur saturante	Température °c	Pression de vapeur saturante	Température °c	Pression de vapeur saturante
21	2485.6	41	7776.3	61	20859
22	2642.5	42	8197.3	62	21837
23	2807.9	43	8637.9	63	22853
24	2982.3	44	9098.8	64	23910
25	3166.1	45	9580.7	65	25008
26	3359.7	46	10084	66	26148
27	3563.7	47	10610	67	27332

28	3778.2	48	11160	68	28562
29	4003.9	49	11734	69	29837
30	4241.3	50	12333	70	31161
31	4490.8	51	12959	71	32534
32	4753	52	13611	72	33958
33	5028.4	53	14291	73	35434
34	5317.5	54	15000	74	36963
35	5620.9	55	15739	75	38548
36	5939.3	56	16509	76	40190
37	6273.1	57	17311	77	41891
38	6623.1	58	18145	78	43651
39	6989.8	59	19014	79	45474
40	7374	60	19918	80	47360

**Tableau III.4 :** Température et pression de vapeur saturante associée

La régression de ce tableau nous donne l'équation de type exponentielle suivante :

$$P_{vs} = 774.09 \times \exp(0.537 T_t)$$

Avec  $T_t$  température humide ou température de la tomate :

Température °c	Pression (PA)
15	1710
25	2340
25	3170
30	4250
35	5630
40	7380
45	9590
50	12340
55	15570
60	19930

65	25020
70	31180
75	38570
80	47380
85	57380
90	70140

**Tableau III.5 :** Température et pression partielle de vapeur

Le tableau nous donne :

$$P_v = 959.22 \times \exp(0.0492 T_A)$$

$T_A$  : température de l'air de séchage

Nous donnons les équations suivantes :

$$(P_{vs} - P_v) = (774.09 \times \exp(0.537 T_t)) - (959.22 \times \exp(0.0492 T_A))$$

$$G = K_G A \times (P_{vs} - P_v) \times 2490 - 2.226 T_t$$

$$K_G A = 5.8 \cdot 10^{-6} \times 0.28 = 1.62 \cdot 10^{-6}$$

La combinaison de ces différentes expressions et valeurs nous permet de retrouver l'expression finale qui caractérise ce flux.

$$G = 1.62 \cdot 10^{-6} \times [774.09 \times \exp(0.537 T_t) - 959.22 \times \exp(0.0492 T_A)] \times (2490 - 2.226 T_t)$$

### III.7.1 La simulation et résultats obtenus

Cette partie consiste à la détermination des paramètres optimums j'entrées de notre système de séchage c'est-à-dire le débit et la température de l'air asséchant à envoyer dans le séchoir pour aboutir à humidité escomptée pour une meilleure conservation du produit, mais également à un temps minimum. Pour une première approche de simulation, on a fixé un débit d'air de 15kg/s avec une température aux environs de 70°C, on a obtenu le réseau ci-dessous :

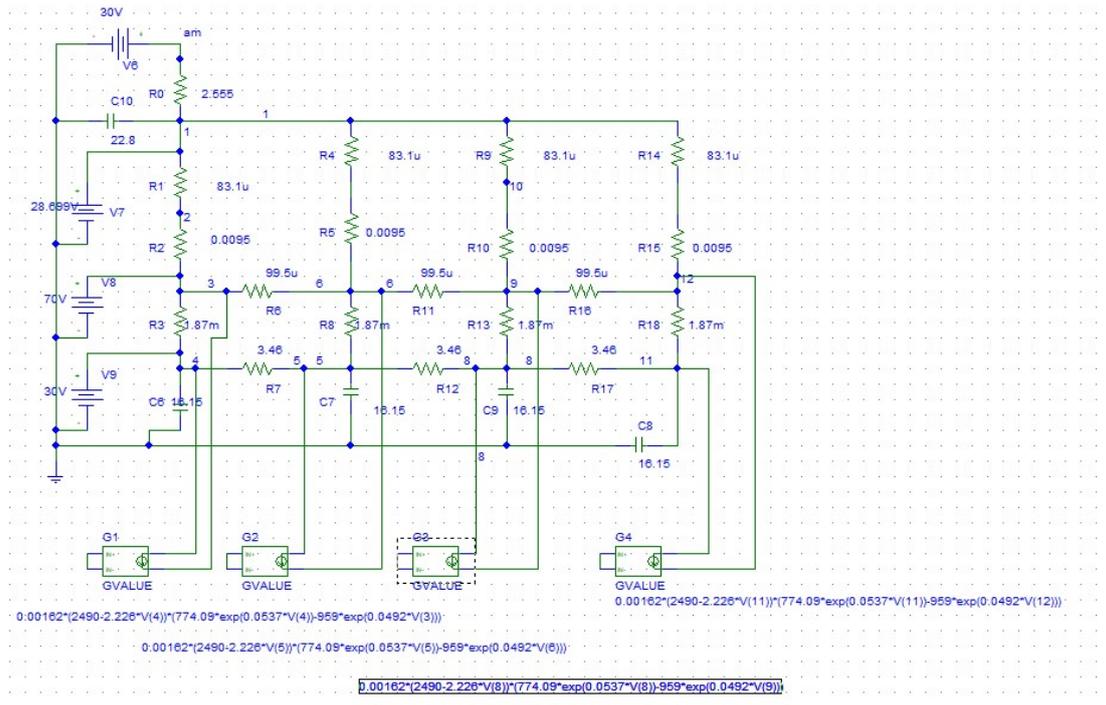


Figure III.7 : Le modèle électrique équivalent du tunnel de séchage

En lançant la simulation à partir de Analysis >>>> Simulate, ou bien en cliquant directement sur l'icône **Simulate** on a la distribution des températures aux différents nœuds du système sur la figure suivante :

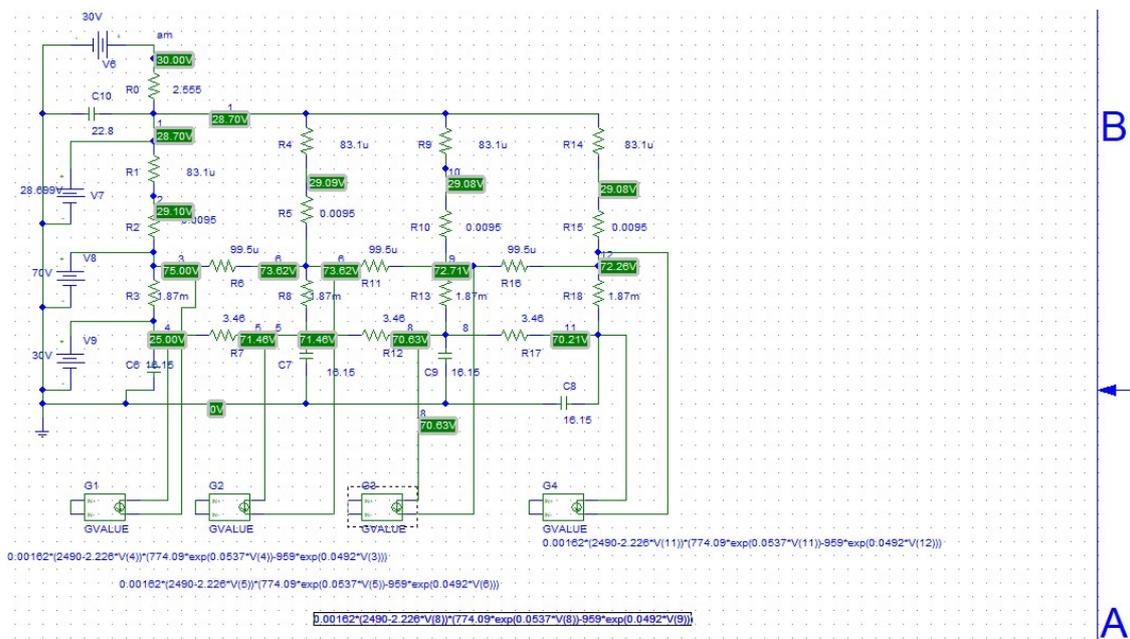
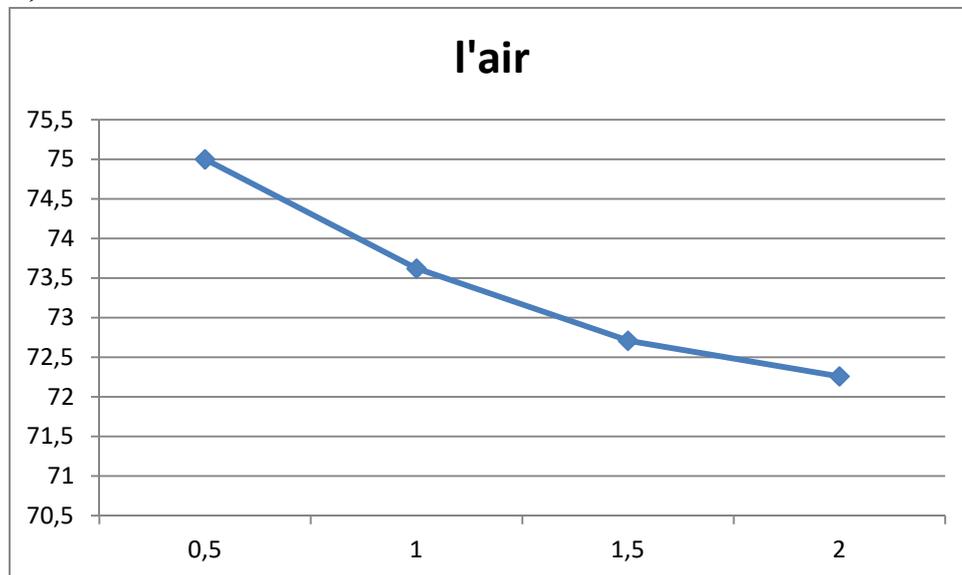


Figure III.8 : Distribution des températures aux différents nœuds

L'air	
Tranche	Température
1	75
2	73.62
3	72.71
4	72.26

Produit (tomate)	
Tranche	Température
1	25
2	71.46
3	70.63
4	70.21

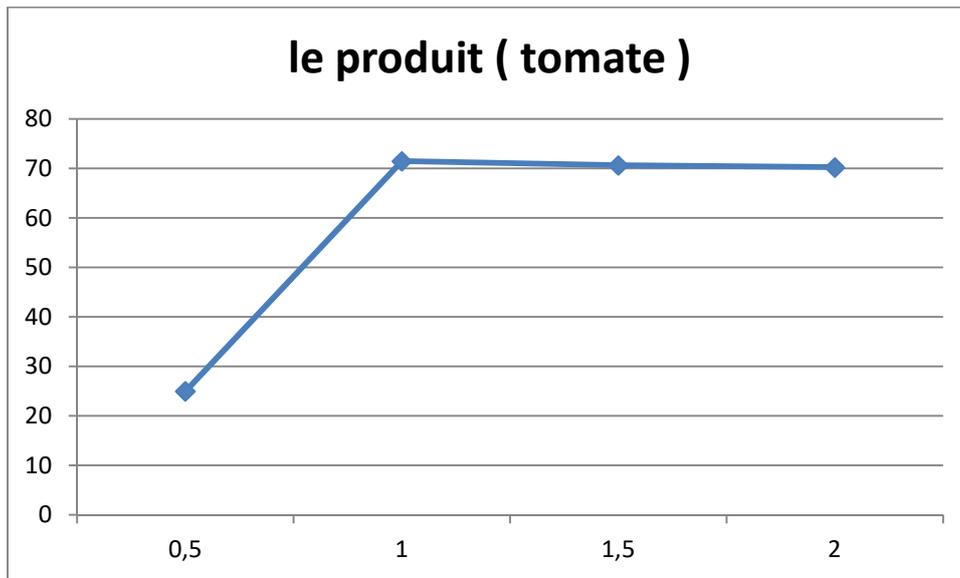
a) *Au niveau de l'air*



**Figure III.9 :** La température de l'air en fonction de la longueur du séchoir

On peut dire tout simplement que la température de l'air de séchage est diminuée au fur et à mesure que ce dernier progresse dans le séchoir, du simple fait qu'il cède de la chaleur au produit durant le processus de séchage.

*b) Au niveau de la tomate*



**Figure III.10 :** La température du produit en fonction de la longueur du séchoir

On observe d'abord une augmentation de la température du produit au contact de l'air de séchage du fait de l'énergie sous forme de chaleur sensible apportée par l'air. Après 71°C on note une variation très faible de la température, on peut dire même qu'on a une stagnation de cette dernière : c'est l'évaporation de l'eau contenue dans le produit à cause de l'énergie apportée par l'air sous forme de chaleur latente.

## Conclusion générale

---

Le séchage est l'une des principales opérations de conservation de nombreux produits alimentaires. Il constitue souvent la dernière opération (après généralement l'opération d'évaporation) du procédé de fabrication d'un produit. C'est une opération de séparation thermique qui consiste à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle.

Après avoir fait une étude sur le produit à sécher à savoir son comportement lorsqu'il est soumis au séchage. Nous avons établi les équations caractéristiques des différents échanges thermiques du système et de transfert d'eau entre le produit à sécher et l'air asséchant. L'établissement de ces équations a fait l'objet de plusieurs hypothèses simplificatrices permettant d'aboutir, non seulement à un système moins complexe, mais facilement saisissable et ne compromettant pas la fiabilité des résultats.

La méthode employée consiste à découper le tunnel en volumes de contrôle considérés comme des éléments isothermes.

Nous sommes attelés à présenter le logiciel électronique de simulation Microsim PSPICE, c'est-à-dire ses fonctionnalités mais également son mode d'utilisation.

Notre dernière phase de cette étude consistait à faire une simulation du réseau thermique équivalent du tunnel de séchage avec PSPICE enfin de trouver les paramètres optimums d'opération de notre système de séchage.

## REFERENCES

---

### Références

- [1] benseddik abdelouahab. Modélisation et simulation du séchage de la figure par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de Magister. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2011.
- [2] F. Cabeza. Diagrammepsychrométrie 2002.
- [3] DEGLA Adnane et SIOUED Rima. Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour: Simulation Numérique. Université de Ourgla, 2015.
- [4] S. Ben Ramdane. Etude expérimentale du procédé de séchage sur les produits agro-alimentaires (tomates) dans un séchoir solaire direct à convection naturelle. Mémoire de Master. Universitaire de Ouargla, 2011.
- [5] Belhoucine ali. Etude thermomécanique des disques de frein : Application du Code de Calcul ANSYS v11.0. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologied'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [6] Richard MATHIEU. l'air humide 2020:4–13.
- [7] Saf Anis & Reddam Souad. Technologies de séchage Etude de cas: séchage de deux matrices végétales. Master. Université A. MIRA – Bejaia, 2018.
- [8] Boussalia Amar. Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Magister en Génie Climatique. UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2010.
- [9] Nicolas JOUVE. Cours de séchage : entraînement 2007.
- [10] Thu Ha Nguyen. Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Thèse en Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, 2015.
- [11] Stéphan SCHULTZ. Les mesures du bois 2020.
- [12] CHEHBOUB Tarek. Modélisation et contrôle des sècheurs rotatifs industriels. Magistère en Electronique. Université de MENTOURI Constantine, 2007.
- [13] SADOK, Djemaia; ZEDAK, Saada. Etude de qualité physico-chimique et microbiologique de la conserve du concentré de tomate (TELLOISE). 2016.
- [14] Caroline Melkonian. La tomate, le légume préféré des français 2018.
- [15] Help sur logiciel PSpice 2017.
- [16] Bernard Grandjean. TRANSFERT DE CHALEUR 2013.
- [17] CHABANE Rosa et BOUHARATI Kahina. Etude logiciel de simulation PSPICE et ses applications en électronique. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2009.
- [18] Moussa KA Modélisation d'un séchoir rotatif pour céréales enrobées par la méthode des analogies thermiques - électriques Sénégal 2004