

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE**

**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**

**DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE**

## **MEMOIRE**

**PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
MAGISTER EN GENIE CLIMATIQUE**

### **THEME**

**ETUDE D'UN SECHOIR SOLAIRE FONCTIONNANT  
EN MODE DIRECT ET INDIRECT**

**PAR  
NADIA CHALAL**

**SOUTENU LE : 16 /12 /2007**

**Devant le jury :**

**Président : A/N. KAABI**

**Rapporteur : A. BELHAMRI**

**Examineurs : R. GOMRI**

**M/S. ROUBAH**

**L. BENNAMOUN**

**Prof : Univ. MENTOURI**

**Prof : Univ. MENTOURI**

**M.C : Univ. MENTOURI**

**M.C : Univ. MENTOURI**

**Dr : C.C :C.U Oum EL BOUAGHI**

## - ANNEXE B -

### **Al - Valeurs des caractéristiques physiques de certains corps**

- **CAPTEUR** : (Vitre en verre ordinaire), [23]

$$\rho_v = 2700 \text{ Kg / m}^3$$

$$C_{pv} = 840 \text{ j / Kg K}$$

$$\lambda_v = 0.78 \text{ W / m }^\circ\text{C-1}$$

$$\text{épaisseur} = 3.10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_v = 0.9 \quad [25]$$

$$\text{Indice de réfraction } n_v = 1.5 \quad [37]$$

- **ABSORBEUR** : (Aluminium peint en noir) [23]

$$\rho_n = 2740 \text{ Kg / m}^3$$

$$C_{pn} = 896 \text{ j / Kg K}$$

$$\lambda_n = 205 \text{ W / m }^\circ\text{C}$$

$$\text{épaisseur} = 0.5.10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_n = 0.96 \quad [24]$$

- **ISOLANT** : (Polystyrène) [24]

$$\text{épaisseur} = 6. 10^{-2} \text{ m}$$

$$\rho_{is} = 16 \text{ Kg / m}^3$$

$$C_{pis} = 1670 \text{ j / Kg. K}$$

$$\lambda_{is} = 0.042 \text{ W / m. K}$$

$$\varepsilon_{is} = 0.1$$

- **SECHOIR** : (couverture en polycarbonate) [36]

$$\text{épaisseur} = 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$\rho_{cov} = 1200 \text{ [Kg / m}^3\text{]}$$

$$C_{pc} = 1200 \text{ [j / Kg. K]}$$

$$\lambda_c = 0.19 \text{ jusqu'à } 0.22 \text{ [W / m. K]}$$

$$\varepsilon_c = 0.95$$

$$\text{indice de réfraction } n_c = 1.584 \quad [37]$$

- **FACE ARRIERE BOIS** : [5]

$$C_{is} = 2720 \text{ [j / Kg. K]}$$

$$\rho_{is} = 430 \text{ [Kg / m}^3\text{]}$$

$$\text{épaisseur} = 6.10^{-2} \text{ m}$$

- **FRUIT** :

$$D = 5.10^{-2} \text{ m}$$

$$X_0 = 78\%$$

$$C_f = 3640 \text{ jusqu'à } 3890 \text{ [j / Kg. K]} \quad [26]$$

Mais aussi

$$C_f = 1.424.mc + 1.549.mp + 1.675.mg + 0.837.ma + 4.187.me \quad [24]$$

$$X_0 = 78 \%$$

Composition du produit [19]

$$\text{Eau} = 78 \%$$

$$\text{Protéines} = 0.78\%$$

$$\text{Carbohydrates} = 19.30\%$$

$$\text{Graisses} = 0.97\%$$

$$\text{Autres} = 0.69\%$$

- **AIR** :

$$\text{Humidité relative} = 20 \%$$



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Dédicace

*Je dédie cet humble travail à :*

*Mes très chers parents ainsi qu'à tous les membres de ma famille  
qui n'ont cessé de croire en mes compétences.*

*Mon mari qui m'a soutenu jusqu'à la dernière minute et qui m'a  
poussé pour le terminer.*

*Mes deux enfants Sami Housseem Eddine et Rym qui se sont  
montrés très patients et ont supporté mon éloignement d'eux,*



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier du fond du cœur mon encadreur Monsieur **A.BELHAMRI**, Professeur à l'Université MENTOURI de CONSTANTINE qui m'a permis de préserver mon espoir et de l'entretenir, il n'a cessé de me prodiguer ses conseils et de me faire bénéficier de son expérience, je le remercie plus particulièrement pour sa large contribution à la réalisation de ce travail et pour sa gentillesse toujours si efficace.

Que Monsieur **A.BELHAMRI** soit assuré de ma profonde admiration et reconnaissance.

Je remercie tous les membres de jury qui ont accepté de consacrer un temps qui leur est précieux pour juger mon travail à savoir :

Monsieur **A/N.KAABI** Professeur et chef de département de Génie Climatique à l'Université MENTOURI de CONSTANTINE, un Monsieur toujours présent pour le bien être de l'étudiant.

Monsieur **R.GOMRI**, Maître de conférence à l'Université MENTOURI de CONSTANTINE qui m'a honoré en s'intéressant à mon travail et d'avoir accepté de le juger.

Monsieur **M/S.ROUABAH**, Maître de conférence à l'Université MENTOURI de CONSTANTINE pour sa clairvoyance et son aide inestimable.

Monsieur **L.BENNAMOUN**, Docteur et chargé de cours au centre universitaire Larbi Ben Mhidi d'OUM EL BOUAGHI à qui je traduis la gratitude qui m'anime et la reconnaissance que je lui voue.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu durant les moments pénibles, je garderai toujours le souvenir ému de leur bienveillance à mon égard et veillerai sans cesse à m'en montrer digne.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>CHAPITRE. I : GENERALITES SUR LE SECHAGE</b>	3
I-1) Séchage	3
I-1.1) Définition	3
I-1.2) Théories descriptives du phénomène de séchage	4
I-2) Terminologie de séchage	6
I-2.1) Humidité	6
I-2.2) Taux d'humidité	6
I-2.3) Etat de siccité	6
I-2.4) Taux d'humidité à l'équilibre	6
I-2.5) Corps hygroscopique	7
I-2.6) Les différents modes de liaison de l'eau	7
I-2.7) Energie de liaison - chaleur de vaporisation	8
I-2.8) Transfert de chaleur	8
I-2.9) Transfert de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humide	12
I-2.9.1) Transport d'humidité des parties profondes du produit vers la surface	12
I- 2.9.2) Obtention des courbes de séchage et interprétation	13
I-3) Les différents types de séchoirs solaires	17
I-3.1) Les techniques du séchage traditionnel	17
I-3.2) Séchoir à ébullition	22
I-3.3) Séchoir à entraînement	22
I-3.4) Séchoirs industriels	24
I-4) L'énergie solaire	26
I-4.1) Notions générales sur l'énergie solaire	26



I-4.2) L'effet de serre	26
I-4.3) Les capteurs solaires	27
I-5) Présentation de quelques travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires	30
<b>CHAPITRE. II : ETUDE D'UN SECHOIR SOLAIRE ET MODELISATION</b>	<b>39</b>
II-1) Choix et description du modèle	39
II-1.1) Présentation du séchoir	39
II-1.2) Modélisation de l'unité de génération d'air chaud	40
II-2) La cinétique de séchage	42
II-3) Méthode de calcul	45
II-3.1) Modélisation pas à pas	45
II-3.1.1) Paramètres	46
II-3.1.2) Hypothèses simplificatrices	47
II-3.2) Equations de résolution	50
II-3.2.1) Cas du séchoir	50
- Nomenclature A :	52
II-3.2.2) Cas du capteur (insolateur)	54
- Nomenclature B :	58
II-3.3) Etude numérique des équations du capteur	60
II-3.3.1) La discrétisation des équations au niveau du capteur	60
- Organigramme du programme développé pour le calcul numérique du capteur	64
II-3.3.2) La discrétisation des équations au niveau du séchoir	67
- Organigramme du programme développé pour le calcul numérique du séchoir	70
- Organigramme général du système (capteur – séchoir)	73





II-4) Recherche bibliographique des coefficients de transfert thermique	74
II-4.1) Au niveau du séchoir	74
II-4.1.1) Calcul des coefficients des transferts thermiques entre la couverture et l'extérieur	74
II-4.1.2) Calcul du coefficient de convection entre l'air asséchant et la vitre	75
II-4.1.3) Calcul du coefficient de convection entre l'air asséchant et le fruit	75
II-4.1.4) Calcul du coefficient de transfert thermique par conduction	76
II-4.1.5) Calcul du coefficient de rayonnement entre l'isolant et le sol	76
II-4.1.6) Calcul du coefficient de rayonnement entre le fruit et la vitre	77
II-4.1.7) Calcul du coefficient de rayonnement entre le fruit et la paroi inférieure	77
II-4.2) Au niveau du capteur	77
II-4.2.1) Calcul des coefficients de conduction a travers la vitre et l'isolant	77
II-4.2.2) Calcul du coefficient de convection (fluide / absorbeur)	77
II-4.2.3) Calcul du coefficient de rayonnement entre la vitre et l'absorbeur	77
II-4.3) Calcul des puissances solaires incidentes	78
II-4.3.1) Calcul des $P_v$ et $P_n$	78



<b>CHAPITRE. III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	84
III-1) L'évolution de la teneur en eau dans les abricots au niveau des tranches du séchoir	84
III-2) Choix des paramètres	87
III-2.1) L'influence de la température de l'air	87
III-2.2) Effet de la masse du produit	91
III-2.3) Effet du diamètre du produit	94
III-2.4) Influence du débit de l'air	96
III-3) Evolution du séchage en tenant compte de la porosité	99
III-4) Le couplage capteur – séchoir	104
III-5) CONCLUSION	114
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	115
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	117
<b>ANNEXES</b>	122
<b>RESUMES</b>	



## NOMENCLATURE

### Principales notations :

### Unités :

$C_p$ : capacité calorifique massique de l'air	J/kg.K
$C_f$ : capacité calorifique massique du fruit	J/kg.K
$D_f$ : diamètre du fruit	m
$D_H$ : diamètre hydraulique ou longueur caractéristique de l'écoulement	m
$e_p$ : épaisseur	m
$h$ : coefficient de transfert de chaleur par convection	$W/m^2.K$
$h_c$ : coefficient de transfert de chaleur par conduction	$W/m^2.K$
$h_r$ : coefficient de transfert de chaleur par rayonnement	$W/m^2.K$
haut : hauteur	m
larg : largeur	m
long : longueur	m
$L_v$ : chaleur latente de vaporisation	J/kg
$Q$ : débit massique d'air	kg /s
$m_f$ : masse du fruit	kg
$m_s$ : masse d'un seul fruit	kg
$p$ : puissance par unité de surface	$W/m^2$
$S_p$ : surface d'une tranche du séchoir	$m^2$
Surf : surface d'une tranche du capteur	$m^2$
$S$ : surface d'échange fruit – air asséchant	$m^2$
$T$ : température	K
$t$ : temps	s
$U$ : vitesse de l'air asséchant	m/s
$v_v$ : vitesse de l'air ambiant	m/s
$V$ : volume	$m^3$
$H_a$ : humidité absolue (fluide)	kg/kg
$X$ : teneur en eau en base humide (produit)	kg/kg
$A_i$ : angle d'inclinaison.	degré



## Indices :

n : absorbeur

ah : air chauffé

am : air ambiant

as : air sec

c : voûte céleste

dif : diffus

dir : directe

f : produit

fld : fluide

is : isolant

sol : sol

v : vitre



**Lettres grecques :**

$\alpha$  : coefficient d'absorption (rayonnement)  
 $\varepsilon$  : coefficient d'émissivité (rayonnement)  
 $H_r$  : humidité relative  
 $\lambda$  : conductivité thermique  
 $\mu$  : viscosité dynamique  
 $\rho$  : masse volumique  
 $\sigma$  : constante de Stephan – Boltzmann  
 $\tau$  : coefficient de transmission (rayonnement)

**Unités :**

Sans  
Sans  
%  
w/m.K  
kg/m.s  
kg/m<sup>3</sup>  
w/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>  
Sans

**Nombres adimensionnels :**

Nu : nombre de Nusselt  
Pr : nombre de Prandlt  
Re : nombre de Reynolds

## **Introduction :**

En pleine expansion, la production maraîchère connaît d'importantes surproductions saisonnières. Celles-ci entraînent la chute régulière des prix et de fortes pertes dommageables à l'ensemble de la production. L'utilisation de séchoirs solaires est une alternative possible pour mettre fin à ces pertes.

Le séchage au soleil est la technique la plus ancienne et la plus répandue de conservation des aliments à travers le monde, principalement dans les pays en voie de développement qui sont souvent les plus ensoleillés mais aussi les plus nécessaires.

Le séchage est l'une des méthodes courantes de conservation de la plupart des produits agroalimentaires, par diminution de leur teneur en eau jusqu'à des valeurs résiduelles où le développement de tout micro-organisme est inhibé. Le stockage est alors possible dans des conditions ambiantes.

Cette technique a fait l'objet de nombreuses communications scientifiques et demeure encore de nos jours un domaine de recherche privilégié notamment dans les pays où l'utilisation des méthodes traditionnelles s'impose toujours. Le paysan pratique le séchage au soleil en étalant ses produits soit à même le sol, soit sur des claies en natte, soit sur des aires en ciment, mais exposés aux intempéries atmosphériques, aux insectes ou à la poussière.

Certains pratiquent le séchage au grenier à l'aide de la fumée générée par la combustion du bois ou de déchets variés. Si ce type de séchage conduit à un produit fini de teneur en eau suffisamment basse, il pose en revanche un problème de qualité dû à une forte teneur en acide acétique et à un goût de fumée notamment dans le cas de certains produits tels que le cacao. Les techniques citées ne sont pas perspicaces et ont ainsi causé une perte considérable non seulement au niveau de la quantité, mais aussi au niveau de la qualité du produit séché.

L'amélioration rationnelle de ces techniques passe par la connaissance du comportement au séchage des produits traités dans la mesure où elle permet de calculer la taille du séchoir et de définir ses conditions d'utilisation.

Pour illustrer notre étude, nous avons choisi un ensemble constitué d'un capteur solaire plan à air, du type convection forcée couplé à une unité de séchage du type statique contenant des abricots disposés sur des claies horizontales. Ce mode de transfert permet un meilleur contrôle du séchage que celui de la convection naturelle.

Le but de ce travail est de développer un modèle mathématique permettant de décrire les transferts de chaleur et de matière au niveau des abricots et de simuler le fonctionnement du séchoir lorsqu'il est alimenté par un capteur solaire.

La simulation numérique est très intéressante car elle permet de tester, en évitant le coût de la construction, l'influence des divers paramètres des transferts thermiques sur la vitesse de séchage et de prédire le modèle de séchoir réalisant les meilleures performances.

Après l'établissement de la terminologie du séchage et des différents mécanismes intervenant au cours du séchage, jugés importants, afin de pouvoir poursuivre le déroulement de ce mémoire; quelques rappels sur les techniques du séchage traditionnel; ainsi que quelques notions sur l'énergie solaire sont présentés. Le second chapitre est consacré à l'élaboration des bilans thermiques du système. Ils font intervenir de nombreux coefficients d'échange et de termes dont la valeur est recherchée dans la littérature en fin du chapitre en question. Dans le troisième chapitre les différentes courbes sont représentées et discutées.

Les annexes précisent quelques points particuliers relatifs à cette étude.

# **CHAPITRE – I :**

## **GENERALITES SUR LE SECHAGE**

### **I - 1 Séchage**

#### **I - 1.1 Définition :**

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide [1].

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des micro-organismes [2].

Il est question donc d'étude de transfert de masse et de chaleur, mais avant d'aborder cette étude, passons en revue quelques définitions utiles.

Deux principaux mécanismes ont été avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher :

- la diffusion
- la migration capillaire



## I - 1.2 Théories descriptives du phénomène de séchage

- **La théorie diffusionnelle [1]**

La théorie diffusionnelle s'applique à des produits à structure continue.

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouvernée par la seconde loi de Fick qui permet d'exprimer le flux de matière au sein d'une particule en fonction du gradient d'humidité.

Rappelons que la loi de Fick traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [3], autrement dit du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques en la simple différence de concentration (et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits).

Cette diffusivité ne peut être calculée que dans de rares cas. Il est pratiquement toujours nécessaire de la connaître. Quelques valeurs de la diffusivité de l'eau dans des produits alimentaires à 50°C sont données ci-dessous (en m<sup>2</sup>/s) :

- betterave à sucre  $5 \times 10^{-10}$  ;
- blé  $7,2 \times 10^{-11}$  ;
- maïs (2,6 à 8,2)  $\times 10^{-11}$  ;
- pomme  $3,6 \times 10^{-9}$  ;
- pomme de terre (0,9 à 1,5)  $\times 10^{-10}$  ;
- feuilles de tabac  $7,8 \times 10^{-13}$ .

La diffusivité dépend de nombreux facteurs comme la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

- **La théorie capillaire (1937) [1]**

Elle s'applique à des produits poreux ou à des produits granulaires (dans ce dernier cas, les espaces entre les particules ont un comportement analogue à celui des pores).

La théorie capillaire repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsque l'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on constate une élévation du niveau du liquide (appelée aussi ascension capillaire) dans le tube par rapport au niveau dans la cuve.

La capillarité dans les produits se réfère à l'écoulement du liquide à travers les interstices jusqu'à la surface du produit, en raison de l'attraction moléculaire entre le liquide et le solide.

Krischer de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre.

D'autres théories ont été établies et développées en se basant sur les deux précédentes, tels

- **La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938)**

Le premier suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires et dans l'état de vapeur au gradient de concentration de la vapeur. Les deux derniers proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration; quant à la diffusion de la vapeur ; elle est due au gradient de pression de la vapeur.

- **La théorie de Luikov (1934)**

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité (le gradient de température est l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité).

- La théorie de Whitaker [4]

C'est la théorie la plus récente (donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux) basée sur l'équation de continuité, de la quantité de mouvement, d'énergie pour les trois phases de la matière et des lois de la thermodynamique.

## **I - 2 Terminologie de séchage**

### **I - 2.1 Humidité**

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

### **I - 2.2 Taux d'humidité**

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

### **I - 2.3 États de siccité**

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

### **I - 2.4 Taux d'humidité à l'équilibre**

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et

de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.

### Ⅰ - 2.5 Corps hygroscopique [1], [5]

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [1], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit ( $P_{vp}$ ) est inférieure à la pression de vapeur saturante ( $P_{vs}$ ), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière.

Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau ( $a_w$ ) est basse.

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide  $a_w$  par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (1)$$

Pour qu'il y ait séchage, quels que soient le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative ( $\Phi$ ) de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau ( $\Phi < a_w$ ) de façon à ce que  $P_{vp} > P_v$  (pression de vapeur de l'air dans l'enceinte). [5]

### Ⅰ - 2.6 Les différents modes de liaison de l'eau

La liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin.

Dans ces deux cas, le corps est dit **hydraté**.

Enlever cette eau d'hydratation revient à détruire le corps.

L'opération de séchage consiste à enlever toute l'eau du corps (l'humidité) autre que son eau d'hydratation [5].

## 1 - 2.7 Energie de liaison – chaleur de vaporisation [5]

La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre ne dépend que de la température régnant à la surface du produit soumis au séchage; cette chaleur n'est autre que la chaleur de vaporisation de l'eau, donnée par la formule :

$$L_v = 597 - 0,56 \theta \quad (2)$$

Où  $L_v$  est exprimée en Kcal/Kg et  $\theta$  en degrés Celsius.

Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, en - dessous d'un certain seuil d'hydratation (correspondant à la limite entre eau "libre" et eau osmotique), les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie de liaison, qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique absorbée, combinée chimiquement.

Pour évaporer cette eau, lors du séchage, il faut fournir un supplément d'énergie thermique. Dans ces conditions, la chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit peut s'écrire :

$$L = L_a + L_v \quad (3)$$

Pour le séchage la chaleur de liaison de l'eau ( $L_a$ ) est négligée car la dessiccation s'arrête à un certain seuil dit d'équilibre, et la chaleur de vaporisation est celle de l'eau dite "libre".

## 1 - 2.8 Transferts de chaleur [1]

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction - rayonnement : Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux.

- **Séchage par convection [1]**

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime

généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques.

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha A (T_a - T_s) \quad (4)$$

$Q$  (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps,

$A$  ( $m^2$ ): surface d'échange,

$(T_a - T_s)$  (K) : l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher,

$\alpha$  (W /  $m^2 \cdot K$ ) coefficient d'échange par convection.

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après :

- La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit alors un diamètre moyen des particules.

D'après la formule (4), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante. Donc la diminution de la taille des particules constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

- L'écart  $(T_a - T_s)$  n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue.

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

- Le coefficient d'échange  $\alpha$  peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des nombres adimensionnels tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que de celles du produit à sécher.

Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm, le coefficient d'échange par convection  $\alpha$  peut être calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$Nu = \alpha d_p / \lambda_a \quad (4.a)$$

$\lambda_a$  : la conductivité thermique de l'air,

Grâce à la relation 
$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (4.b)$$

$Re$  : le nombre de Reynolds,

$Pr$  : le nombre de Prandtl, égal à 0,7 dans le cas de l'air,

$C$  : une constante ajustée expérimentalement,

$m$  : proche de 0,8 et  $n$  de 0,5.

$Re$  étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître  $Nu$  donc le coefficient  $\alpha$  ; cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur.

- **Séchage par conduction [1]**

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif.

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante.

Le flux thermique (en  $W/m^2$ ) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl} \quad (5)$$

Avec  $\lambda$  (W / m.K) conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert,

$\frac{dT_s}{dl}$  : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

- **Séchage par rayonnement [1]**

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil.

La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stephan Boltzmann :

$$Q = A_1 C \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \phi \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (6')$$

$T_1$  (K) température de la source émettrice,

$T_2$  (K) température du produit,

$A_1$  (m<sup>2</sup>) surface du corps recevant le rayonnement,

$A_2$  (m<sup>2</sup>) surface de l'émetteur d'infrarouge,

$\phi$  facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a  $\phi = 1$ ),

$\varepsilon_1$  émissivité du produit à traiter,

$\varepsilon_2$  émissivité de l'émetteur,

$\sigma$  constante de Stephan Boltzmann ( $\sigma = 5,673 \times 10^{-8}$  w / m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>).



## I - 2.9 Transfert de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humide

Dans le paragraphe qui suit, il ne sera fait mention que de l'eau, qui est un des liquides le plus couramment évaporés. Les mécanismes qui vont être décrits s'appliquent cependant aux autres solvants (séchage des peintures, par exemple).

### I - 2.9.1 Transport d'humidité des parties profondes du produit vers sa surface

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure 1) [1].

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

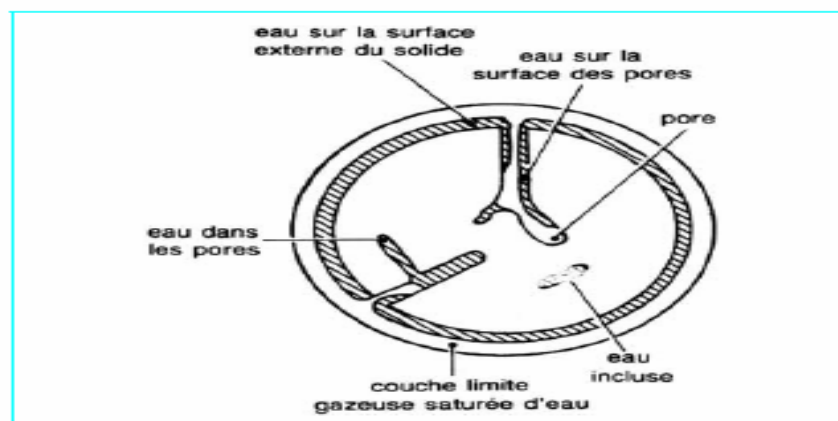


Fig 1 - Représentation schématique d'un solide humide [1]

## 1 - 2.9.2 Obtention des courbes de séchage et interprétation : [1]

La courbe de séchage par entraînement d'un produit granulaire peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température sont contrôlés et maintenus constants. Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu.

En portant le taux d'humidité du produit  $n_s$  (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps  $t$ , on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure 2 [1].

On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation.

En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe  $n_s = f(t)$  – donc la vitesse de séchage  $dn_s/dt$  – en fonction du temps, on peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure est donnée sur la figure 3 [1].

Krischer a proposé un autre mode de représentation : la vitesse de séchage  $dn_s/dt$  en fonction du taux d'humidité  $n_s$  conduit à la courbe représentée sur la figure 4 [1].

Ces 3 types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables.

Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

"C" est le point critique du séchage.

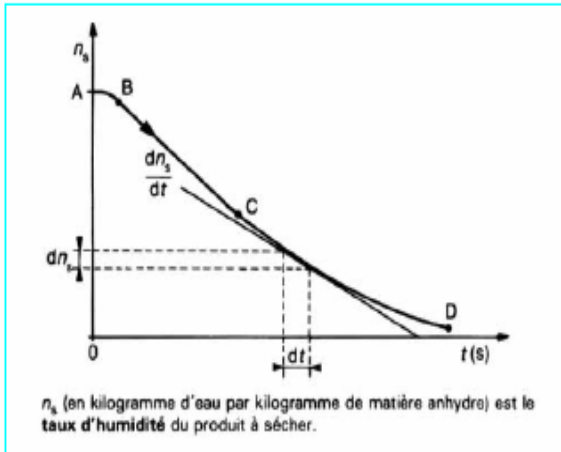


Fig 2 – Courbe de séchage  $n_s = f(t)$  [1]

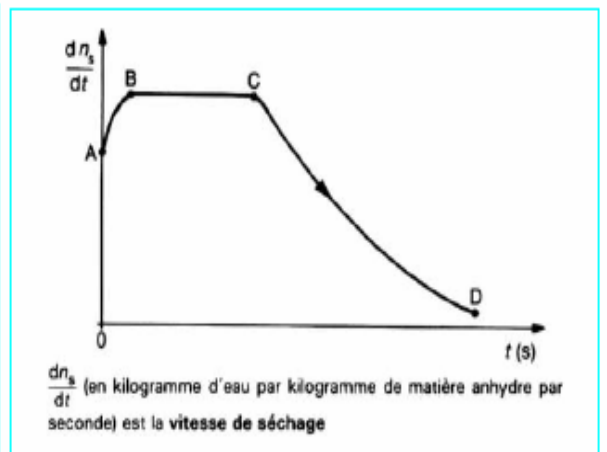


Fig 3 – Courbe de séchage  $(dn_s/dt) = g(t)$  [1]

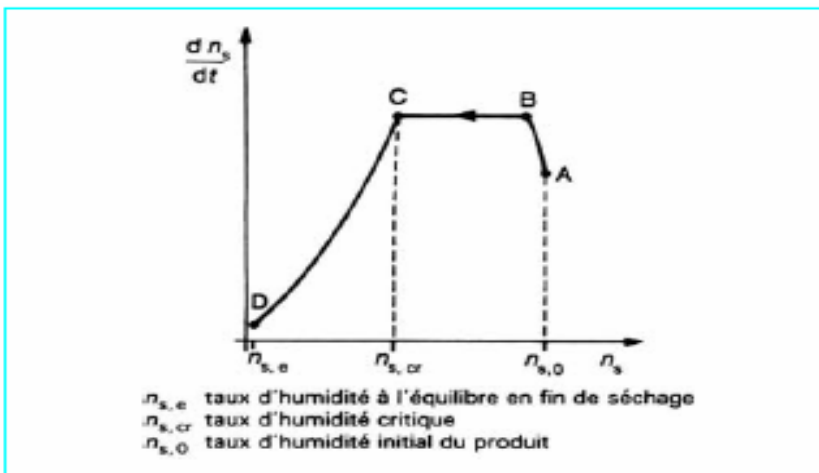


Fig 4 – Courbe de séchage [1]

- **Phase à vitesse de séchage constante** [1], [5]

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite de gaz où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, du sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. La température du solide reste constante et égale à la température dite humide

du fluide de séchage. La nature du solide n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage (en kg d'eau / s) qui, pendant cette phase, est égale à :

$$\frac{dw}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G A (P_s - P_w) \quad (7)$$

Avec

M (kg) : masse du produit à sécher,

A (m<sup>2</sup>) : surface à travers laquelle s'opère le transfert d'humidité,

P<sub>s</sub> (Pa) : pression de vapeur d'eau à la température T à la surface du solide pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturante à la température du solide ou température humide,

P<sub>w</sub> (Pa) : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air,

K<sub>G</sub> (s/m) : coefficient global de transfert de matière.

La phase à vitesse de séchage constante n'est pas toujours identifiable, même pour des produits dont l'humidité initiale est très importante (produits végétaux, produits carnés). L'explication réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits.

De plus, les équations précédemment indiquées tiennent compte d'une surface d'échange A constante. Cela n'est pas toujours réalisé.

De nombreux produits ont tendance à se rétracter au cours du séchage (gels, produits biologiques, papier).

- **Phase à vitesse de séchage décroissante**

Cette phase succède à la phase à vitesse constante quand cette dernière existe. Le taux d'humidité à partir duquel la vitesse de séchage se met à

décroître est le taux d'humidité critique  $n_{s, cr}$  qui n'est pas toujours identifiable et, quand il peut être observé, dépend des conditions de séchage.

On admet que, pendant cette période du séchage, le transfert de l'eau au sein du produit n'est plus assez rapide pour saturer la pellicule de gaz entourant celui-ci. Il se crée dans les produits poreux un front de vaporisation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin de plus en plus important à parcourir, sa pression à la surface du produit diminue. La différence entre cette pression et la pression de vapeur d'eau dans le milieu ambiant, c'est-à-dire le potentiel d'échange, va donc décroître avec, comme conséquence, la diminution de la vitesse de séchage.

Dans les produits non poreux, la diffusion de l'eau au sein du produit est aussi à l'origine de la diminution de la vitesse de séchage.

De même, la diminution de la diffusivité de l'eau au fur et à mesure que le produit sèche, ainsi que le croûtage éventuel du produit, peuvent aussi expliquer la diminution de la vitesse de séchage. Parallèlement, durant cette phase, les conditions régnant à l'extérieur du produit perdent leur influence.

Croûtage : formation d'une pellicule sèche autour du produit ou des particules qui le constituent, cette pellicule s'opposant au transfert d'humidité vers le milieu extérieur.

Deux mécanismes principaux ont été avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher (déjà cités) :

- la diffusion ;
- la migration capillaire.

### I - 3 Les différents types de séchoirs solaires :

Il existe une grande variété de séchoirs et différentes façons de les classer. On peut considérer par exemple le principe sur lequel repose le séchage (ébullition ou entraînement) ou d'après la texture du produit ....

#### I - 3.1 Les techniques du séchage traditionnel

Le séchage au soleil est la technique la plus ancienne et la plus répandue de conservation des aliments [6].

Les différentes techniques qui suivent sont tirées des sources de la FAO [7] qui est L'ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE.

#### ☀ Séchage au soleil de grains de maïs étalés sur une feuille de plastique à même le sol



1) Étaler sur la feuille de plastique une couche de grains de maïs ne dépassant pas 5 cm d'épaisseur.

2) Déplacer le maïs avec un râteau d'un côté puis de l'autre de la feuille de plastique pendant le séchage.



3) Protéger le maïs la nuit en rabattant un pan de la feuille de plastique.

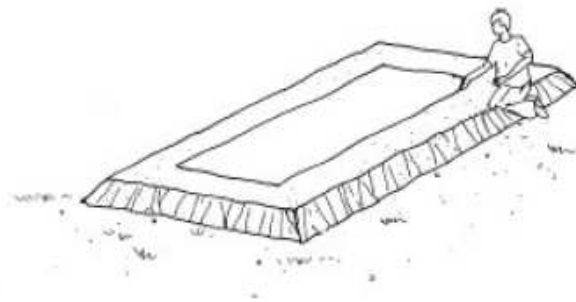
4) On peut aussi réunir les bords de la feuille de plastique pour former un sac.



5) Lier le sac avec une ficelle et le mettre à l'abri pendant la nuit.

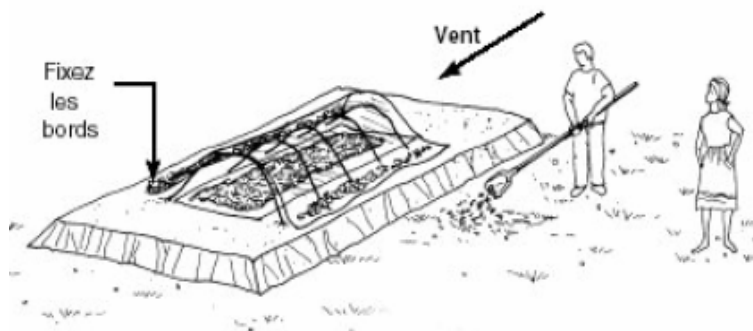
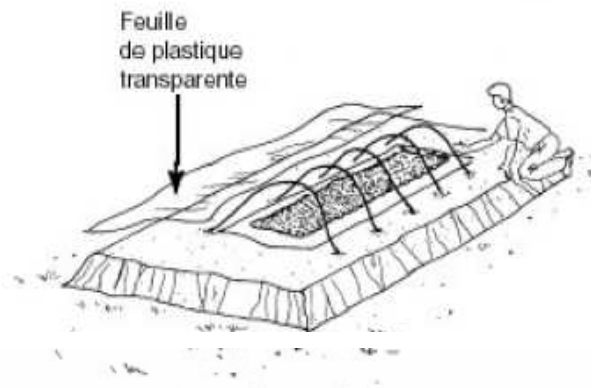
Fig 5 – Séchage au soleil de grains de maïs étalés sur une feuille de plastique [7]

### ☀ Séchage au soleil des grains de maïs dans un tunnel plastique



1) Construire une butte en terre battue et étendre par-dessus une feuille de plastique noire pour y sécher votre maïs.

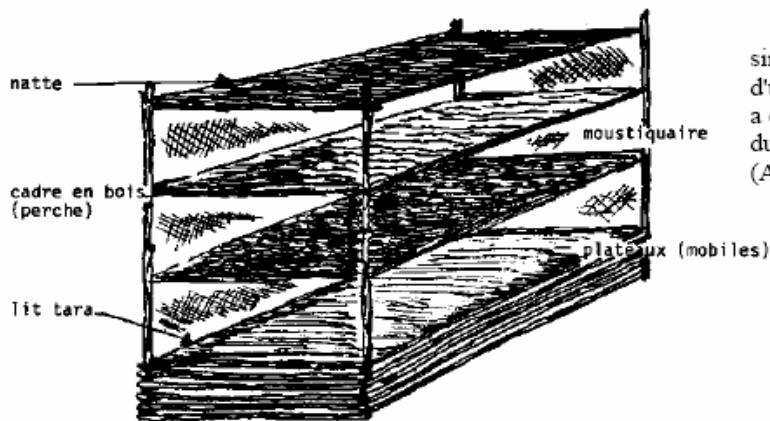
2) Construire un châssis en fil de fer, en bois ou en bambou et découper une feuille de plastique assez grande pour le couvrir.



3) Étaler sur la feuille de plastique noire une couche de grains de maïs ne dépassant pas 5 cm d'épaisseur, recouvrir le châssis avec la feuille de plastique transparente et fixer les bords avec de la terre.

Fig 6 – Séchage au soleil de grains de maïs dans un tunnel plastique [7]

### ☀ Le séchoir solaire "Lit TARA"



Ce séchoir de conception très simple, ayant un coût très faible, d'une capacité de séchage importante, a été conçu et réalisé par les habitants du village de Tégouye (Arrondissement de Téra)

Fig 7 – séchoir solaire "Lit TARA" [7]

Il a pour base de construction un lit traditionnel de type TARA muni à ses 2 extrémités sur la largeur d'un cadre en bois d'environ 2 m de haut comportant 3-4 barres transversales espacées entre elle de 40 - 50 cm de manière à supporter les claies ou plateaux.

### ☀ Le séchoir solaire "Tente"

Le séchoir solaire fait comme une tente est de conception très simple et ne coûte pas cher et il est facile à utiliser

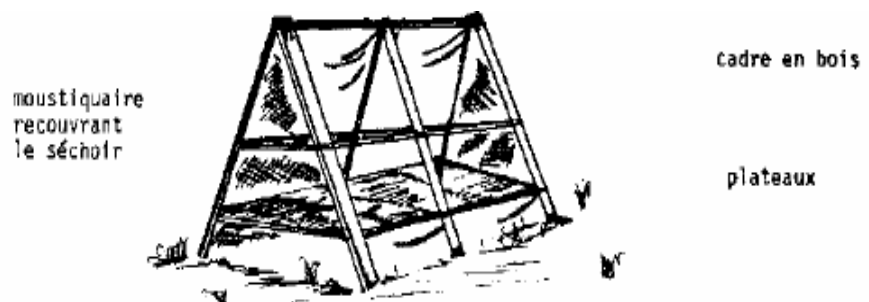


Fig 8 – séchoir solaire "Tente" [7]

L'utilisateur s'il en a les moyens il peut couvrir :

- ▶ Les côtés avec des morceaux de moustiquaires (circulation de l'air)
- ▶ Les faces :
  - Avec du plastique transparent (pour ramasser la chaleur solaire)



- Ou une face en plastique transparent et une en plastique noir  
Les dimensions du séchoir seront fonction des utilisations envisagées.

### ☀ Le séchoir solaire "pyramide"

Ce séchoir pyramide, à un seul plateau, a une capacité de 5 à 14 Kg. Il correspond aux conditions atmosphériques du pays (température élevée, grande vitesse du vent) de plus il permet des manipulations simples ainsi qu'une bonne protection contre la poussière et les insectes.

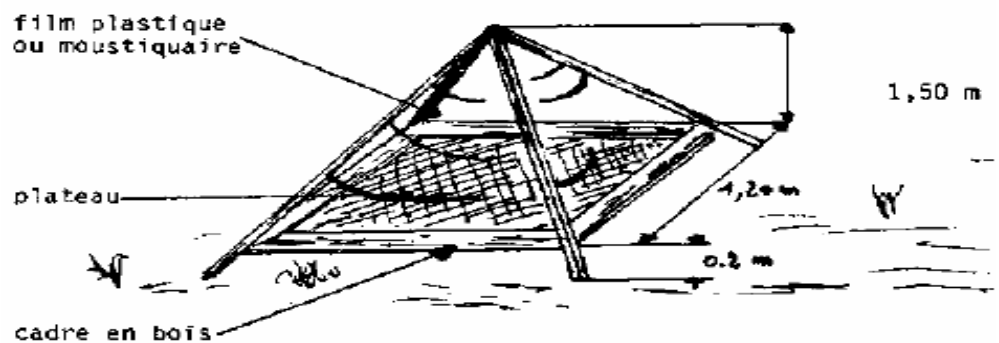


Fig 9 – séchoir solaire "pyramide" [7]

Comme le séchoir tente, il peut être en fonction des moyens de l'utilisateur, recouvert d'une moustiquaire ou subir les améliorations citées précédemment.

### ☀ Le séchoir solaire "Cabinet"

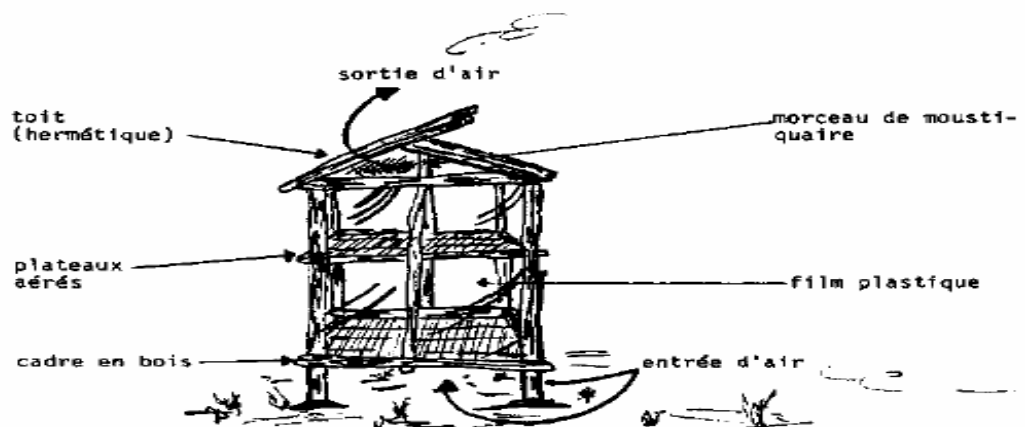


Fig 10 – séchoir solaire "Cabinet" [7]

De conception simple, il peut avoir tout son cadre construit avec des perches de bois trouvé en brousse. Il peut être entièrement recouvert avec du tissu moustiquaire ou comme on le voit sur le schéma avec l'association film plastiqué et morceau moustiquaire, ce qui certes accélère la vitesse de séchage mais plus coûteux.

### ☀ Le séchoir solaire "cheminée"

Ce séchoir solaire est composé d'un petit collecteur en bois recouvert au-dessous par un plastique transparent et à son entrée une moustiquaire est fixée. Pour accélérer la vitesse de séchage sur les cadres de la tour un plastique transparent est disposé de manière à ramasser la lumière solaire.

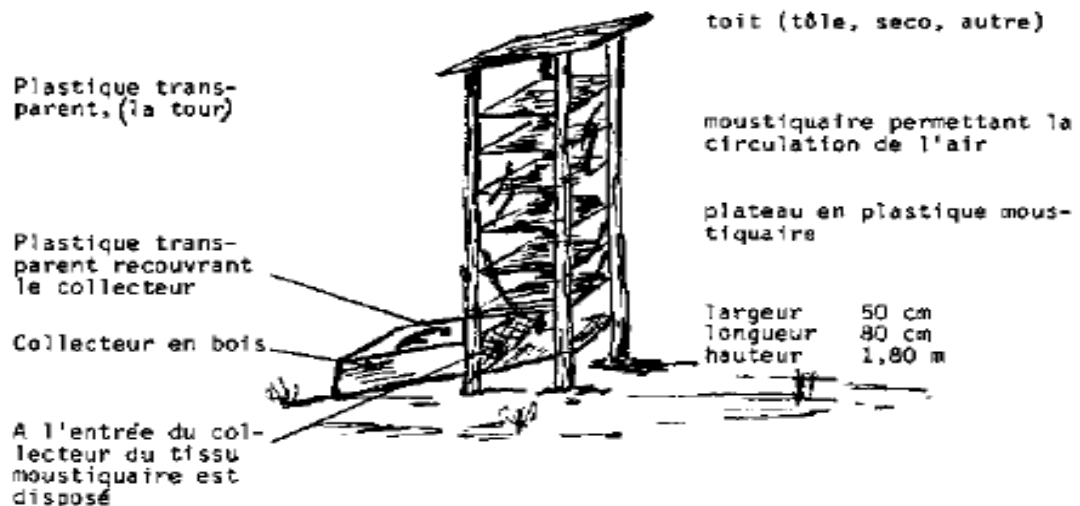


Fig 11 – séchoir solaire "cheminée" [7]

### ☀ Le séchoir solaire " tiroir "

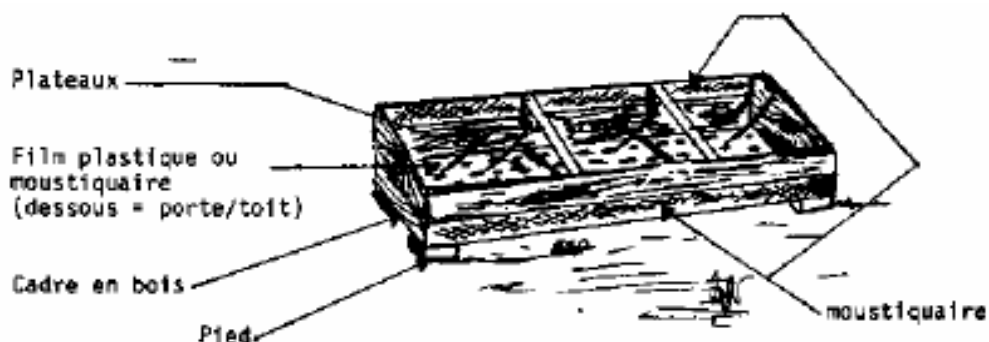


Fig 12 – séchoir solaire " tiroir " [7]

Ce séchoir à collecteur intégré a une fenêtre d'entrée d'air sur l'avant en bas (protégée par une moustiquaire) et une autre de sortie d'air derrière en haut (protégée par un morceau de moustiquaire). Les plateaux aérés permettent une circulation d'air aussi par le dessous. Le tout est un cadre (recouvert d'un film plastique transparent) monté sur charnières de manière à accéder facilement aux plateaux.

**I - 3.2 Séchoir à ébullition** [5]: c'est un séchoir solaire qui nécessiterait des températures supérieures à 100°C, ce qui impliquera une concentration du rayonnement, généralement coûteuse et délicate.

**I - 3.3 Séchoir à entraînement** [5]: on place le produit dans un courant d'air dont la pression de vapeur est inférieure à celle régnant juste à son niveau.

Les séchoirs à "*entraînement*" peuvent être divisés en deux catégories

- Les séchoirs actifs : qui comportent des insolateurs (capteurs) placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer l'air avant son envoi dans cette dernière (voir le schéma ci après [7]). Ils sont nombreux (1/3 fonctionne en convection naturelle, 2/3 fonctionnent en convection forcée).

Ils peuvent être dotés d'un chauffage d'appoint ou d'un recyclage afin d'améliorer ses performances, comme c'est le cas dans les pays industrialisés.

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est isenthalpique.

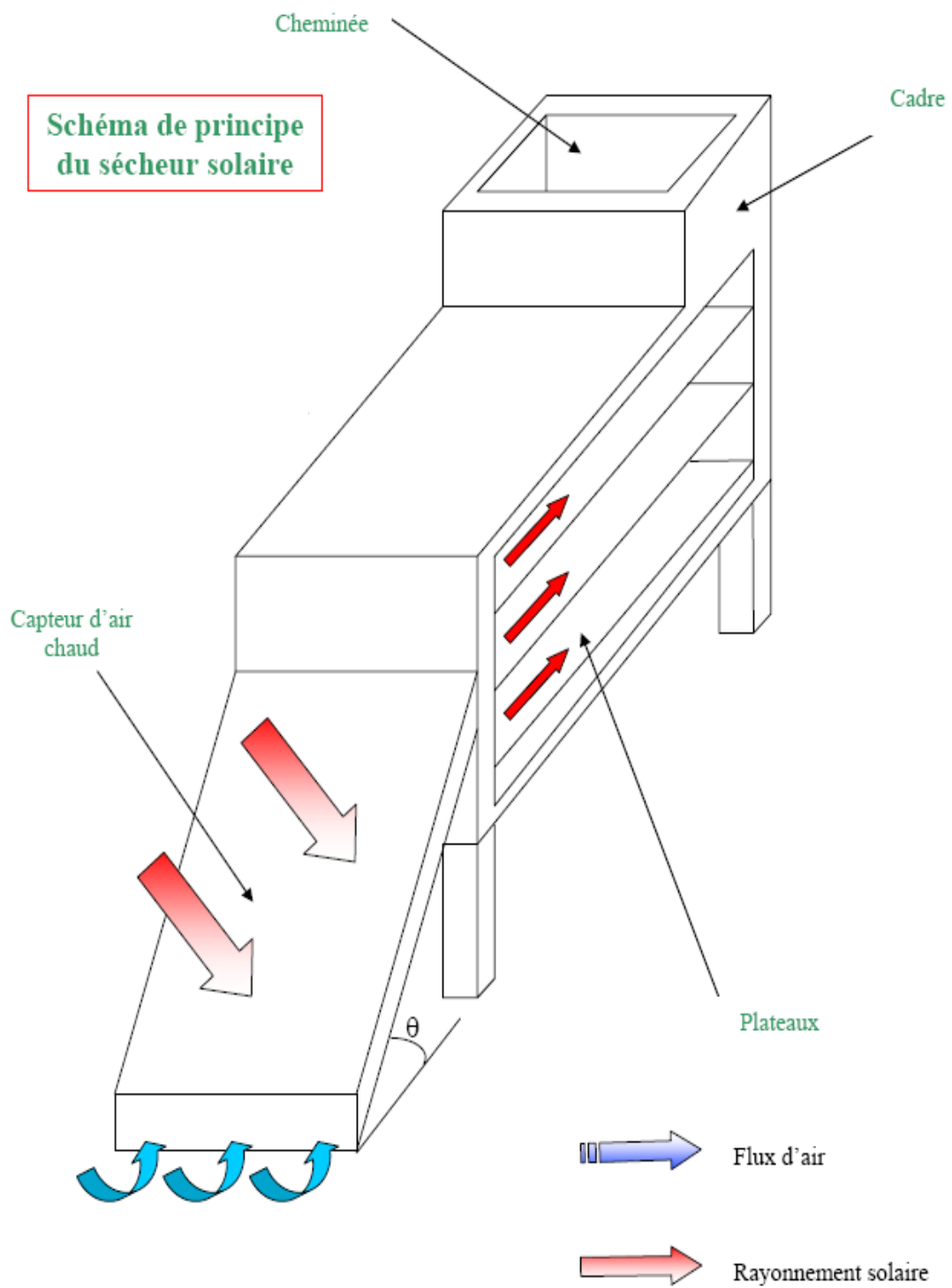


Fig 13 - schémas représentatif d'un séchoir solaire actif [7]

- Les séchoirs passifs : (ou *séchoirs serres*) qui sont constitués d'une enceinte dont le toit et (ou) les côtés en matériau transparent laissent pénétrer le soleil. Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeur. Ces séchoirs sont dits *séchoirs serres directs*.

Si le rayonnement détériore le produit; on interpose alors entre la couverture transparente et le produit une surface opaque servant d'absorbeur. Ce genre de séchoir est dit séchoir serre indirect.

Quant aux séchoirs mixtes qui sont peu présentés; ceux sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement.

Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpiques.

Les séchoirs sont tous discontinus (caractéristique dénotant la simplicité dans la construction).

Les séchoirs continus demanderaient une sophistication et sont très coûteux.

Les séchoirs ne comportent pas d'organe de stockage (coûteux et peu fiables); ce sont les lits de cailloux qui sont les plus utilisés.

#### **I - 3.4 Séchoirs industriels : [8]**

De nombreux types de sécheurs peuvent être aptes à sécher un même produit (tableau 1 [8]). Le choix devra être orienté en fonction des besoins propres à l'utilisateur.

Le produit proprement dit, par contre, du fait de ses caractéristiques physico-chimiques et de son comportement au cours du séchage, devra être un élément essentiel du choix, le sécheur pouvant présenter des problèmes non pas de séchage à proprement parler, mais de détérioration ou de non-conformité du produit du fait des effets secondaires générés par l'opération de séchage, détérioration par élévation excessive de température modifiant les

caractéristiques du produit par rapport à celles souhaitées, détérioration par oxydation indésirable du produit due à un temps de séchage trop long, etc.)

Tableau 1 – Guide pour le choix des sécheurs		
Type d'appareil	Type de produit à sécher	Exemples
Tambour à conduction externe Sécheur à pulvérisation Lit fluidisé Lyophilisateur Sécheur sous vide partiel	Produits liquides ou pâteux étendables ou pulvérisables	Lait, jus de fruit, purées, gâteaux de filtration, liquides épaissis par ébullition.
Tambour à conduction externe Sécheur aéroportant Sécheur à tapis à percussion Sécheur à tapis à rayonnement Sécheur à pertes diélectriques	Produits solides en feuilles, en plaques ou en bandes continues	Cellulose, papier, bois de placage, textiles tissés ou non tissés, objets moulés.
Sécheur à bandes perforées Sécheur à plateaux perforés Sécheur sous vide Sécheur pneumatique Sécheur en lit fluidisé Sécheur à pluie de produit Vis chauffantes Tambour à palettes Tambour rotatif à convection Colonnes de séchage	Produits pâteux extrudables ou émiettables ou granulables. Produit solides divisés	Kaolins, argiles, pigments, minerais concassés, farines, sels chimiques ou minéraux, engrais, tourteaux, sucre, pulpes, légumes découpés, céréales.
Sécheur à bande à percussion Sécheur à convoyeur Tambour rotatif à convection Broyeur sécheur Sécheur à pertes diélectriques Sécheur à rayonnement Sécheur à micro-ondes	Produits solides non divisés Produits solides en formats <sup>(1)</sup>	Produits moulés d'origine et de nature diverses (alimentaire, minérale, chimique), minéraux, supports imprimés.
(1) Par exemple : objets moulés, planches prédécoupées, emballages préformés.		

## I - 4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est produite par le **soleil** à la suite de réaction de fusion thermonucléaire. Elle est la source de la plupart des énergies disponibles sur terre.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous forme de quanta d'énergie, elle est sans cesse renouvelée.

### I - 4.1 Notions générales sur l'énergie solaire [9], [10]

Le rayonnement atteint le sol après avoir été diffusé, diffracté, absorbé et réfracté par des gaz de température et de densité croissantes.

La constante solaire est égale à  $1\,350\text{ W/m}^2$  et fluctue d'environ 0,2 p. 100 tous les trente ans. L'intensité de l'énergie solaire réellement disponible à la surface de la Terre est inférieure à la constante solaire en raison de l'absorption et de la dispersion de cette énergie, due à l'interaction des photons avec l'atmosphère, les nuages ou encore les fumées produites par la pollution.

La puissance solaire disponible en tout point de la Terre dépend également du jour, de l'heure et de la latitude du point de réception. De plus, la quantité d'énergie solaire captée est fonction de l'orientation du récepteur.

### I - 4.2 L'effet de serre [9], [10]

Le Soleil émet en permanence un rayonnement (mélange de lumière visible, d'infrarouges et d'ultraviolets) qui se propage dans l'espace. Une partie de ce rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère terrestre est absorbée par la surface de la terre. Celle-ci émet en retour un rayonnement infrarouge (de la chaleur) en direction de l'espace. Cependant, une partie de ce rayonnement infrarouge est renvoyée en direction de la surface terrestre par certains gaz de l'atmosphère appelés « **gaz à effet de serre** » (les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'oxyde nitreux). Pour schématiser, l'atmosphère et les gaz à effet de serre se

comportent comme la vitre qui maintient la chaleur à l'intérieur de la serre d'un jardinier.

☀ **Serre**: dans une serre, le sol de couleur foncée absorbe toutes les radiations du spectre lumineux, ce qui provoque son échauffement. La vitre transparente qui recouvre la serre piège le rayonnement calorifique qui se dégage du sol (effet de serre). C'est ce qui se passe dans le capteur et dans le séchoir solaire.

Le stockage de cette énergie se fait alors au moyen de pierre ou de réservoirs d'eau, qui restituent lentement la chaleur.

#### 1 - 4.3 Les capteurs solaires [9]

Les capteurs de chaleur solaire sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique, on peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur.

Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- les capteurs plans,
- les capteurs par concentration.

##### ❖ **Capteurs plans** [9], [11]

Les capteurs plans (Figures 14 et 15 -[11]) absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège le rayonnement calorifique s'échappant de la plaque absorbante. Ils peuvent chauffer les fluides caloporteurs à des températures légèrement supérieures à 80°C, avec un rendement variant entre 40 et 80 p.100.

Dans l'hémisphère nord ils sont orientés vers le sud, et dans l'hémisphère sud, vers le nord. L'efficacité des capteurs dépend de l'angle qu'ils forment



avec le plan horizontal. Leur inclinaison optimale varie selon la latitude de l'installation.

### Capteur simple à air

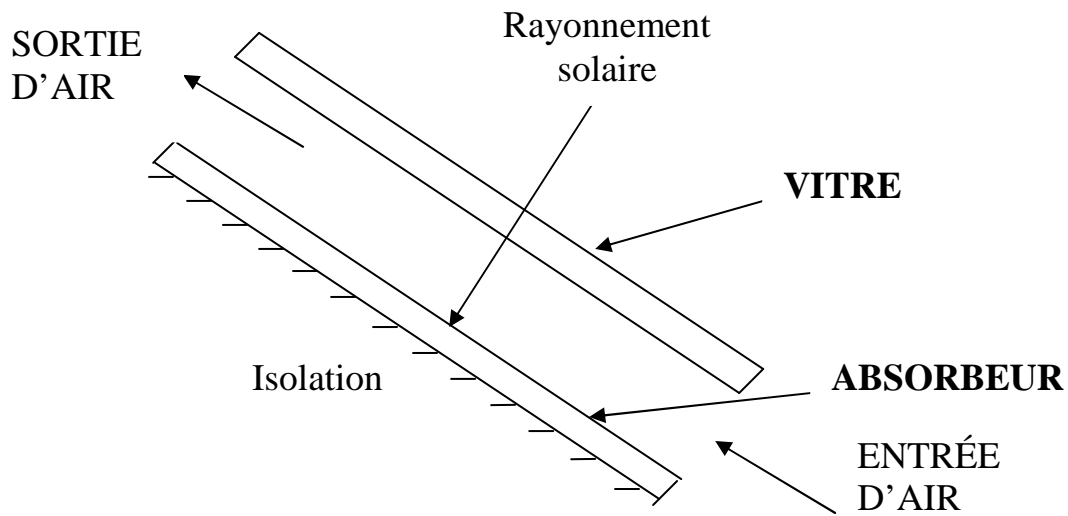


Fig 14 – Représentation schématique d'un capteur plan [11]

On peut augmenter la surface d'échange de chaleur en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée (figure 15).

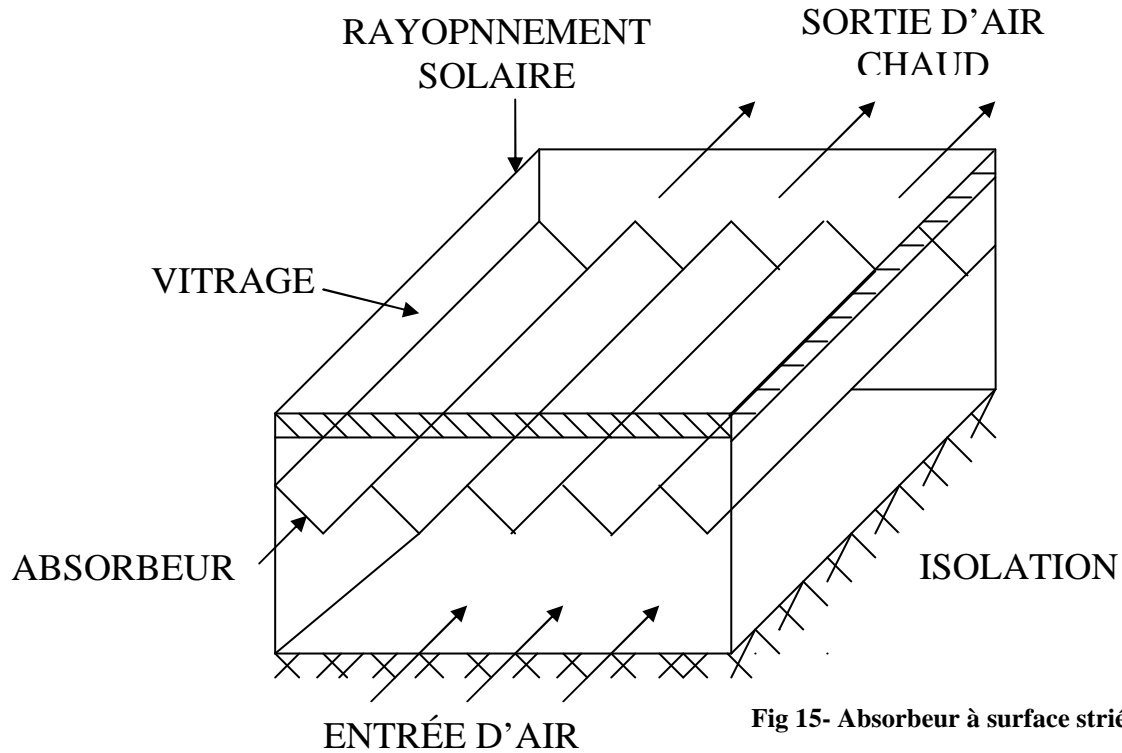
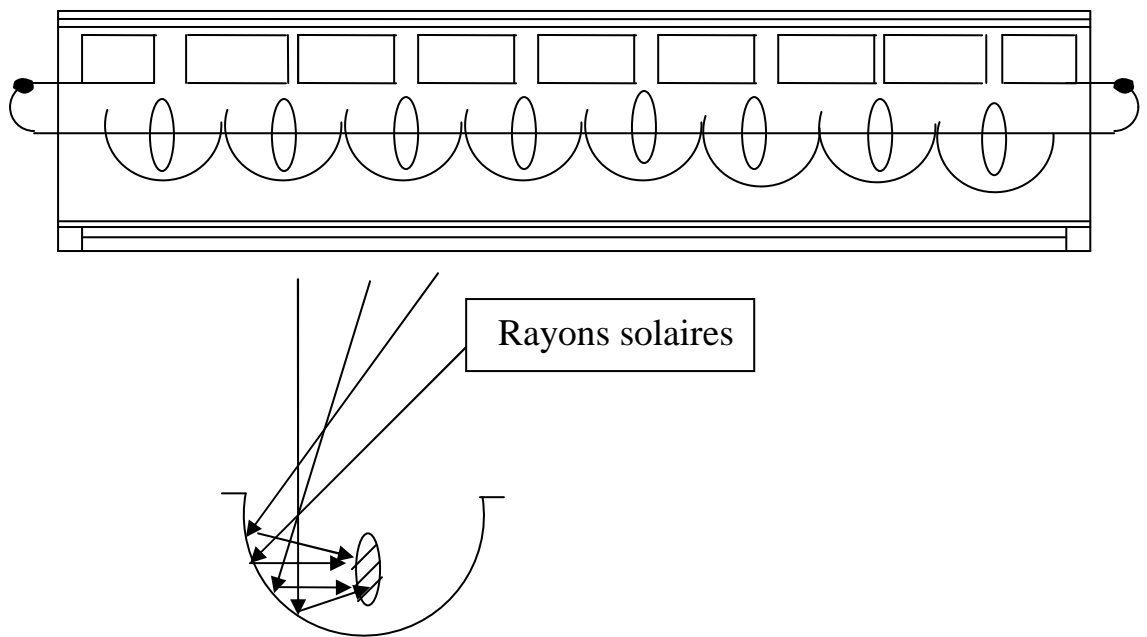


Fig 15- Absorbeur à surface striée [11]

❖ **Capteurs par concentration** [9], [11] et [12]

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux. Il s'agit de réflecteurs en demi-cercle qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines voire même plusieurs milliers de degrés Celsius.



**Fig 16 – Représentation schématique d'un capteur à concentration.** [11]

Un capteur plan de conception simple et d'un faible coût est choisi pour l'élaboration de cette étude.

## I - 5 Présentation de quelques travaux antérieurs concernant le séchage et les séchoirs solaires.

Comme il serait trop long de présenter une description exhaustive des types de séchoirs solaires, nous en citons seulement quelques-uns.

**KUDREST.S.** [13], modélise en régime permanent un séchoir solaire; sorte de boîte verticale, entièrement recouverte de plastique transparent au rayonnement solaire et au sein duquel l'air circule par convection forcée. La conception d'un tel type de séchoir engendre une mauvaise répartition du rayonnement solaire sur les fruits et le séchage n'est pas uniforme (Fig 17- [14]).

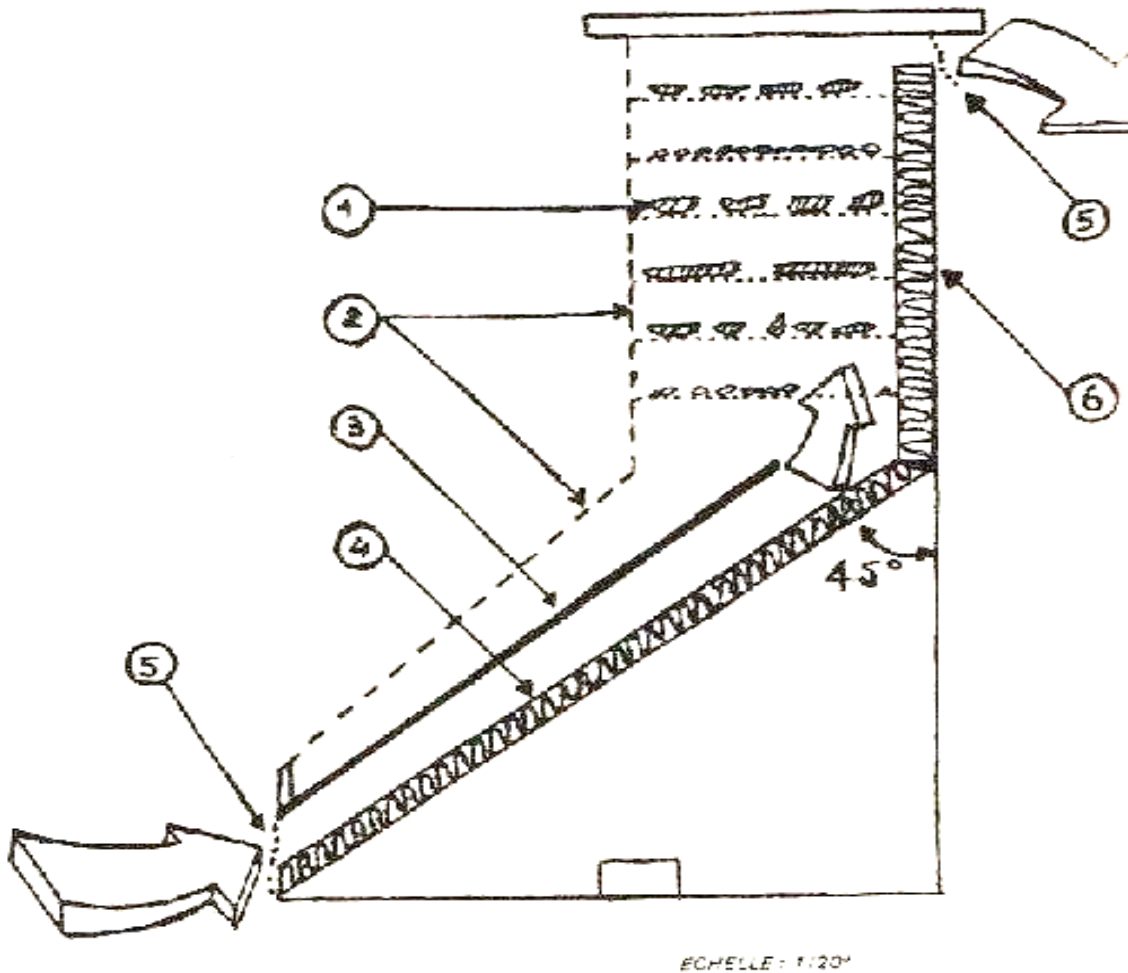


Fig 17 - séchoir solaire sorte de boîte verticale. [14]

Une étude expérimentale en convection naturelle, au sein d'un séchoir à effet de serre, de conception simple et de capacité appropriée à de petites exploitations agricoles a été réalisée en Inde par **SINGH** [15] (Fig 18). la convection naturelle au sein d'un tel type de séchoir ne peut engendrer que de faibles vitesses pour l'air asséchant; la différence de niveau entre le haut et le bas du séchoir est petite. Dans ces conditions, il est à craindre la présence de températures trop élevées qui risqueraient de détériorer le fruit. Le séchage ne dépassait pas les six heures les premiers jours (Fig 19) à cause de l'effet du rétrécissement du produit. Au début ceux sont les premières claies qui séchaient, puis et à cause de la porosité (vide) qui se créait du fait de rétrécissement déjà cité, le processus de séchage est vite inversé et ceux sont les dernières claies qui sèchent avant les premières. Ce qui incitait à reprendre l'opération de séchage le lendemain après avoir remplie les dernières claies en vidant les premières.

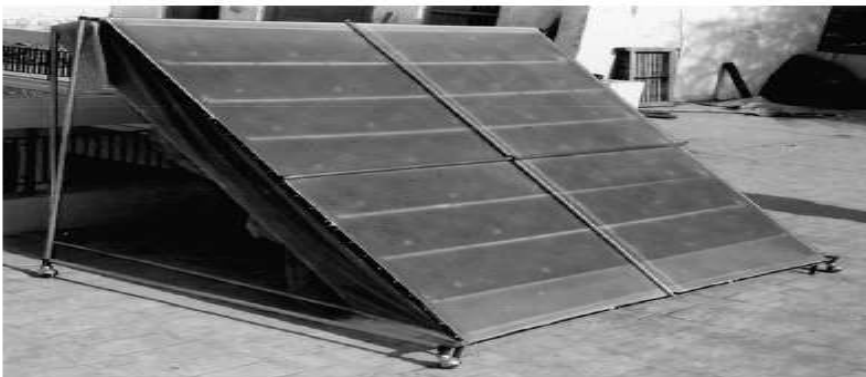


Fig 18- séchoir solaire direct à convection naturelle (SINGH) [15]

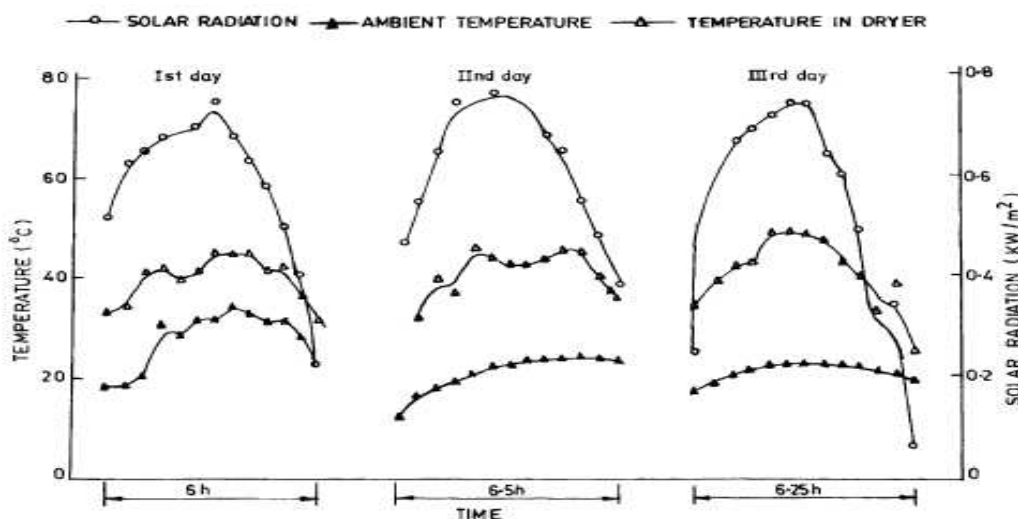


Fig 19 - Températures ambiante et celle dans le séchoir pendant le séchage. [15]

**R.BENKHELFELLAH** et al [16] ont procédé à une étude expérimentale et comparative, de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires, dans des modèles de types direct (un séchoir solaire qui comprend un système de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux de granite peint en noir) et indirect (sans recyclage et sans apport de chaleur).



Fig 20- [16] séchoir (a) direct

séchoir (b) indirect

Dans cette étude ils ont conclu que les produits sèchent 2 à 5 fois plus vite dans un séchoir solaire qu'à l'air libre voir les courbes ci après :

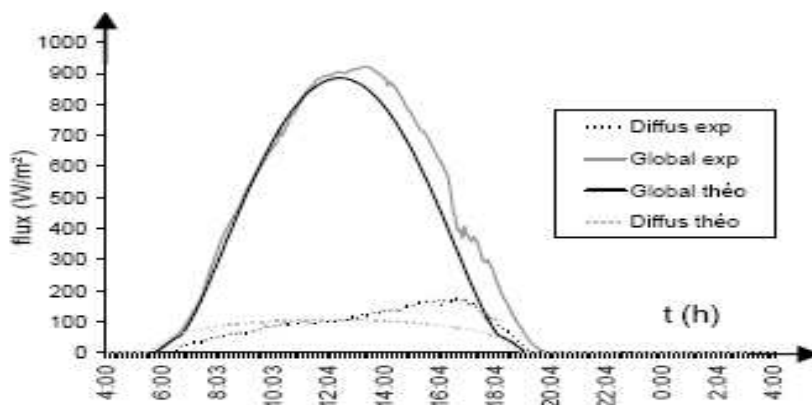


Fig 21- Evolution théorique et expérimentale du rayonnement solaire (flux global et diffus). [16]

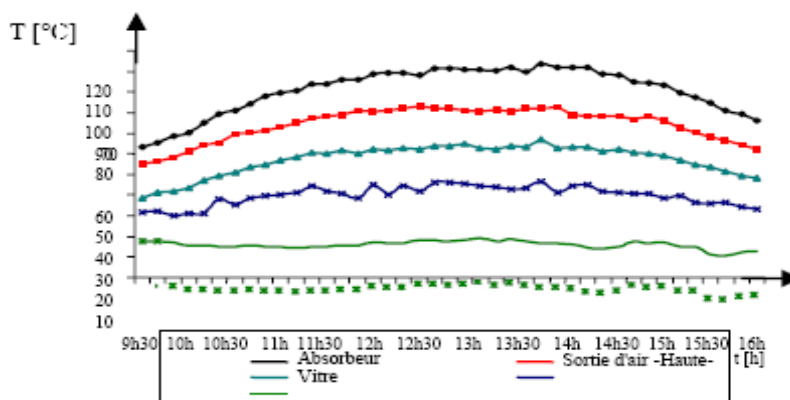
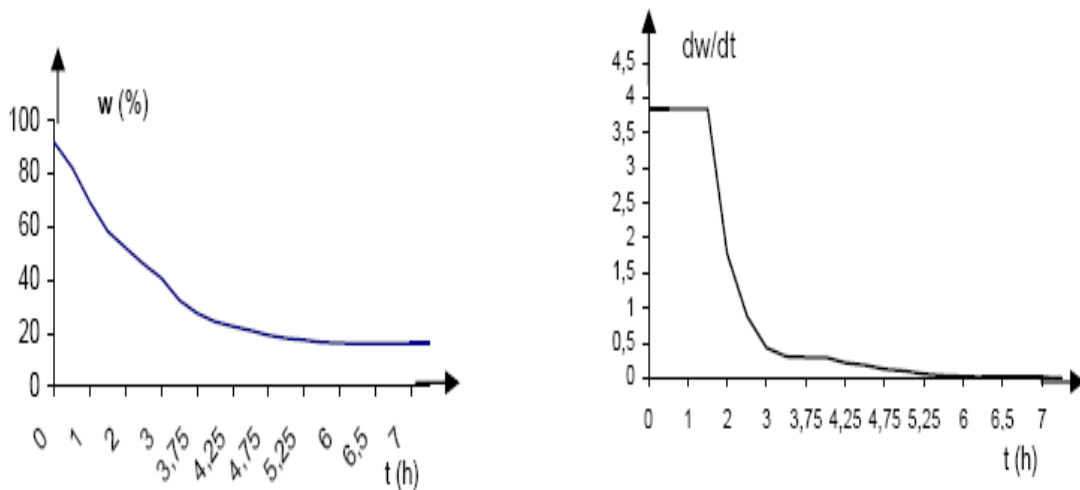
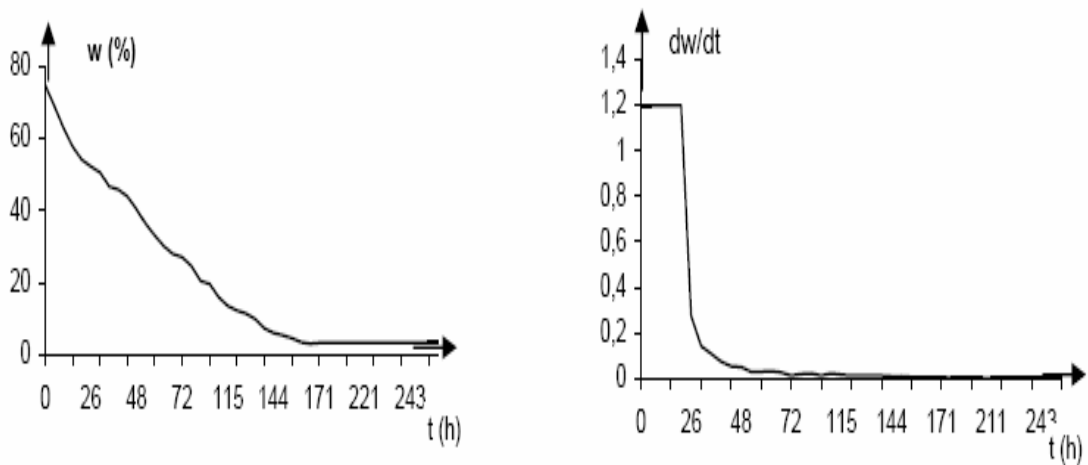


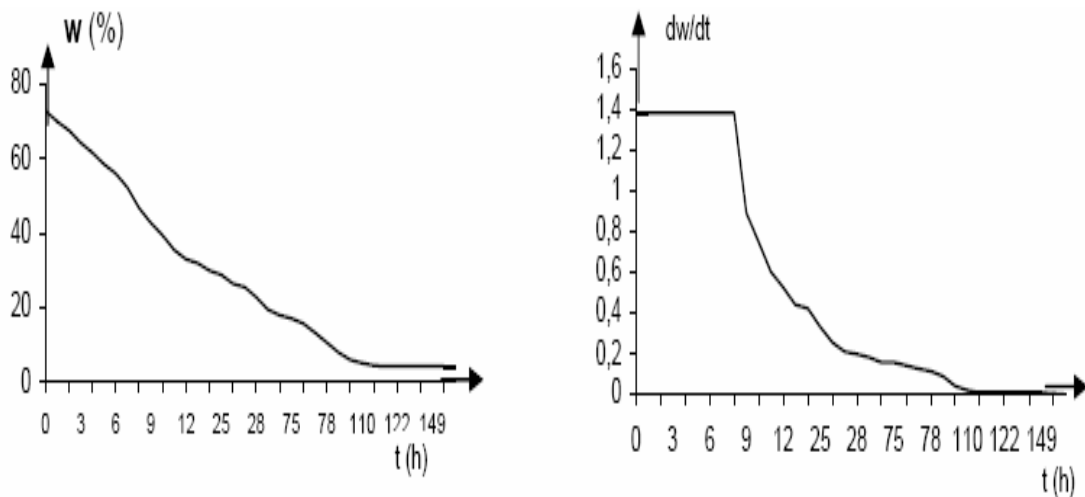
Fig 22- Températures expérimentales dans le capteur à air (séchoir indirect). [16]



Variation de l'humidité relative et vitesse de séchage de la menthe.



Variation de l'humidité et vitesse de séchage du raisin.



Variation de l'humidité et vitesse de séchage de la banane.

Fig 23- Représentation des courbes de perte d'humidité de différents produits. [16]

Tableau 2- pertes de masse et temps de séchage de produits agroalimentaires dans le modèle direct (a) - et indirect (b). [16]

-a-

Produits	Masse Initiale (g)	Masse finale (g)	% d'humidité extraite	Temps de séchage (heures)
Menthe	1000	83	83%	8
Verveine	1000	430	67%	48
Laurier	1000	427	64%	28
Banane	1000	271	73%	144
Raisin	1000	251	75%	268
Prune	1000	277	72,3%	175
Piment	1000	307	70%	72
Figues	1000	205	77,2%	219
Datte	1000	846	15,4%	214

-b-

Produits	Masse initiale [g]	Masse finale [g]	% d'humidité extraite	Temps de séchage [heure]
Menthe	200	40	80	30
Verveine	300	75	75	30
Laurier	300	120	60	28
Piment	300	60	80	243
Raisin	500	150	70	318

J.NGANHOU, TNGANYA [17] ont présenté une étude théorique du séchage solaire des fèves de cacao. Le système de séchage était constitué d'un capteur solaire multi-passe couplé à une unité de séchage du type statique parcouru par un courant de convection forcée, voici quelques résultats de leur étude :

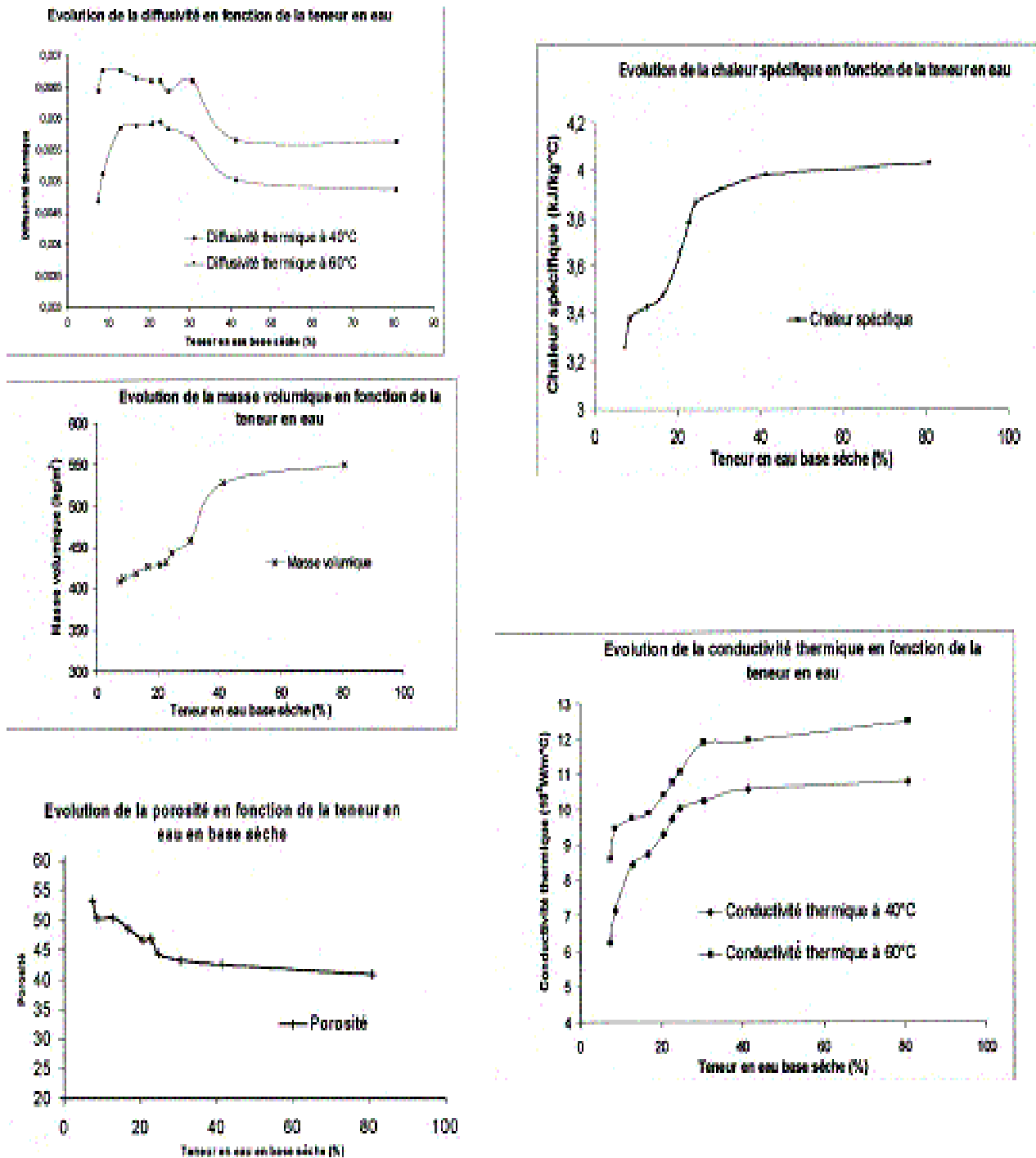
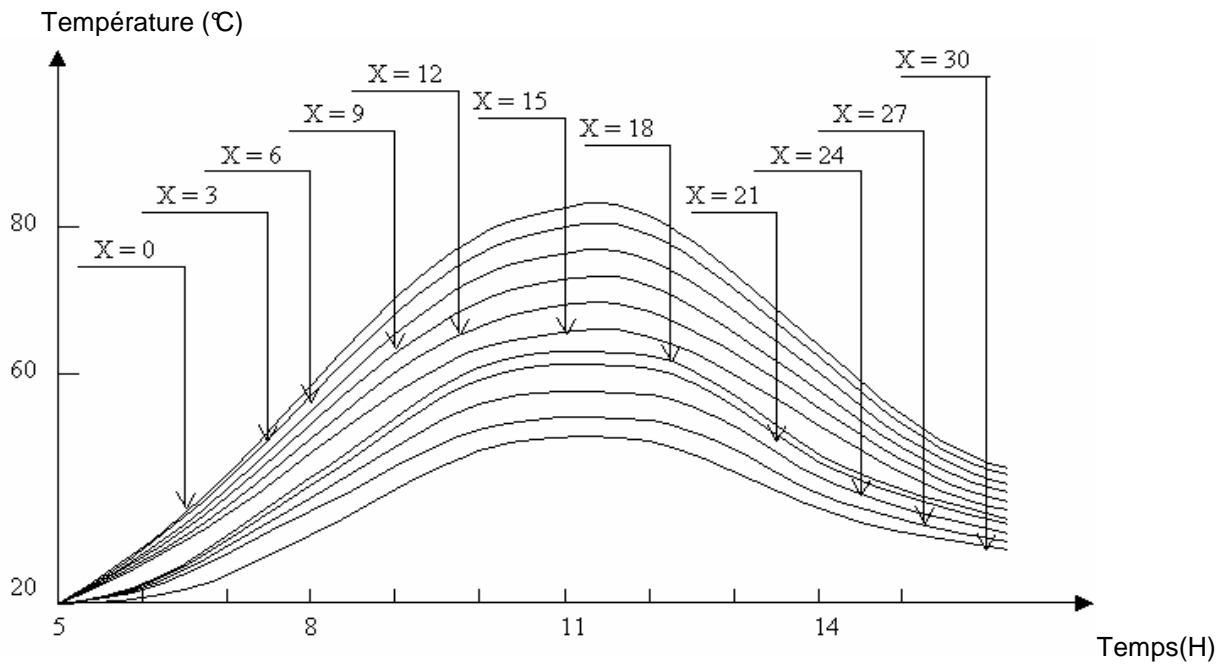


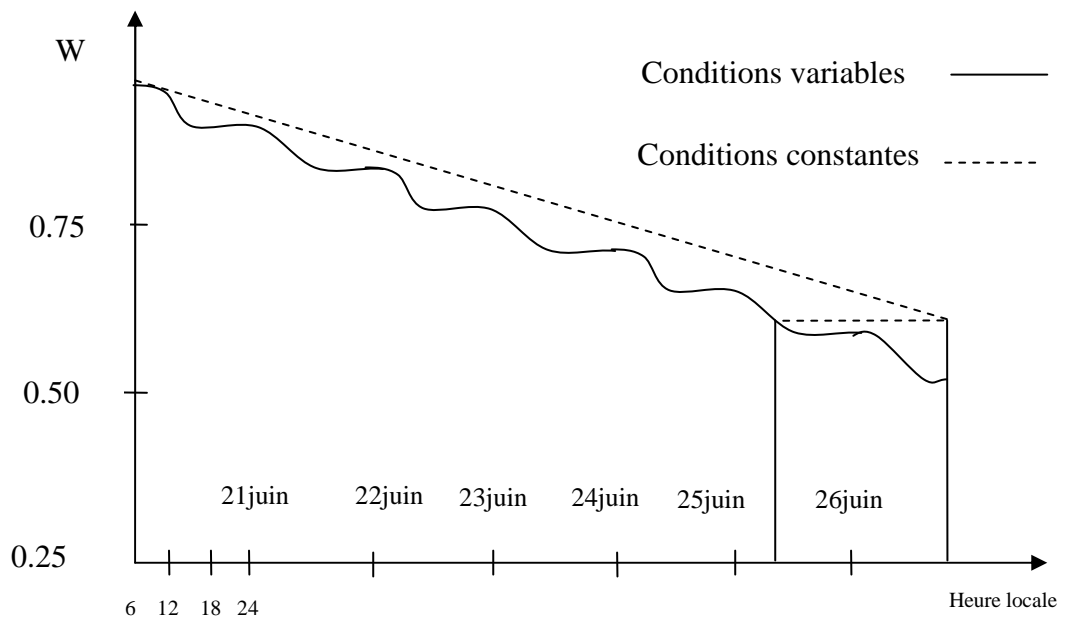
Fig 24– Propriétés thermo physiques du cacao. [17]





**Fig 25- Evolution de la température de l'air de séchage à différents niveaux du lit de cacao en fonction du temps. [17]**

**L.AISSANI** [18] a réalisé un séchoir solaire pour fruits et légumes, il a représenté la variation de la teneur en eau au cours du temps de séchage, le séchage lui a pris plusieurs jours, voir figure 26.



**Fig 26- Distribution de l'humidité du produit. [18]**

**ZEGHMATI-** [13] lui, combine les deux types de séchage : séchage direct et séchage indirect. Son modèle est proche du notre; la seule différence est que la face inférieure possède un plan noir isolé à l'arrière, ce qui a contribué à l'augmentation de la température de l'air de séchage et ainsi la vitesse de séchage; le seul inconvénient la crainte d'une surchauffe qui détériorerait le produit (la pomme Golden).

Les figures (27) et (28) représentent des courbes obtenues par cet auteur :

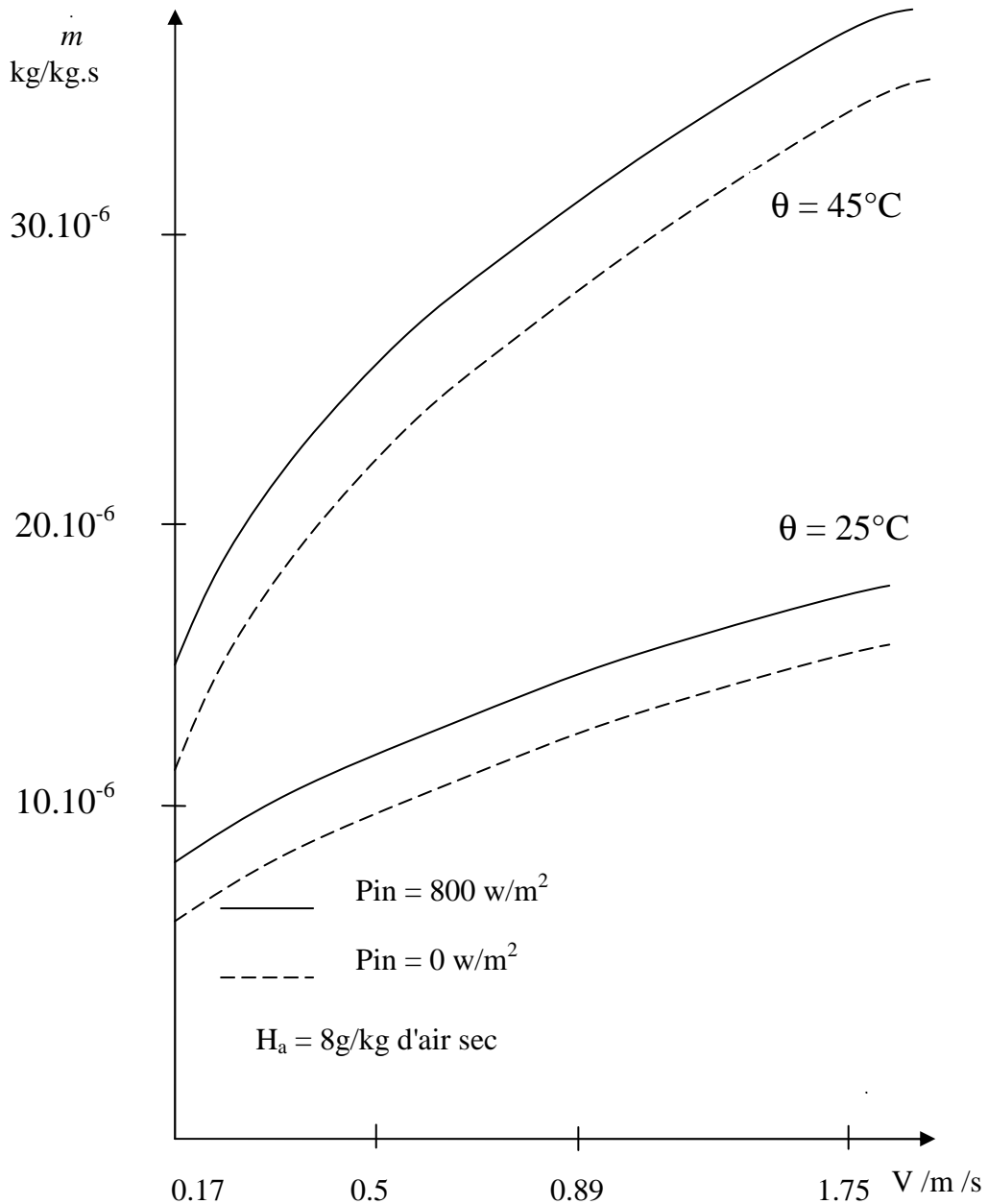


Fig 27- influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage. [13]

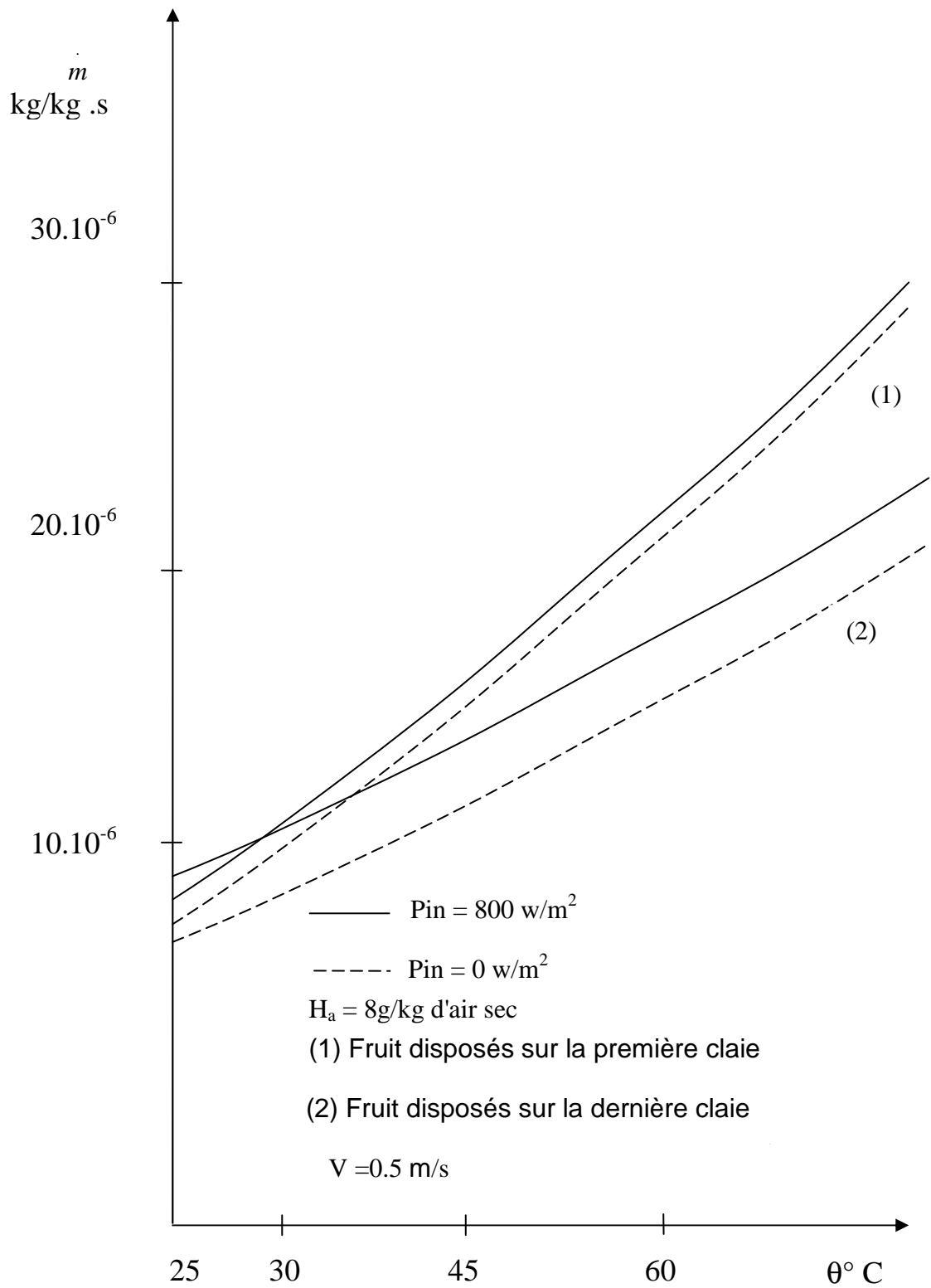


Fig 28 - influence de la température d'entrée de l'air sur la vitesse de séchage [13]

# **CHAPITRE – II :**

## **Etude d'un séchoir solaire et modélisation**

### **II - 1 Choix et description du modèle**

#### **II - 1.1 Présentation du séchoir**

Le séchoir qu'on se propose d'étudier combine les deux types de séchage précédemment décrits : séchage direct et séchage indirect.

Notre modèle est incliné d'un angle de 30° par rapport à l'horizontal et s'apparente à une serre solaire. Il a une forme d'escaliers (Figures 29,30), il est supposé être une boîte parallélépipédique dont la face supérieure est constituée d'une feuille en polycarbonate transparent, laissant passer le rayonnement solaire. Les parois latérales sont isolées thermiquement par des feuilles de polystyrène de 6 cm d'épaisseur. Leurs faces extérieures sont peintes en noir mat pour absorber le maximum du rayonnement solaire; tandis que leurs faces intérieures sont réfléchissantes pour avoir un effet miroir et éviter les zones d'ombres dans la serre; augmentant ainsi le taux d'énergie effectivement absorbé par les fruits. La face arrière est faite en bois traité et vernis afin de résister aux taux d'humidité dégagés par les fruits et faire face aux effets de vieillissement, sa face intérieure est peinte en noir.

Les produits sont disposés à l'intérieure de la boîte sur trois (3) claies (rayons ou plateaux) de forme rectangulaire et ayant chacune une superficie de 0.4 m<sup>2</sup> (400mm×1000 mm). Composée chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage galvanisé, pour permettre le passage de l'air (l'air doit pouvoir passer en dessous des plateaux pour remonter); les claies sont distantes les unes des autres de 40 cm; un espace suffisamment grand pour que la circulation de l'air puisse se faire de la meilleure façon.

## II - 1.2 Modélisation de l'unité de génération d'air chaud

L'utilisation des insolateurs plan à air pour le séchage des produits agricoles est devenue depuis quelques années une technique courante en raison des énergies que nécessite une opération de séchage; et de la progression du coût ces dernières décennies.

Pour réussir une telle opération, il est indispensable d'associer à l'enceinte de séchage, un capteur approprié; c'est-à-dire dont les températures de service permettront l'obtention d'un temps de séchage réduit et un produit séché de bonne qualité.

L'air qui peut être prélevé dans le milieu ambiant puis préchauffé dans un capteur plan très classique (Figure 30) balaie sous l'action d'un ventilateur l'ensemble du séchoir.

L'insolateur est de conception très simple (Fig 33). Ce type de séchoir s'adresse plutôt aux petites exploitations agricoles.

La couverture du capteur exposée au **sud** géographique est composée de verre ordinaire de 3 mm d'épaisseur, choisi pour ses bonnes qualités physiques et son faible coût. La plaque absorbante est responsable du chauffage de l'air. Elle est en aluminium de 0.5 mm d'épaisseur peinte en noir mat.

Le capteur solaire proposé à l'étude ; permet de chauffer l'air dans la partie comprise entre la plaque absorbante et la partie arrière.

L'absorbeur doit transmettre l'énergie qu'il capte au fluide caloporteur en évitant les pertes (par conduction-convection-rayonnement) des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Pour cela on doit procéder comme suit :

- la lame d'air d'épaisseur  $\epsilon$  située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission par conductibilité, mais si  $\epsilon$  est trop grand, une convection naturelle de l'air intervient, ce qui entraîne des pertes non négligeables par convection. Les conditions optimales sont d'après Chapman [10] :

$(T_n - T_v) \epsilon^3 < k$  (k dépend du fluide considéré).

- Un isolant est placé sur les parties arrière et latérales afin de limiter les pertes thermiques.

Deux paramètres sont à imposer (ou à fixer); la température à l'intérieure du séchoir qui ne doit pas excéder les 80°C (il vaut mieux s'arrêter à 70°C) car on veut sécher le produit et non pas le cuire.

Le deuxième paramètre est le débit d'air en mouvement afin de permettre le transfert de l'humidité à l'extérieure du séchoir.

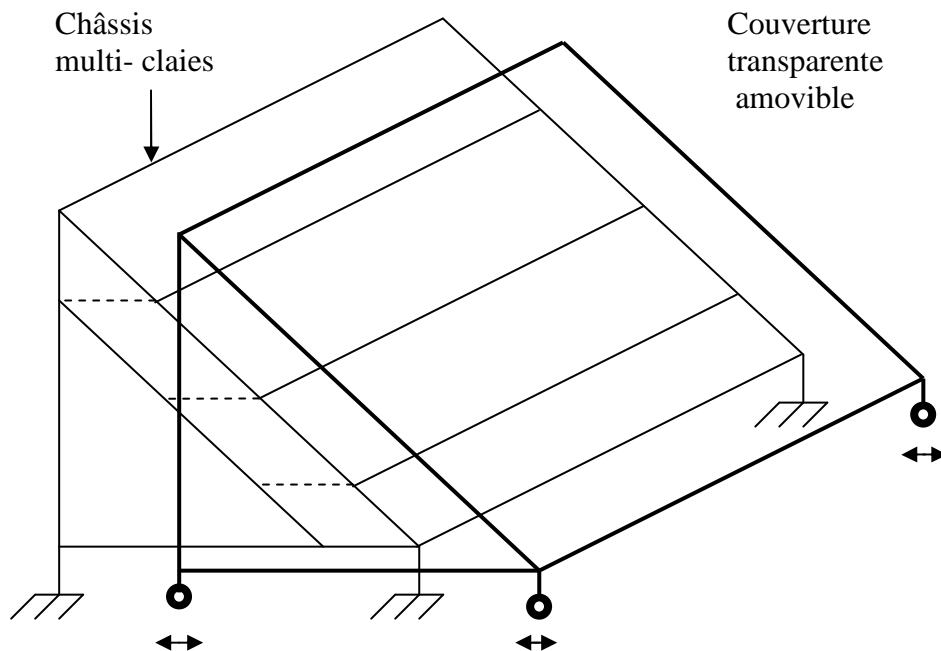


Fig 29- Représentation du séchoir

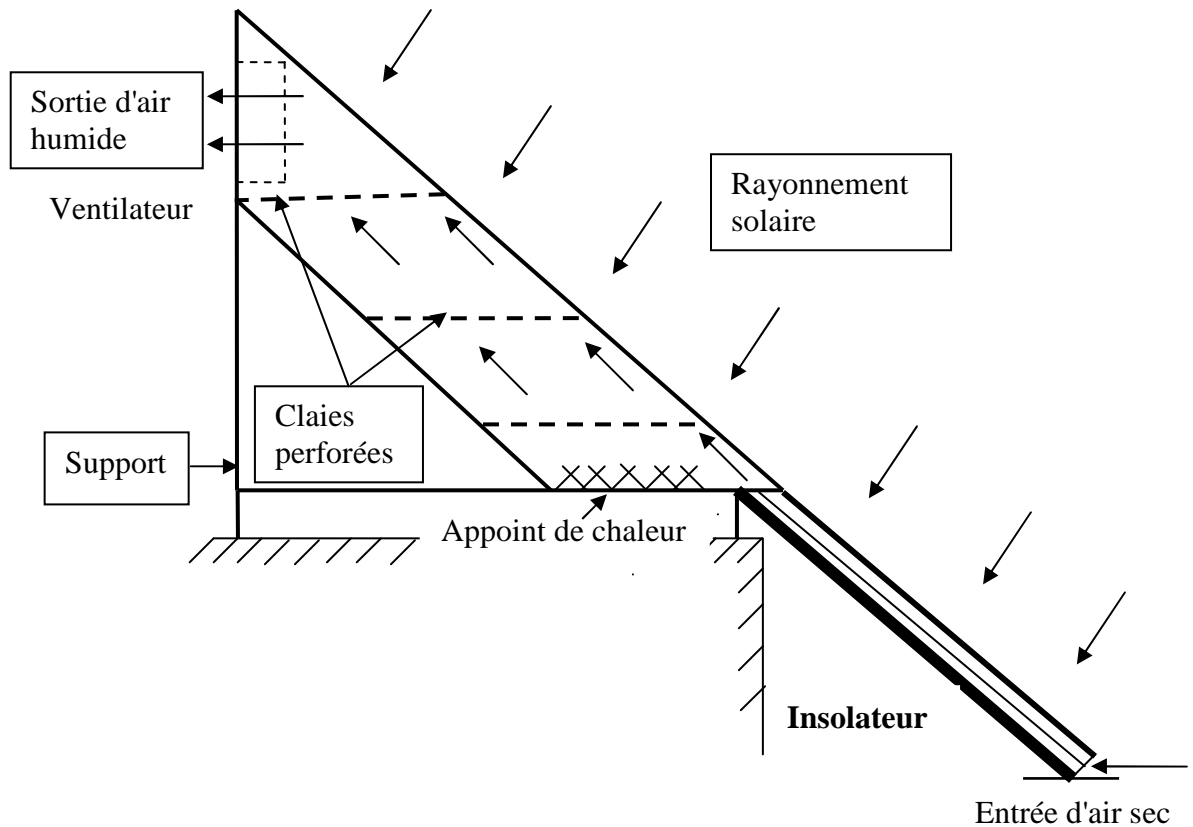


Fig 30- Vue latérale du système (séchoir+capteur)

## II - 2 La cinétique du séchage

Le transfert d'humidité des abricots à l'air a été étudié, un modèle empirique a été établi, où le taux de la teneur en eau dans le produit à sécher est exprimé (avec une validité de 99.9%) [19], comme suit :

$$\frac{dX}{dt} = a \text{Exp}(-kt) + C \quad \text{Ou encore} \quad \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \text{Exp}(-kt) + C$$

$$a = 1.13481 \text{Exp}(0.018352U)$$

$$\text{tel que } r = 0.912$$

$$K = 0.001269 + 0.000018T + 0.00105U$$

$$\text{tel que } r = 0.951$$

$$C = -1.16416 + \text{Exp}\left(\frac{1.6982}{T}\right) - 0.0138U$$

$$\text{tel que } r = 0.804$$

Où "r : coefficient de corrélation".

Et : a, k, c : constantes empiriques du modèle de séchage.

X : teneur en eau (g d'eau / g produit sec), % base humide.

T : température sèche de l'air, °C.

t : temps, heure.

X<sub>0</sub> : teneur en eau initiale, % base humide.

X<sub>e</sub> : teneur en eau d'équilibre, % base humide.

U : vitesse de l'air asséchant, m / s.

Ces expressions peuvent estimer la valeur de la teneur en eau du produit à n'importe quel moment durant le processus de séchage avec une validité très acceptable (99.9 %).

La validité du modèle est établie en comparant les résultats mesurés expérimentalement avec ceux mesurés par simulation (14 études expérimentales).

Le séchage des abricots commence avec une teneur en eau initiale de 74-78 % (base humide); et se termine avec une teneur en eau de 16 à 18 % (base humide).

Le modèle est validé pour des vitesses d'air de (0.2, 0.5, 1.0 et 1.5 m/s) et pour des températures d'air chaud de (50, 60, 70 et 80 °C). Les variations dans la masse ainsi que dans la température du fruit ont été prises en considération dans l'établissement du modèle, de telle façon qu'ils s'accordent avec les propriétés de l'air de séchage.

Si on veut obtenir un séchage réussi des abricots destinés à l'exportation et à l'emmagasinement le plus longtemps possible, il va falloir procéder comme suit :

► **Préparation** : [20], [21], [22]

Les fruits gâtés, pas mûrs ou endommagés sont enlevés ainsi que les impuretés. Ils sont lavés pour dégager les résidus d'insecticides et de saleté. Ensuite, les abricots sont découpés en oreillons sur une table de travail



spéciale à l'aide de couteaux pointus et courbés le long de leur suture abdominale ; ils sont ainsi dénoyautés. Ensuite la pulpe est contrôlée des infestations d'insectes (le séchage n'utilise que des fruits d'excellente qualité).

► **Prétraitement** : [20], [21], [22]

Les fruits sont soumis à un prétraitement au soufre afin de préserver leur couleur, leur goût et leur contenu en vitamines A et C et de les protéger contre la contamination par micro-organismes. La sulfuration se poursuit de la manière suivante: Les oreillons sont trempés pendant 30 minutes dans une solution de bisulfite de sodium à 7% ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) (dissoudre dans chaque 100 litres d'eau 7, 5 kg de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ). Afin de prévenir des effets nuisibles à la santé, la teneur des abricots en  $\text{SO}_2$  est limitée en Europe à 2000 mg/kg. Le processus de trempage tel que décrit ci-dessus ne dépassera pas cette valeur limite.

► **Séchage** : [20], [21], [22]

Les oreillons des abricots sont posés, les uns inclinés contre les autres, dans une couche unique sur le grillage du séchoir. Le processus de séchage démarre après avoir fermé le séchoir. Afin d'éviter un endommagement des fruits, la température de l'air de séchage ne doit pas dépasser 75 à 80° C ; quant à celle du fruit elle ne doit pas excéder les 65°C. Le processus de séchage est terminé une fois que la teneur en humidité finale d'équilibre est atteinte, ou si lors d'une pression sur les fruits entre le pouce et l'index, le jus ne sort plus. Dans des conditions normales (à ciel dégagé), le processus de séchage prend, en été, environ 2 à 3 jours.

► **Stockage** : [20], [21], [22]

Les abricots séchés sont mis dans des cartons recouverts intérieurement par du plastique. Ils sont gardés dans un endroit frais et à l'abri du soleil. Le lieu du stockage est à garder propre et bien aéré, en assurant qu'il n'y entrent ni insectes, ni rongeurs. La qualité du produit est régulièrement contrôlée.

## **II - 3 Méthode de calcul :**

La simulation numérique est un outil qui convient parfaitement pour :

- Etudier le comportement de modèles physiques caractéristiques de systèmes réels de conceptions diverses, en utilisant des modèles mathématiques ou logiques, ce qui élimine le coût de la construction.
- Simuler le fonctionnement du modèle pour un environnement météorologique donné et prédire les performances du système réel.
- Etudier l'influence d'un paramètre isolé de l'ensemble des autres, sur l'évolution de la vitesse de séchage.

Pour qu'une simulation garde son intérêt, il faut connaître le plus parfaitement possible les lois régissant les transferts thermiques et massiques dont le système réel est le siège.

IL faut aussi établir un modèle physique qui traduise le mieux possible les caractéristiques essentielles du système réel.

### **II - 3.1 Modélisation pas à pas**

Le principe repose sur un découpage fictif du capteur et du séchoir en un certain nombre de " tranches" dans la direction de l'écoulement de l'air. En ce qui concerne le séchoir, une " tranche" est définie par le volume délimité par deux claies et les parois du séchoir (figure 31).

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

Les flux de chaleurs et de masses qui sont fonctions des températures de différents milieux et de la teneur en eau du produit à sécher sont aussi fonctions du temps par accumulation progressive de chaleur et séchage du corps.

En considérant chaque " tranche" comme une entité indépendante des autres, il est possible de décrire l'évolution des transferts thermiques et massiques au sein du séchoir capteur au cours du temps.

L'application de l'analogie électrique aux transferts thermiques et massiques permet de déterminer à chaque instant à l'aide d'un calcul itératif la distribution de la température en divers points du séchoir et d'en déduire les teneurs en eau de l'air et du fruit au sein de chaque " tranche".

Rappelons que les températures sont assimilées à des potentiels, les flux thermiques et massiques à des intensités et les coefficients d'échanges à des résistances (figure 32).

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

Avant de dresser les schémas électriques du capteur et du séchoir ainsi que leurs systèmes d'équations, passant en revue les paramètres puis les hypothèses simplificatrices adaptées lors du calcul.

### **II - 3.1.1 Paramètres**

Nous définissons deux sortes de paramètres : les uns sont supposés demeurer constants ou n'engendrer aucune modification significative de la vitesse de séchage. Nous les appelons paramètres secondaires. Ce sont :

- Les grandeurs caractéristiques du dimensionnement : longueur, largeur et hauteur du séchoir et de l'insolateur.
- Les données géographiques caractéristiques du lieu où est implanté le séchoir.
- L'orientation du modèle.
- Les propriétés physiques des fruits et des matériaux constituant le modèle.

Les autres sont caractéristiques de la vitesse de séchage et sont appelés paramètres principaux. Nous étudions leur influence sur le cours du séchage. Ce sont les données météorologiques : puissance solaire captée par la couverture, vitesse du vent, température ambiante et débit d'air au sein du séchoir.

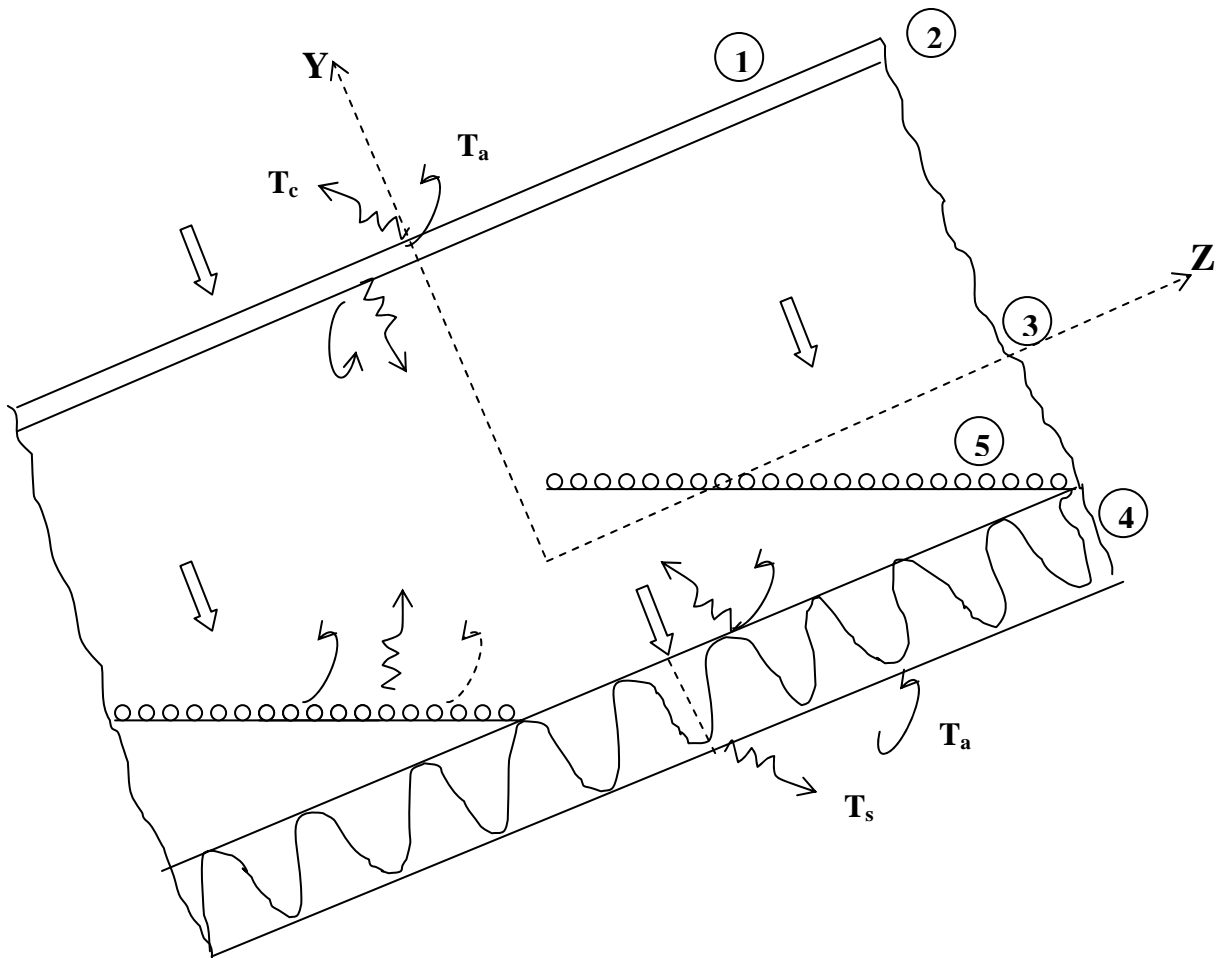
### II - 3.1.2 Hypothèses simplificatrices

Pour calculer la distribution de la température, et de la vitesse de séchage, nous considérons que :

- Ecoulement unidimensionnel (dans chaque partie du système de séchage).
- Les surfaces de l'absorbeur, de la couverture (vitre) et des fruits sont grises.
- Les propriétés physiques du fruit et des matériaux constituant le capteur et le séchoir sont constantes; celles de l'air varient avec la température et l'humidité.
- Les températures des différents milieux solides sont uniformes dans un plan perpendiculaire à l'écoulement.
- Les produits à sécher sont supposés **sphériques**.
- La température du **sol** est prise égale à la température **ambiante**.

#### **En outre, on négligera :**

- Les pertes thermiques dans les conduits de liaison ainsi que les pertes de charge.
- Les effets de bord et les pertes thermiques à la paroi latérale.
- Les phénomènes d'inertie thermique relatifs à l'air.
- L'absorption par l'air du rayonnement solaire (infra-rouge).
- La conduction claie-fruit.
- Le gradient de température le long de l'épaisseur de l'absorbeur.
- Les échanges radiatifs dus aux parois du séchoir.



① Milieu ambiant.

② Couverture.

③ Air de séchage.

④ Isolant.

⑤ Fruit.

↗ → Puissance échangée par rayonnement.

↻ → Puissance cédée par convection.

→ → Puissance incidente.

--- → Puissance échangée par conduction.

↖ → Chaleur perdue par le fruit par évaporation.

Fig31- représentation schématique des transferts thermiques et massiques cas du séchoir

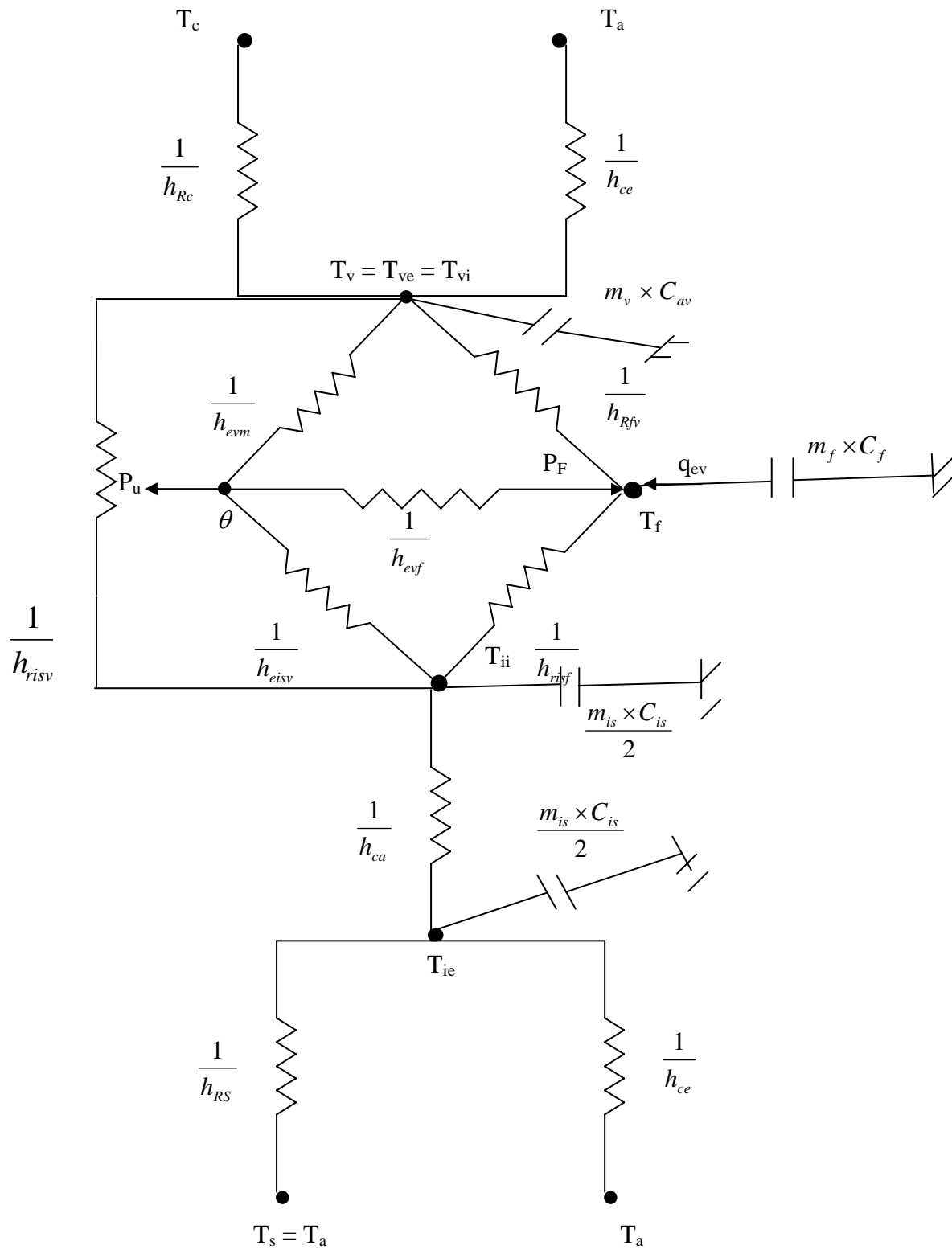


Fig 32- schéma électrique équivalent au transfert thermique et massique dans une tranche de séchoir direct.

## II - 3.2 Equations de résolution

### II - 3.2.1 Cas du séchoir

D'après le premier principe de la thermodynamique [23] on a :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_s \quad (8)$$

$\varphi_e$  : Flux entrant.

$\varphi_g$  : Flux généré.

$\varphi_{st}$  : Flux stocké.

$\varphi_s$  : flux sortant.

Dans notre cas :  $\varphi_g = 0$ . (9)

$$\varphi_e = -\lambda \times S \times \frac{\delta T}{\delta x}$$

$$\varphi_s = -\lambda \times S \times \frac{\delta T}{\delta x} \Big|_{x+dx} \quad (10,11,12)$$

$$\varphi_{st} = \rho \times V \times C \times \frac{\delta T}{\delta t}$$

$\lambda$  : Coefficient de transfert thermique.

$\rho$  : Masse volumique de l'élément de surface.

$V$  : Volume de l'élément de surface.

$C$  : Chaleur massique de l'élément de surface.

En appliquant cette loi et celle de Kirchhoff sur chaque nœud on aura le système d'équations suivant :

- **Au niveau de la couverture :**

$$m_v \times C_v \times \frac{dT_v}{dt} = h_{rc} \times S_p \times (T_c - T_v) + h_{ce} \times S_p \times (T_a - T_v) + h_{rfv} \times S_p \times (T_f - T_v) + h_{evm} \times S_p \times (\theta_{(j)} - T_v) + h_{risv} \times S_p \times (T_{ii} - T_v) + P_v.$$

- **Au niveau de l'air asséchant :**

$$Q \times C_p \times (\theta_{(j)} - \theta_{(j-1)}) = h_{eiv} \times S_p \times (T_{ii} - \theta_{(j)}) + h_{evm} \times S_p \times (T_v - \theta_{(j)}) + h_{evf} \times S \times (T_f - \theta_{(j)})$$

- **Au niveau du fruit :**

$$m_f \times C_f \times \frac{dT_f}{dt} = h_{rfv} \times S_p \times (T_v - T_f) + h_{evf} \times S \times (\theta_{(j)} - T_f) + h_{risf} \times S_p \times (T_{ii} - T_f) + P_f - q_{ev}$$

- **Au niveau de l'isolant :**

a- La face intérieure de l'isolant :

$$0.5 \times m_{is} \times C_{is} \times \frac{dT_{ii}}{dt} = h_{risf} \times S_p \times (T_f - T_{ii}) + h_{eiv} \times S_p \times (\theta_{(j)} - T_{ii}) + h_{ca} \times S_p \times (T_{ie} - T_{ii}) + h_{risv} \times S_p \times (T_v - T_{ii})$$

b- la face extérieure de l'isolant :

$$0.5 \times m_{is} \times C_{is} \times \frac{dT_{ie}}{dt} = h_{ca} \times S_p \times (T_{ii} - T_{ie}) + (h_{rs} + h_{ce}) \times S_p \times (T_a - T_{ie})$$

$$\text{avec : } q_{ev} = L_v \times \frac{dX}{dt} \times m_f$$

$$S_p = \Delta x \times L \text{ arg}$$

$S$  = Surface totale des fruits.

$m_v, m_i$  : représentent respectivement la masse équivalente à une " tranche" de couverture et d'isolant.

$m_v = \text{l'arg eur} \times \text{épaisseur} \times \text{la longueur de la tranche} \times \text{masse volumique du matériau dont est constituée la vitre.}$

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

$T_v, T_f, T_{ii}, T_{ie}$  et  $\theta$  .



## Nomenclature A :

Les notations utilisées dans cette étude sont les suivantes :

$C_v$  : Capacité calorifique massique de la couverture  $[J/kg.K]$

$C_{is}$  : Capacité calorifique massique de l'isolant  $[J/kg.K]$ .

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

$C_f$  : Capacité calorifique massique des fruits  $[J/kg.K]$ .

$dt$  : Pas de temps  $[s]$ .

$m_v$  : Masse équivalente d'une " tranche " de couverture  $[kg]$ .

$m_{is}$  : Masse équivalente d'une " tranche " d'isolant  $[kg]$ .

$m_f$  : Masse du fruit sur une claie  $[kg]$ .

$h_{ce}$  : Coefficient d'échange thermique par convection forcée entre la face externe de la couverture et le milieu ambiant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{rc}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la couverture et la voûte céleste  $[w/m^2 \cdot K]$

$h_{evm}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre la couverture et l'air asséchant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{rtv}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la couverture et les fruits  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{evf}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre les fruits et l'air asséchant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{ca}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans la vitre  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{risv}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et la vitre  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{risf}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le fruit  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{eiv}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre l'isolant et l'air asséchant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{rs}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face arrière du séchoir et le sol  $[w/m^2.K]$ .

$L_v$  : Chaleur massique d'évaporation d'eau libre [ $J/kg$ ].  
 $q_{ev}$  : Chaleur d'évaporation [ $w/m^2$ ].  
 $Q$  : débit massique de l'écoulement d'air [ $kg/s$ ].  
 $P_v$  : Puissance solaire effectivement absorbée par la couverture [ $w/m^2$ ].  
 $P_f$  : Puissance solaire effectivement absorbée par les fruits [ $w/m^2$ ].  
 $S$  : Surface d'échange fruit- air [ $m^2$ ].  
 $S_p$  : surface d'échange relative à une section du séchoir [ $m^2$ ].  
 $T_a$  : Température ambiante [K].  
 $T_c$  : Température équivalente de la voûte céleste [K].  
 $T_f$  : Température superficielle des fruits [K].  
 $T_{ii}$  : Température superficielle de la face interne de l'isolant [K].  
 $T_{ie}$  : Température superficielle de la face externe de l'isolant [K].  
 $T_v$  : Température superficielle de la couverture [K].  
 $T_s$  : Température du sol [K].  
 $\theta$  : Température de l'air asséchant.

## II - 3.2.2 : Cas du capteur (insolateur)

Notre choix s'est porté sur l'insolateur à air schématisé sur la figure 33.

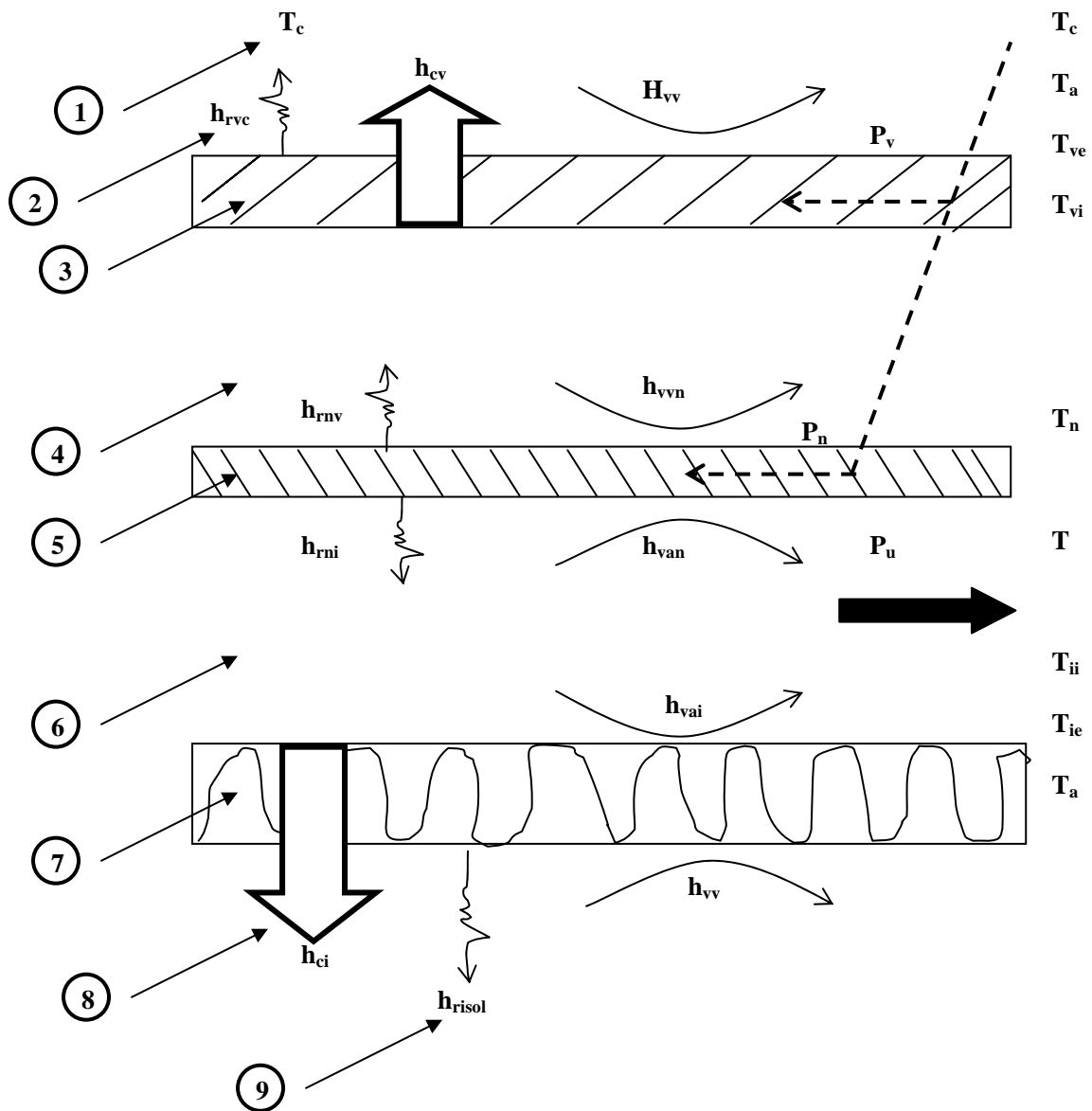
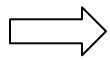


Fig 33 - Représentation schématique des transferts thermiques dans le cas du capteur.

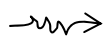
①	Voûte céleste.	⑦	Isolation arrière.
②	Milieu ambiant.	⑧	Milieu ambiant.
③	Vitre.	⑧	Sol
④	Conduit isolant.		
⑤	Absorbeur.		
⑥	Conduit utile.		



Conduction.



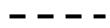
Convection.



Rayonnement.



Puissance utile.



Radiation

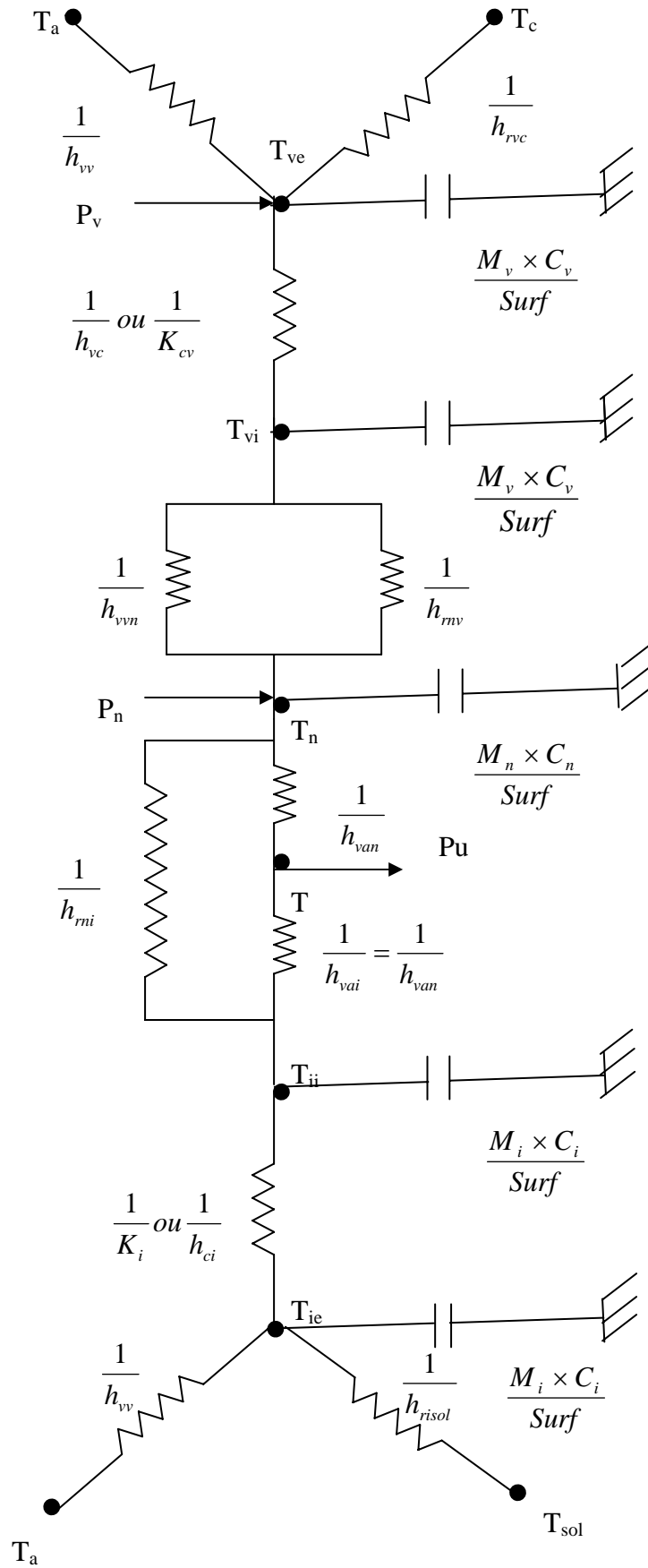


Fig 34 - Schéma électrique équivalent au transfert de chaleur dans une tranche du capteur.

Dans la section d'indice "j", l'application de la loi d'Ohm au réseau électrique conduit aux équations suivantes :

- **Au niveau de la face extérieure de la vitre :**

$$\frac{M_v \times C_v}{Surf} \left( \frac{dT_{ve}}{dt} \right) = \left( \frac{P_v}{2} \right) + h_{rvc} (T_c - T_{ve}) + h_{vv} (T_a - T_{ve}) + h_{vc} (T_{vi} - T_{ve})$$

- **Au niveau de la face intérieure de la vitre :**

$$\frac{M_v \times C_v}{Surf} \left( \frac{dT_{vi}}{dt} \right) = \left( \frac{P_v}{2} \right) + h_{cv} (T_{ve} - T_{vi}) + h_{rvn} (T_n - T_{vi}) + h_{vvn} (T_n - T_{vi})$$

- **Au niveau de l'absorbeur :**

$$\frac{M_n \times C_n}{Surf} \left( \frac{dT_n}{dt} \right) = h_{mv} (T_{vi} - T_n) + h_{vvn} (T_{vi} - T_n) + h_{van} (T_{(j-1)} - T_n) + h_{mi} (T_{ii} - T_n) + P_n$$

- **niveau de la face intérieure de l'isolant :**

$$\frac{M_i \times C_i}{Surf} \left( \frac{dT_{ii}}{dt} \right) = h_{mi} (T_n - T_{ii}) + h_{van} (T_{(j-1)} - T_{ii}) + h_{ci} (T_{ie} - T_{ii})$$

- **niveau de la face extérieure de l'isolant :**

$$\frac{M_i \times C_i}{Surf} \left( \frac{dT_{ie}}{dt} \right) = h_{ci} (T_{ii} - T_{ie}) + h_{risol} (T_{sol} - T_{ie}) + h_{vv} (T_a - T_{ie})$$

- **niveau du fluide caloporteur :**

$$Q \times C_p \times (T_{(j)} - T_{(j-1)}) = Surf \times h_{van} \times (T_n + T_{ii} - 2 \times T_{(j-1)})$$

Remarque :

$$\diamond M_v = \frac{m_v}{2} \quad \text{et} \quad M_i = \frac{m_i}{2}$$

- Un système d'équations de six inconnues est obtenu, ces inconnues sont :  $T_{ve}$ ,  $T_{vi}$ ,  $T_n$ ,  $T_{ii}$ ,  $T_{ie}$  et  $T$ .

## **Nomenclature B :**

Surf : Surface de la tranche du capteur  $[m^2]$ .

$C_p$  : Capacité calorifique massique du fluide caloporteur  $[J/kg.K]$ .

$C_v$  : Capacité calorifique massique de la vitre  $[J/kg.K]$ .

$C_n$  : Capacité calorifique massique de l'absorbeur  $[J/kg.K]$ .

$C_i$  : Capacité calorifique massique de l'isolant  $[J/kg.K]$ .

$h_{vv}$  : Coefficient d'échange thermique entre la vitre et l'air ambiant et éventuellement entre l'isolant et l'air ambiant (dû au vent)  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{van}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide et l'absorbeur  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{vai}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide et l'isolant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{cv}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans la vitre  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{vvn}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{ci}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans l'isolant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{vc}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{vvn}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{mi}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$h_{risol}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol  $[w/m^2 \cdot K]$ .

$Q$  : débit massique du fluide caloporteur  $[kg/s]$ .

$M_v$  : moitié de la masse de la vitre pour la section de longueur  $\Delta X$   $[kg]$ .

$M_i$  : moitié de la masse de l'isolant pour la section de longueur  $\Delta X$   $[kg]$ .

$M_n$  : Masse de l'absorbeur pour la section de longueur  $\Delta X$   $[kg]$ .

$P_v$  : Puissance absorbée par  $1m^2$  de vitre  $[w/m^2]$ .

$P_n$  : Puissance captée par  $1\text{m}^2$  d'absorbeur [ $\text{w}/\text{m}^2$ ].

$T$  : température du fluide caloporteur [K].

$T_a$  : Température ambiante [K].

$T_c$  : Température de la voûte céleste [K].

$T_{ve}$  : Température de la face extérieure de la vitre [K].

$T_{vi}$  : Température de la face intérieure de la vitre [K].

$T_n$  : Température de l'absorbeur [K].

$T_{ii}$  : Température de la face interne de l'isolant [K].

$T_{ie}$  : Température de la face externe de l'isolant [K].



## II - 3.3 Etude numérique des équations du capteur

### II - 3.3.1 La discrétisation des équations au niveau du capteur

- **Au niveau de la vitre :**

- Face extérieure :

$$\frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} (T_{ve}^{t+\Delta t}(j) - T_{ve}^t(j)) = \left(\frac{P}{2}\right) + h_{rvc} (T_c - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) + h_{vv} (T_a - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) + h_{vc} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_{ve}^{t+\Delta t}(j))$$

- Face intérieure :

$$\frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^t(j)) = \left(\frac{P_v}{2}\right) + h_{cv} (T_{ve}^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{rvn} (T_n^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{vvn} (T_n^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j))$$

- **Au niveau de l'absorbeur :**

$$\frac{M_n \times C_n}{\Delta t \times Surf} (T_n^{t+\Delta t}(j) - T_n^t(j)) = h_{rvn} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_n^{t+\Delta t}(j)) + h_{vvn} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_n^{t+\Delta t}(j)) + h_{van} (T^{t+\Delta t}(j-1) - T_n^{t+\Delta t}(j)) + h_{mi} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_n^{t+\Delta t}(j)) + P_n$$

- **Au niveau de l'isolant :**

- Face intérieure de l'isolant :

$$\frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^t(j)) = h_{mi} (T_n^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j)) + h_{van} (T^{t+\Delta t}(j-1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j)) + h_{ci} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j))$$

- Face extérieure de l'isolant :

$$\frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j) - T_{ie}^t(j)) = h_{ci} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_{ie}^{t+\Delta t}(j)) + h_{risol} (T_{sol} - T_{ie}^{t+\Delta t}(j)) + h_{vv} (T_a - T_{ie}^{t+\Delta t}(j))$$

- **Au niveau de l'air :**

$$\dot{m} \times C_p \times (T^{t+\Delta t}(j) - T^{t+\Delta t}(j-1)) = h_{van} \times Surf \times (T_n^{t+\Delta t}(j) + T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - 2T^{t+\Delta t}(j-1))$$

**N.B :**  $Surf = L \arg \times \Delta X$

$\Delta X$  : Longueur de la tranche.

Un système d'équation de six inconnues est obtenu, il peut se mettre sous la forme d'une matrice qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{ve}^{t+\Delta t}(j) \\ T_{vi}^{t+\Delta t}(j) \\ T_n^{t+\Delta t}(j) \\ T_{ii}^{t+\Delta t}(j) \\ T_{ie}^{t+\Delta t}(j) \\ T^{t+\Delta t}(j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = \frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} + h_{rvc} + h_{vv} + h_{cv}$$

$$C_{12} = -h_{cv} = \frac{-\lambda_v}{e_v}$$

$$C_{13} = 0$$

$$C_{14} = 0$$

$$C_{15} = 0$$

$$C_{16} = 0$$

$$D_1 = \frac{P_v}{2} + h_{rvc} \times T_c + h_{vv} \times T_a + \frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} \times T_{ve}^t(j)$$

$$C_{21} = -h_{cv}$$

$$C_{22} = \frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} + h_{rvn} + h_{vvn} + h_{cv}$$

$$C_{23} = -(h_{rvn} + h_{vvn})$$

$$C_{24} = 0$$

$$C_{25} = 0$$

$$C_{26} = 0$$

$$D_2 = \frac{M_v \times C_v}{\Delta t \times Surf} \times T_{vi}^t(j) + \frac{P_v}{2}$$

$$C_{31} = 0$$

$$C_{32} = C_{23} = -(h_{rvn} + h_{vvn})$$

$$C_{33} = \frac{M_n \times C_n}{\Delta t \times Surf} + h_{rvn} + h_{vvn} + h_{mi} + h_{van}$$

$$C_{34} = -h_{mi}$$

$$C_{35} = 0$$

$$C_{36} = 0$$

$$D_3 = P_n + h_{van} T^{t+\Delta t}(j-1) + \frac{M_n \times C_n}{\Delta t \times Surf} \times T_n^t(j)$$

$$C_{41} = 0$$

$$C_{42} = 0$$

$$C_{43} = C_{34} = -h_{mi}$$

$$C_{44} = \frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} + h_{mi} + h_{ci} + h_{van}$$

$$C_{45} = -h_{ci} = -\frac{\lambda_i}{e_i}$$

$$C_{46} = 0$$

$$D_4 = \frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} \times T_{ii}^t(j) + h_{van} \times T^{t+\Delta t}(j-1)$$

$$C_{51} = 0$$

$$C_{52} = 0$$

$$C_{53} = 0$$

$$C_{54} = C_{45}$$

$$C_{55} = \frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} + h_{ci} + h_{riSol} + h_{vv}$$

$$C_{56} = 0$$

$$D_5 = \frac{M_i \times C_i}{\Delta t \times Surf} \times T_{ie}^t(j) + h_{riSol} \times T_{Sol} + h_{vv} \times T_a$$

$$C_{61} = 0$$

$$C_{62} = 0$$

$$C_{63} = -h_{van} \times Surf$$

$$C_{64} = C_{63}$$

$$C_{65} = 0$$

$$C_{66} = \dot{m} \times C_p$$

$$D_6 = (C_{66} + 2C_{63}) \times T^{t+\Delta t}(j-1)$$

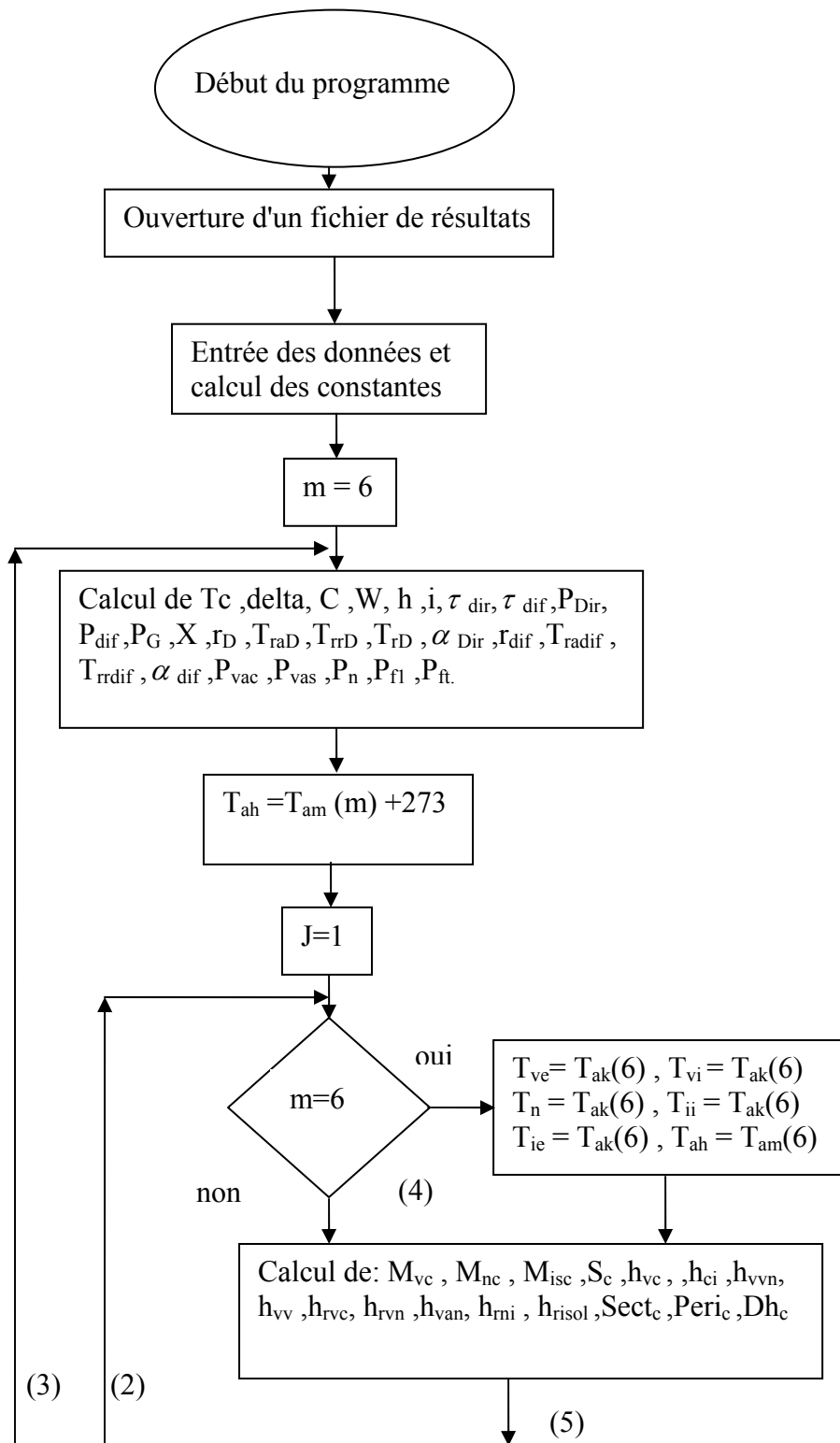
A l'instant initial, tous les éléments constituant le capteur sont à la température ambiante.

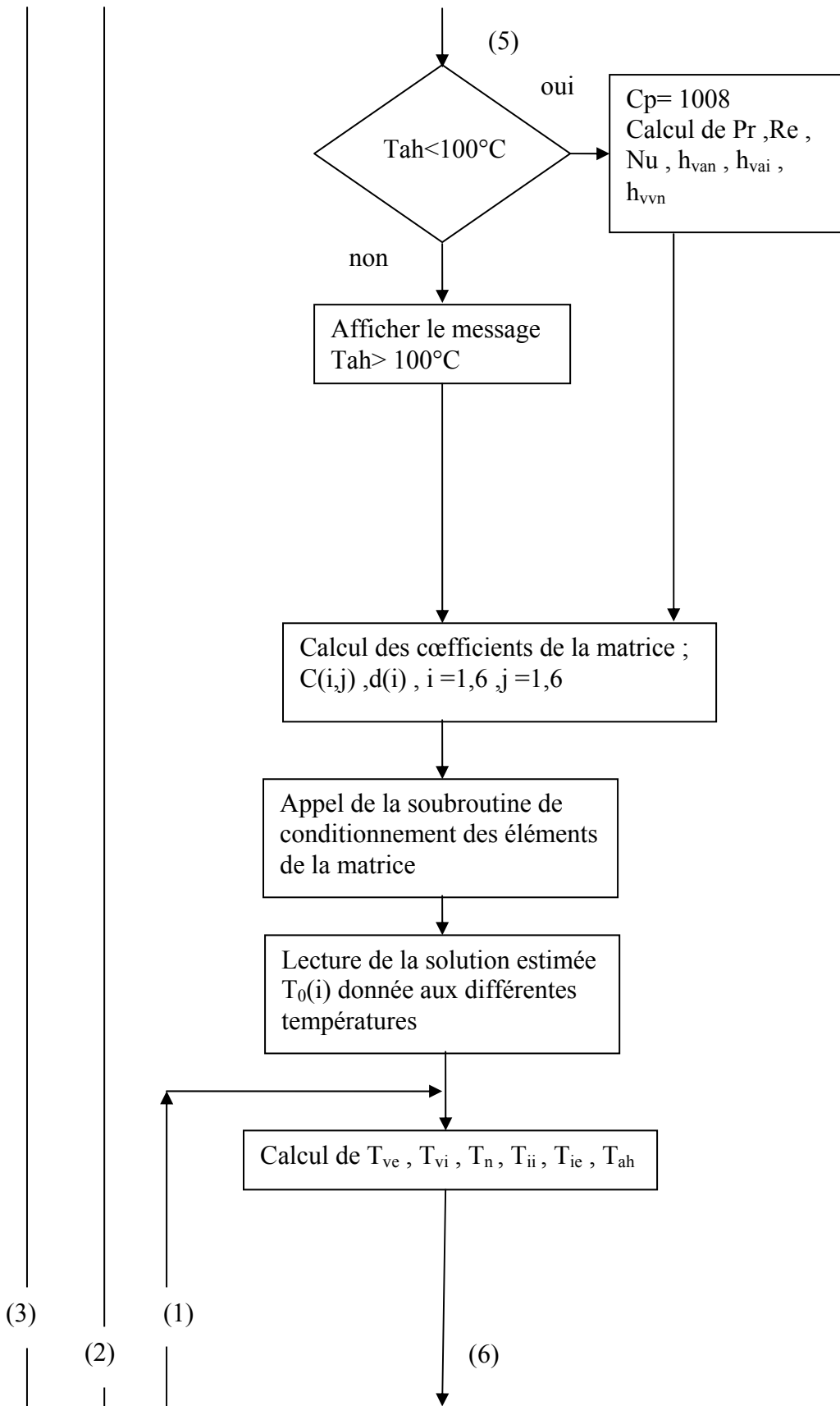
Pour la première tranche (j=1) les températures du capteur sont celles de l'air ambiant. Ensuite, pour chaque tranche du capteur et pour chaque pas de temps, un système d'équation est obtenu. Sa résolution permet de calculer les températures du capteur et essentiellement la température de sortie de l'air du capteur qui est prise comme température d'entrée de l'air chauffé au séchoir.

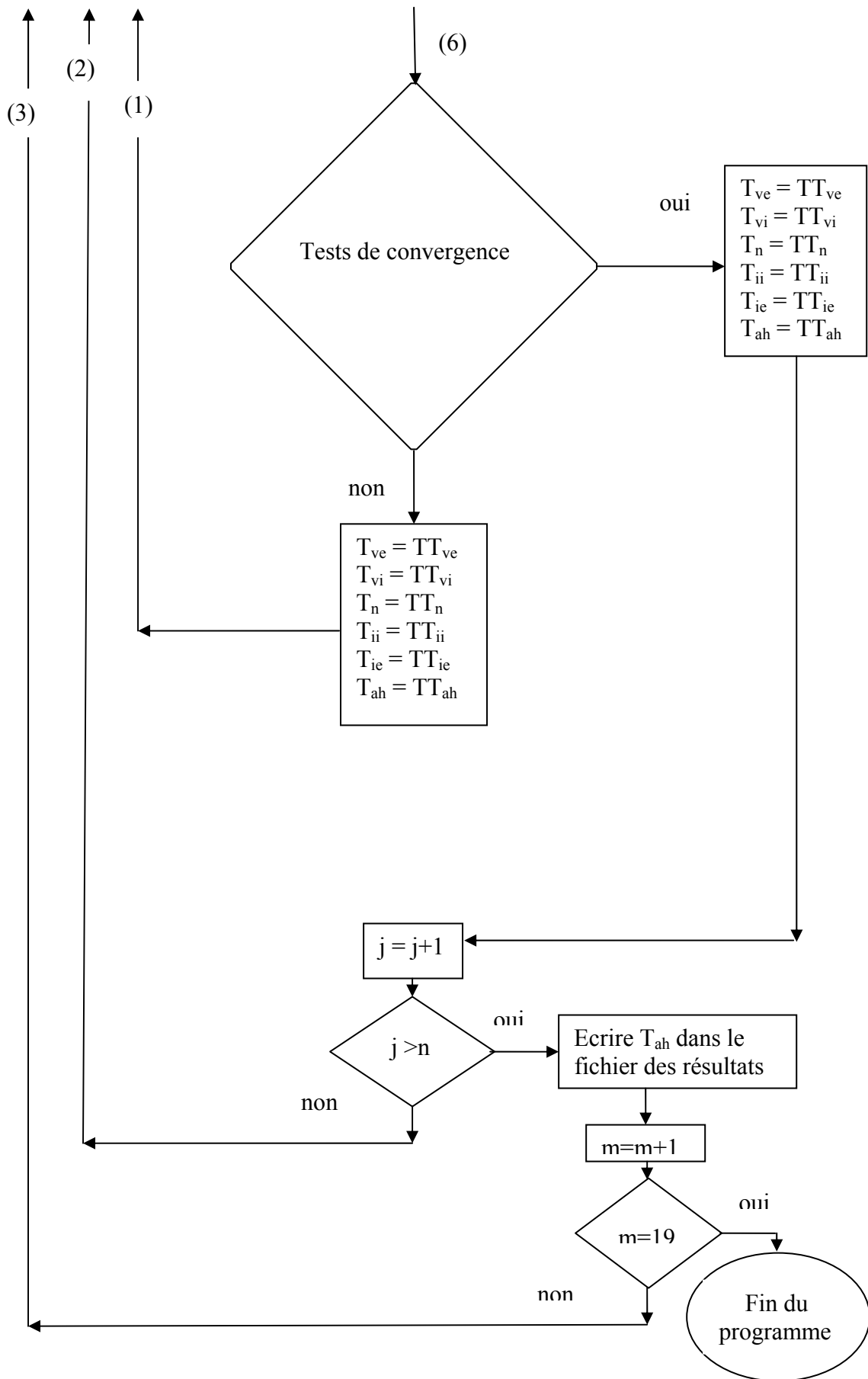
Pour la résolution du système d'équations, la méthode de **Gauss Seidel** est utilisée (voir l'annexe A, pour l'algorithme de la méthode) à cause des avantages qu'elle présente, qui sont comme suit :

- ✓ C'est une méthode itérative dérivée de la méthode de Newton Raphson; qui s'applique dans le cas où on a une matrice carrée.
- ✓ elle est aussi utilisée dans le système d'équations linéaires et non linéaires (la méthode de Jordan uniquement pour les linéaires).
- ✓ elle est aussi appliquée pour un certain nombre d'équations (celle de Jordan pour un grand nombre d'équation).
- ✓ Si la matrice est composée de plusieurs éléments ayant une valeur nulle, ce qui correspond à notre cas, la convergence des résultats est plus rapide.

## Organigramme du programme développé pour le calcul numérique du capteur







### II - 3.3.2 La discrétisation des équations au niveau du séchoir

- Au niveau de la couverture transparente :

$$\frac{m_v \times C_v}{\Delta t} (T_v^{t+\Delta t}(j) - T_v^t(j)) = h_{rc} \times S_p \times (T_c - T_v^{t+\Delta t}(j)) + h_{ce} \times S_p (T_a - T_v^{t+\Delta t}(j)) \\ + h_{rfv} \times S_p (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_v^{t+\Delta t}(j)) + h_{evm} \times S_p (\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_v^{t+\Delta t}(j)) + h_{risv} \times S_p (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_v^{t+\Delta t}(j)) + P_{vs}$$

- Au niveau de l'air :

$$Q \times C_p (\theta^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) = h_{eisv} \times S_p \times (T_{ii}^{t+\Delta t} - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) + h_{evm} \times S_p (T_v^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1)) \\ + h_{evf} \times S (T_f^{t+\Delta t}(j) - \theta^{t+\Delta t}(j-1))$$

- Au niveau du fruit :

$$\frac{m_f \times C_f}{\Delta t} (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_f^t(j)) = P_F - q_{ev} + h_{rfv} \times S_p \times (T_v^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j)) + h_{evf} \times S (\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_f^{t+\Delta t}(j)) \\ + h_{rff} \times S_p (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j))$$

- Au niveau de la face intérieure de l'isolant :

$$\frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^t(j)) = h_{risf} \times S_p \times (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j)) + h_{eisv} \times S_p (\theta^{t+\Delta t}(j-1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j)) \\ + h_{ca} \times S_p (T_{ie}^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j)) + h_{risv} \times S_p \times (T_v^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j))$$

- Au niveau de la face extérieure de l'isolant :

$$\frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j) - T_{ie}^t(j)) = h_{ca} \times S_p \times (T_{ii}^{t+\Delta t}(j) - T_{ie}^{t+\Delta t}(j)) + (h_{rs} + h_{ce}) \times S_p \times (T_a - T_{ie}^{t+\Delta t}(j))$$

**Avec :**

**SP : Surface d'une tranche de séchoir**

$$S_p = \text{long} \times \text{larg}$$

S : Surface des fruits sur la claie

$$S = 3.14 \times D^2 \times N_e$$

Ne : Nombre de fruit sur la claie.



Un système de cinq inconnues est ainsi obtenu, il peut se mettre sous la forme d'une matrice qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_v(j) \\ \theta(j) \\ T_f(j) \\ T_{ii}(j) \\ T_{ie}(j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix}$$

Et on aura :

$$A_{11} = \frac{m_v \times C_v}{\Delta t} + (h_{rc} + h_{ce} + h_{rfv} + h_{evm} + h_{risv}) \times S_p$$

$$A_{12} = 0.$$

$$A_{13} = -h_{rfv} \times S_p$$

$$A_{14} = -h_{risv} \times S_p$$

$$\beta_1 = \frac{m_v \times C_v}{\Delta t} \times T_v^t(j) + (h_{rc} \times T_c + h_{ce} \times T_a + h_{evm} \times \theta^{t+\Delta t}(j-1)) \times S_p + P_v$$

$$A_{21} = -h_{evm} \times S_p$$

$$A_{22} = Q \times C_p$$

$$A_{23} = -h_{evf} \times S$$

$$A_{24} = -h_{eivsv} \times S_p$$

$$A_{25} = 0$$

$$\beta_2 = (Q \times C_p - (h_{eivsv} + h_{evm}) \times S_p - h_{evf} \times S) \times \theta^{t+\Delta t}(j-1)$$

$$A_{31} = -h_{rfv} \times S_p$$

$$A_{32} = 0$$

$$A_{33} = \frac{m_f \times C_f}{\Delta t} + (h_{rfv} + h_{risf}) \times S_p + h_{evf} \times S$$

$$A_{34} = -h_{risf} \times S_p$$

$$A_{35} = 0$$

$$\beta_3 = \frac{m_f \times C_f}{\Delta t} \times T_f^t(j) + h_{evf} \times S \times \theta^{t+\Delta t}(j-1) + P_F - q_{ev}$$

$$A_{41} = -h_{risv} \times S_p$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{risf} \times S_p$$

$$A_{44} = \frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} + (h_{risf} + h_{eiv} + h_{ca} + h_{risv}) \times S_p$$

$$A_{45} = -h_{ca} \times S_p$$

$$\beta_4 = \frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} \times T_{ii}^t(j) + h_{eiv} \times S_p \times \theta^{t+\Delta t}(j-1)$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{ca} \times S_p$$

$$A_{55} = \frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} + (h_{ca} + h_{rs} + h_{ce}) \times S_p$$

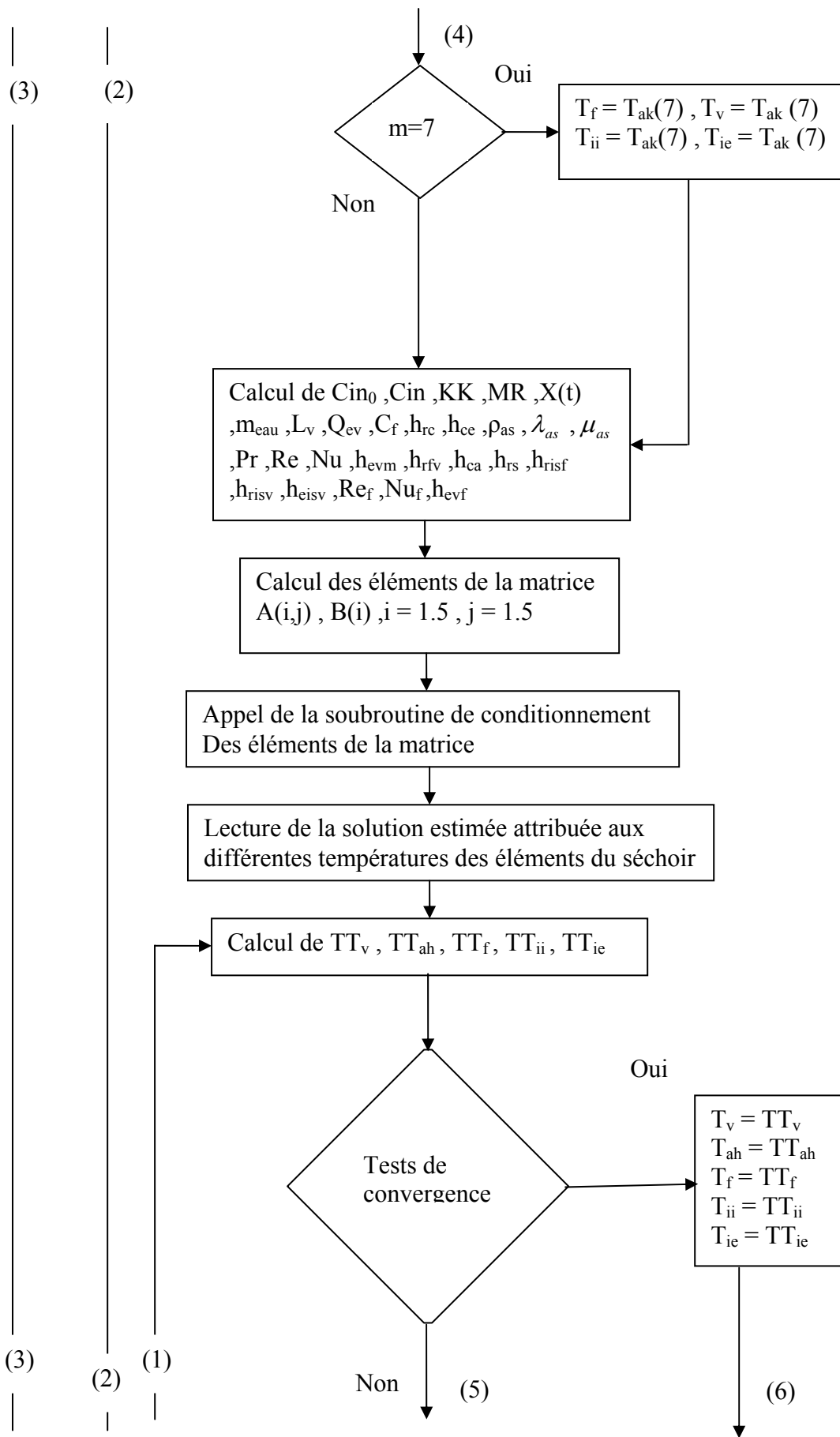
$$\beta_5 = \frac{m_{is} \times C_{is}}{2 \times \Delta t} \times t_{ie}^t(j) + (h_{rs} + h_{ce}) \times S_p \times T_a$$

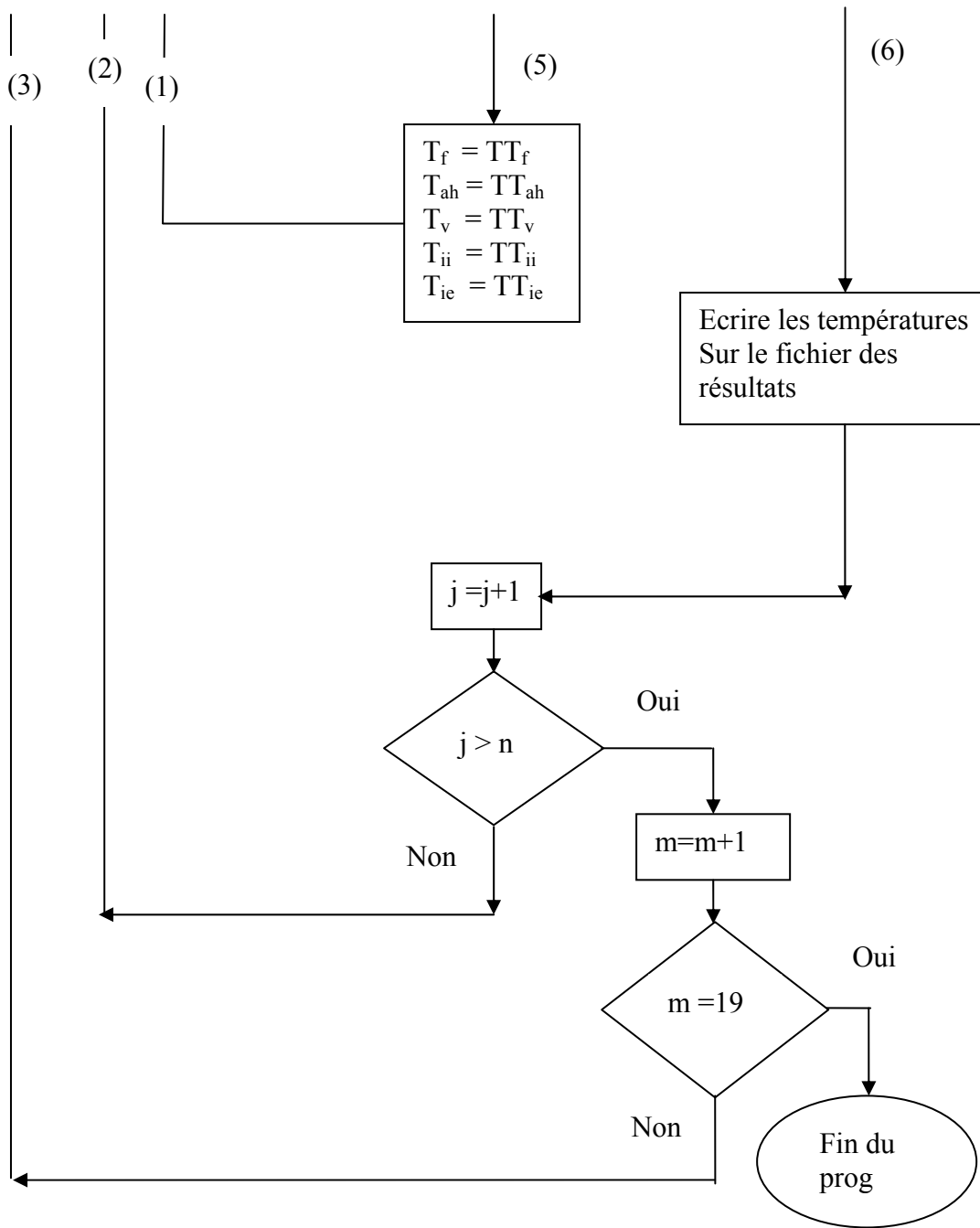
Comme pour le capteur, à l'instant initial, tous les éléments constituant le séchoir ainsi que le produit à sécher sont à la température ambiante. Pour la première claie du séchoir, sa température est celle de l'air chauffé à l'entrée du séchoir. Ensuite, pour chaque tranche du séchoir et pour chaque pas de temps, un système d'équations est obtenu. La résolution permet de calculer les températures des différents éléments constituant le séchoir, la température du fruit ainsi que celle de l'air. La cinétique utilisée permet de calculer la teneur en eau du produit et l'énergie d'évaporation. En ce qui concerne le calcul des coefficients de transfert, il est effectué pour chaque pas de temps et pour chaque tranche. Tous cela est représenté dans l'organigramme du programme développé pour le calcul numérique.

Pour la résolution du système d'équations, la méthode itérative de Gauss Seidel pour ses innombrables avantages est adaptée.

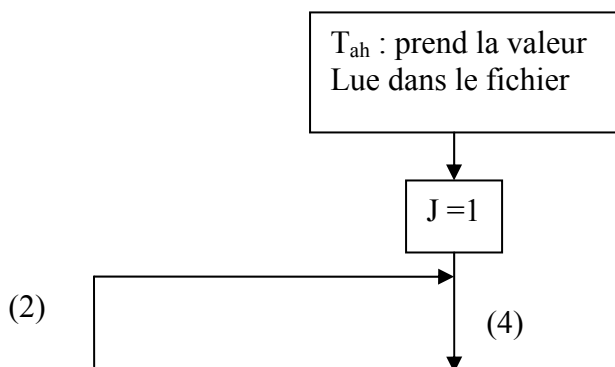
**N.B.** : Dans l'organigramme qui suit  $\theta = T_{ah}$ .



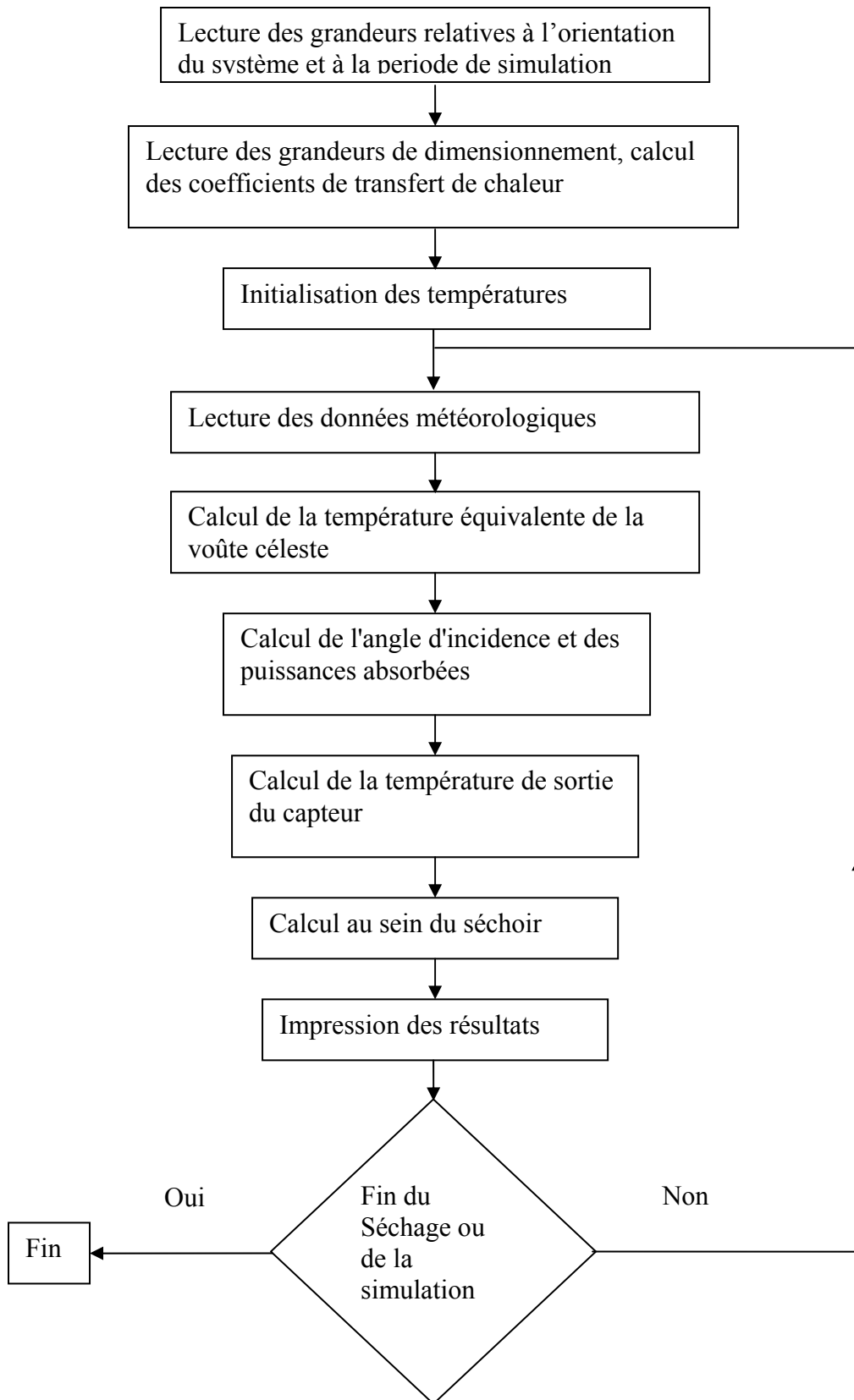




- Sans appoint de chauffage



## Organigramme général du système (capteur – séchoir)



## II - 4 Recherche bibliographique des coefficients de transfert thermique

### II - 4.1 Au niveau du séchoir

#### II - 4.1.1 Calcul des coefficients de transfert thermiques entre la couverture et l'extérieure

Il s'établit deux échanges thermiques; l'un par rayonnement et l'autre par convection forcée.

- L'échange par rayonnement avec la voûte céleste est caractérisé par le coefficient  $h_{RC}$ .

$$h_{rc} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot (T_c + T_v) \cdot (T_c^2 + T_v^2). \quad (13)$$

$T_c$  est la température équivalente de la voûte céleste en Kelvin. Elle est inaccessible à la mesure.

Certains auteurs considèrent que la température  $T_c$  est égale à la température ambiante  $T_a$  diminuée de 6 ou 7 [K], parfois même de 12[K].

$$T_c = T_a - (6,7 \text{ ou } 12) \quad (14) \quad [10]$$

D'autres utilisent

$$T_c^4 = T_a^4 \cdot (1 - 0,261 \text{Exp}(-7,77 \cdot 10^{-4} \cdot T_a)) \cdot \left(\frac{9}{5} T_a - 273\right)^2 \quad (15) \quad [10]$$

Ou encore

$$T_c = 0,0552 \cdot (T_a)^{1,5} \quad (16) \quad [5]$$

C'est cette expression que nous adapterons dans la suite des calculs qui sera adaptée.

L'échange par convection forcée (dû au vent) est caractérisé par le coefficient  $h_{vv}$ .

$$h_{vv} = 5,67 + 3,86 \cdot V \quad [\text{w/ m}^2 \text{ K}]. \quad (17) \quad [10]$$

$V$  est la vitesse du vent [m/s].

## II – 4.1.2 Calcul du coefficient de convection entre l'air asséchant et la vitre

Au sein du séchoir comme du capteur, l'air circule par convection forcée. Le coefficient par convection au sein du séchoir ou du capteur peut être obtenu si l'on connaît le nombre de Nusselt "Nu"

$$H_{evm} = f(Nu) \quad \text{et} \quad Nu = f(Re, Pr) \quad (18)$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (19) \quad [23]$$

$$h_{evm} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{D_H} \quad (20)$$

$$D_H = \frac{4 \cdot S_H}{P_H} \quad (21)$$

$D_H$  étant la longueur caractéristique (diamètre hydraulique).

$S_H$  la surface de la section de passage du fluide.

$P_H$  le périmètre mouillé.

$$Pr = \frac{\mu_{ah} \cdot C_p}{\lambda_{air}} \quad (22)$$

$$Re = \frac{U \cdot D_H \cdot \rho_{ah}}{\mu_{ah}} \quad (23)$$

$U$  étant la vitesse moyenne du fluide [m/s].

$\rho_{ah}$  La masse volumique de l'air chaud [kg/m<sup>3</sup>].

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

$C_p$  chaleur massique de l'air [w/kg.K].

$\mu_{ah}$  Viscosité dynamique [kg/m.s].

## II – 4.1.3 Calcul du coefficient de convection entre l'air asséchant et les fruits

Il s'agit d'un échange par convection forcée. Nous négligeons l'influence des claies sur l'écoulement. Nous assimilons les fruits à des sphères disposées sur les claies dont la longueur caractéristique est prise égale au diamètre moyen du fruit ( $D_f$ )



$$h_{evf} = \frac{Nu_D \cdot \lambda_{air}}{D_f} \quad (24)$$

$$Nu_D = 2 + 0,03 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re_D^{0,54} + 0,35 \cdot Pr^{0,36} \cdot Re_D^{0,58} \quad (25) \quad [24]$$

$$Re_D = \frac{U_f \cdot D_f \cdot \rho_{ah}}{\mu_{ah}} \quad (26)$$

$U_f$  étant la vitesse de l'air au niveau des fruits [m/s].

$$U_f = \frac{U}{Po} \quad \text{et} \quad Po = \frac{V_T - V_F}{V_T} \quad (27) \quad [13]$$

$$V_T = \text{Long} \cdot \text{Larg} \cdot D_f$$

$$V_F = Ne \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (28)$$

$U$  étant la vitesse de l'air à l'entrée du séchoir [m/s].

$Po$  la porosité (créée par la juxtaposition des fruits les uns à côté des autres).

$Ne$  le nombre de fruits sur la claie.

$$Ne = \frac{m_f}{m_s} \quad \text{et} \quad Ne \in \mathbb{N} \quad (29)$$

$m_f$  la masse du produit sur la claie [kg].

$m_s$  la masse d'un seul fruit [kg].

## II – 4.1.4 Calcul du coefficient de transfert thermique par conduction

C'est à travers l'isolant :

$$h_{ca} = \frac{\lambda_{iso}}{ep_{iso}} \quad (30)$$

$ep_{iso}$  épaisseur de l'isolant.

## II – 4.1.5 Calcul du coefficient de rayonnement entre l'isolant et le sol

$$h_{rs} = \sigma \cdot \varepsilon_{is} \cdot (T_{ie} + T_{sol}) \cdot (T_{ie}^2 + T_{sol}^2) \quad (31) \quad [25]$$

Avec  $T_{sol} = T_a$ .

#### II – 4.1.6 Calcul du coefficient de rayonnement entre le fruit et la vitre

$$h_{rfv} = \frac{\sigma \cdot (T_v + T_f) \cdot (T_v^2 + T_f^2)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f}} \quad (32) \quad [13]$$

#### II – 4.1.7 Calcul du coefficient de rayonnement entre le fruit et la paroi inférieure

$$h_{risf} = \frac{\sigma \cdot (T_{is} + T_f) \cdot (T_{is}^2 + T_f^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{is}}{\varepsilon_{is}} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f}} \quad (33) \quad [13], [24]$$

#### II – 4.2 Au niveau du capteur

##### II – 4.2.1 Calcul des coefficients de conduction à travers la vitre et l'isolant

$$k_v = \frac{\lambda_v}{ep_v} \quad (34) \quad [3]$$

$$k_{is} = \frac{\lambda_{is}}{ep_{is}} \quad (35)$$

##### II – 4.2.2 Calcul du coefficient de convection (fluide / absorbeur)

Les mêmes expressions que précédemment avec

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (36) \quad (\text{formule de Tan et Chartes}) \quad [5]$$

##### II – 4.2.3 Calcul du coefficient de rayonnement entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{rm} = \frac{\sigma \cdot (T_{vi} + T_n) \cdot (T_{vi}^2 + T_n^2)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_n}{\varepsilon_n}} \quad (37) \quad [5]$$

Le même raisonnement pour les autres coefficients (voir séchoir).

## II – 4.3 Calcul des puissances solaires incidentes

Le rayonnement solaire parvient au séchoir et au capteur en trois endroits différents :

- Au niveau de la couverture transparente.
- Au niveau de la face arrière.
- Au niveau des faces latérales.

L'apport énergétique éventuel des radiations solaires captées par les faces latérales (parties externes) du séchoir et du capteur est négligé.

### II – 4.3.1 Calcul des $P_v$ et $P_n$ [5]

Ce calcul dépend de la journée dans laquelle le capteur est utilisé, de l'angle d'incidence et du lieu où se trouve ce dernier, ainsi que d'autres paramètres qui seront définis ultérieurement.

$$P_v = P_{dir} \cdot \alpha_{dir,v} + P_{diff} \cdot \alpha_{dif,v} \quad (38)$$

$$P_n = \alpha_n \cdot \frac{P_{dir} \cdot \tau_{dir} + P_{dif} \cdot \tau_{dif}}{1 - (1 - \alpha_n) \cdot \rho_{dif}} \quad (39)$$

$\alpha_n$  étant l'absorptivité de l'absorbeur.

$\tau_{dir}$  la transmittivité totale directionnelle.

$\tau_{dif}$  la transmittivité totale hémisphérique.

$\rho_{dif}$  la réflectivité hémisphérique du vitrage.

Soit  $P_G$  l'énergie totale incidente sur  $1\text{m}^2$  de la couverture transparente. Elle se compose de deux termes :

- Du rayonnement direct reçu par la couverture  $P_{dir}$ .
- Du rayonnement diffus reçu par la couverture  $P_{dif}$ .

$$P_G = P_{dir} + P_{dif} \quad (40)$$

La puissance  $P_{dir}$  du rayonnement direct incident sur la couverture inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle ( $B$ ), se déduit de la puissance ( $P_{dirH}$ ) du rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

✓ **Calcul du rayonnement direct:**

$$P_{dir} = P_{dir,H} \cdot \frac{\cos(i)}{\sin(h)} \quad (41) \quad [13]$$

$$P_{dir,H} = I_0 \cdot C \cdot \tau_{dir} \cdot \sin(h) \quad (42)$$

$$D'où \quad P_{dir} = I_0 \cdot C \cdot \tau_{dir} \cdot \cos(i) \quad (43)$$

$I_0$  est la puissance avec laquelle l'énergie solaire frappe une unité de surface d'air se trouvant à la limite extérieure de l'atmosphère, dans une direction normale au rayonnement solaire.

$$I_0 = 1353 \text{ [W.m}^{-2}\text{]}. \quad [26]$$

$$C = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot d}{365}\right) . \quad (44 .a)$$

i: l'angle d'incidence, la normale à la paroi fait un angle  $i$  avec les rayons solaires.

h: la hauteur du soleil.

C: le facteur de correction dû à la variation de la distance Terre - Soleil.

d: le numéro du jour dans l'année.

Ou

$$C = 1 + 0,034 \cos(30 \cdot (m - 1) + n) . \quad (44.b)$$

m: le numéro du mois.

n: numéro du jour dans le mois.

Il est impératif de remarquer que les angles dans les deux expressions précédentes sont exprimés en degré.

$$\tau_{dir} = A \cdot \text{Exp}\left(\frac{-B}{\sin(h)} \cdot \frac{P}{1000}\right) \quad (45) \quad [5], [10]$$

A et B sont deux constantes données par le tableau qui suit : [5]

	Conditions normales	Ciel pur	Zones industrielles
A	0.88	0.87	0.91
B	0.26	0.17	0.43

P étant la pression au niveau du sol exprimée en [mb], elle est évaluée généralement à 1000[mb].

$$\sin(h) = \cos(Z) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (46)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360}{365} (284 + d) = 23,45 \cdot \cos(30m + n - 202) \quad (47) \quad [5]$$

$\phi$  : la latitude du lieu.

$\delta$  : la déclinaison en degré ( $\delta > 0$  au printemps et en été;  $\delta < 0$  en automne et en hiver ).

$\omega$  : l'angle horaire ( $\omega < 0$  le matin ;  $\omega > 0$  l'après midi et  $\omega = 0$  au midi solaire vrai).

$$\cos(i) = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\beta) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\omega) - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\omega).$$

$\beta$  : L'angle entre le plan horizontale et le plan considéré ou l'inclinaison ( $\beta > 0$  si le plan regardant l'équateur).

$\alpha$  : L'angle entre le méridien local et la normale ( $\alpha = 0$  pour une surface regardant l'équateur et orientée au Sud et ainsi le troisième terme disparaît).

Notant qu'à la latitude  $\phi$ , avec  $\alpha = 0$  et  $\beta > 0$  (une surface orientée vers l'équateur et inclinée); cette surface se comporte vis-à-vis du rayonnement solaire comme une surface horizontale orientée vers l'équateur et située à la latitude ( $\phi - \beta$ ). [5]

Donc pour une telle surface :

$$\cos(i) = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta). \quad (48)$$

Pour Constantine  $\phi = 36,17^\circ$ . [27]

#### ✓ Calcul du rayonnement diffus: [5], [24]

Le flux diffus reçu par la surface d'un capteur se divise en deux:

- Flux diffus par la voûte céleste.
- Flux diffus par le sol.

$$P_{dif,C} + P_{dif,S} \quad [w/m^2].$$

$$P_{dif,C} = P_{dif,H} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (49)$$

$$P_{dif,S} = (P_{dir,H} + P_{dif,H}) \cdot a \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (50)$$

$P_{dif,h}$  : flux diffus reçu par un plan horizontal.

$a = 0,2$  en absence de la neige.

$a = 0,8$  en présence de la neige.

$$P_{dif,H} = I_0 \cdot C \cdot \sin(h) \cdot \tau_{dif} \quad [w/m^2]. \quad (51)$$

$$\tau_{dif} = 0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_{dir} \quad (52)$$

#### ✓ Calcul du coefficient d'absorption de la vitre: [5], [24]

On a le  $\alpha_{v,dir}$  qui est dû au rayonnement direct; et on a le  $\alpha_{v,dif}$  qui est dû au rayonnement diffus.

- Le coefficient d'absorption dû au rayonnement direct

Nous savons que :

$$(\alpha + \tau + \rho = 1) \Rightarrow (\alpha = 1 - \tau - \rho) \quad (53)$$

D'où :

$$\alpha_{v,dir} = 1 - \tau_{dir} - \rho_1 \quad (54) \quad [5]$$

$\rho_1$  : Réflectivité au flux direct.

$\rho_2$  : Réflectivité au flux diffus.

L'utilisation de la théorie électromagnétique classique nous amène à :

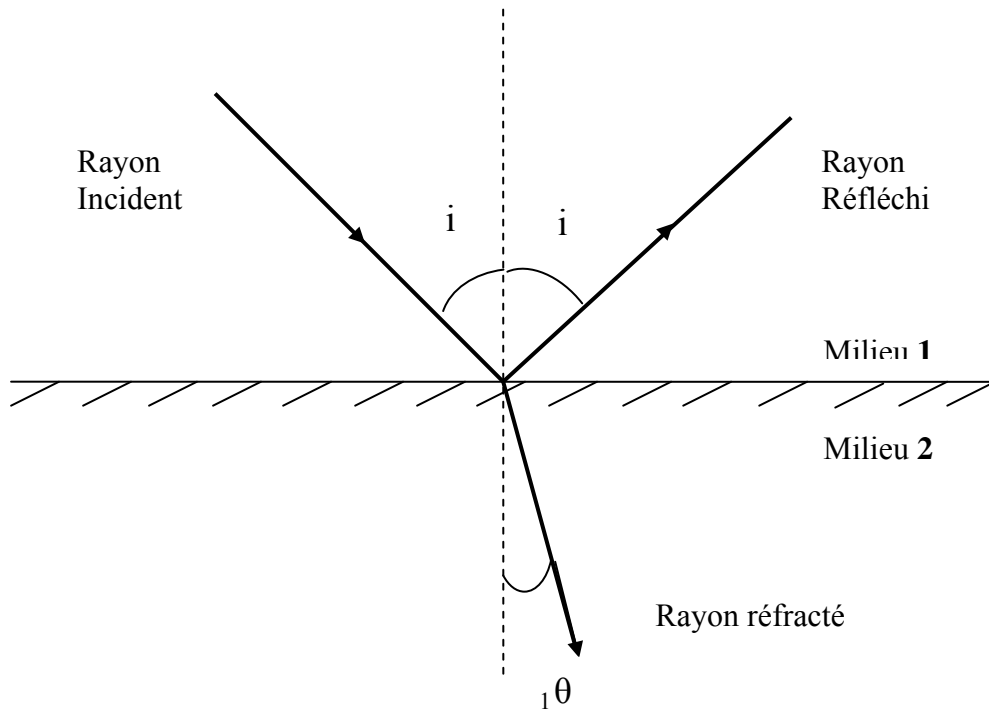
$$\rho_1 = \frac{1}{2} \cdot (\rho_n + \rho_p) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\sin^2(\theta_1 - i)}{\sin^2(\theta_1 + i)} + \frac{tg^2(\theta_1 - i)}{tg^2(\theta_1 + i)} \right) \quad (55) \quad [28]$$

$\theta_1$  : l'angle de réfraction exprimé à partir de la loi de Snell-Descartes.

$$\theta_1 = \text{Arcsin}\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i)\right) . \quad (56)$$

$n_1$  : Indice de réfraction du milieu 1 (généralement c'est celui de l'air, il est égal à 1).

$n_2$  : Indice de réfraction du milieu 2 (généralement celui de la couverture transparente).



✓ **Calcul du coefficient de transmission de la vitre:**

La transmission globale "  $\tau$  " du rayonnement à travers une vitre est donnée par le produit

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r \quad (57)$$

$\tau_a$  : facteur de transmission relatif à l'absorption.

$\tau_r$  : facteur de transmission relatif à la réflexion.

- Coefficient de transmission dû au rayonnement direct

$$\tau_{r1} = \frac{1 - \rho_1}{1 + \rho_1} \quad (58)$$

$$\tau_{a1} = \text{Exp}\left(\frac{-ext.epv}{\cos(\theta_1)}\right) \quad (59) \quad [13]$$

epv : épaisseur de la vitre.

ext : coefficient d'extinction de la vitre [1/m].

indice 1 : référence au rayonnement direct.

D'où :

$$\tau_{dir} = \tau_{r1} \cdot \tau_{a1} \quad (60)$$

- o Coefficient de transmission dû au rayonnement diffus

Le calcul se fait en assimilant le rayonnement diffus à un rayonnement direct frappant le capteur sous un angle d'incidence de 60°.

$i_2 = 60^\circ$ .

$$\theta_2 = \text{Arc sin}\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_2)\right) \quad (61)$$

$$\text{D'où : } \rho_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\sin^2(\theta_2 - i_2)}{\sin^2(\theta_2 + i_2)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - i_2)}{\text{tg}^2(\theta_2 + i_2)} \right) \quad (62) \quad [28]$$

$$\tau_{r2} = \frac{1 - \rho_2}{1 + \rho_2} \quad (63)$$

$$\tau_{a2} = \text{Exp}\left(\frac{-ext.ep_v}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (64)$$

$$\tau_{dif} = \tau_{r2} \cdot \tau_{a2} \quad (65)$$

Et :

$$\alpha_{v,dif} = 1 - \rho_2 - \tau_{dif} \quad (66)$$

L'indice 2 : référence au rayonnement diffus.



## **CHAPITRE – III :**

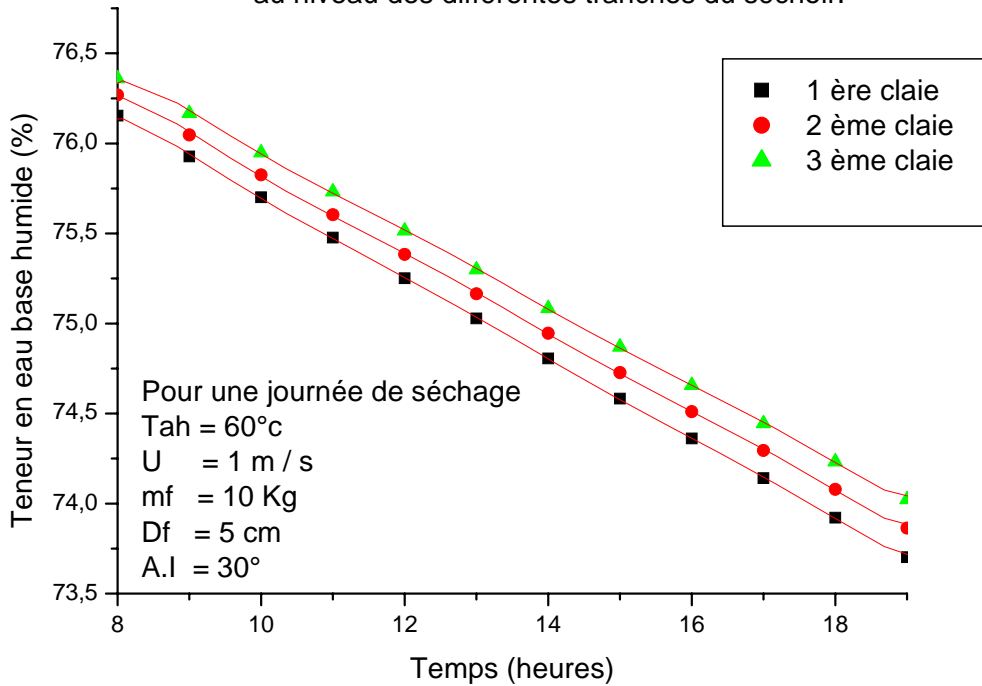
### **Résultats et discussions**

La partie suivante; rapporte quelques résultats de la simulation donnée par le programme élaboré, pour l'étude du comportement du séchage des abricots dans un séchoir direct et indirect. Le fruit doit posséder une première phase de séchage caractérisée par une vitesse de séchage constante. Mais ; il a été démontré dans l'étude entreprise pour l'élaboration de la cinétique de séchage (adoptée dans ce travail) que cette phase n'existe pas dans le séchage des abricots **INCI**-[19] ceci montre que la diffusion de vapeur est le seul mécanisme physique dominant dans le transfert de masse dans les abricots **INCI**-[19]. Ces résultats sont très semblables à ceux obtenues par **NGANHOU** et **TNGANYA**-[17], pour une étude expérimentale sur site, du séchage solaire des couches de fèves de cacao. Même résultat pour le séchage de l'oignon **BENNAMOUN**-[24] et le séchage des fraises **E.KAVAK AKPINAR**-[29]. Par conséquent seule une étude de la deuxième phase est effectuée.

#### **III - 1 L'évolution de la teneur en eau dans les abricots au niveau des tranches du séchoir**

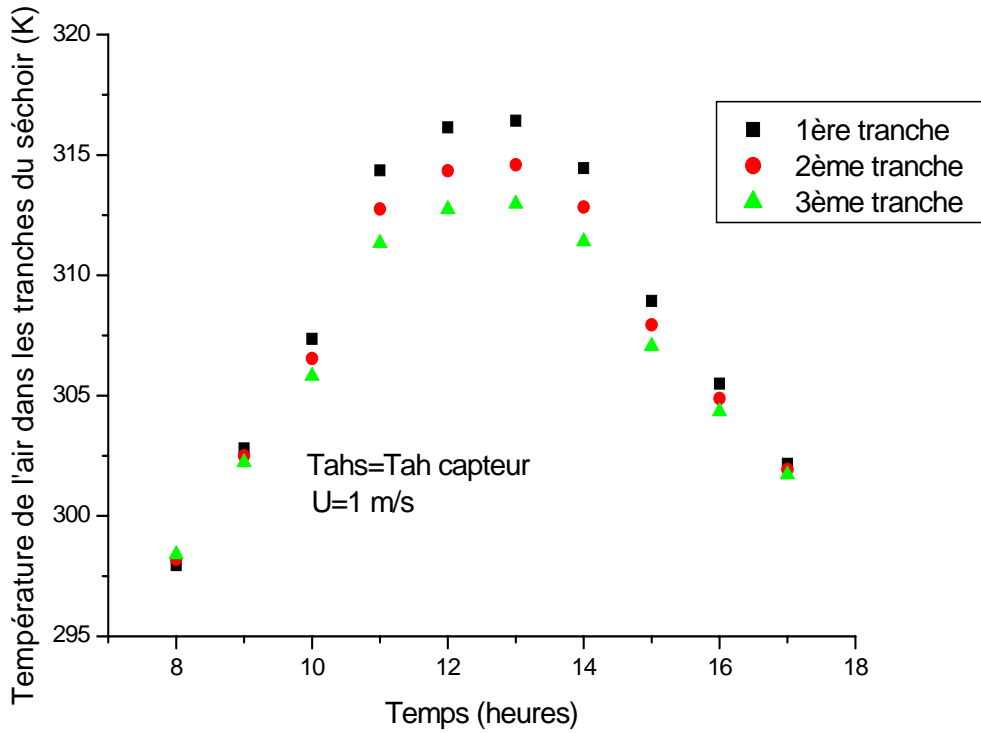
La figure (3.1) donne l'évolution en fonction du temps, de la teneur en eau dans les abricots, au niveau des différentes claies du séchoir.

(Fig.3.1) L'évolution de la teneur en eau dans le produit au niveau des différentes tranches du séchoir.

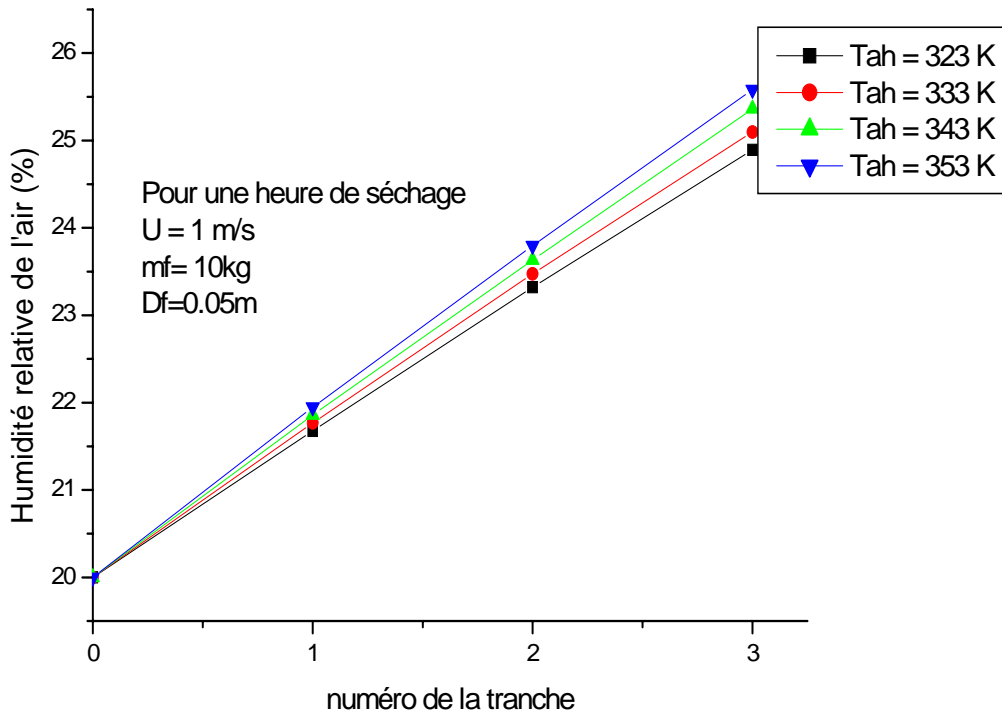


Lorsque dans une tranche, les abricots atteignent une teneur en eau résiduelle de 18% base humide **M.DAGUENET**-[5] et **INCI**-[19], soit 21.95 % base sèche, il est considéré que cette tranche est séchée. Le produit sèche plus vite dans les premières tranches que dans les dernières; ce qui est tout à fait normal, puisqu'au fur et à mesure que l'air avance dans le séchoir, sa température baisse (figure 3.2) et son humidité relative augmente (figure 3.3); autrement dit, la dépense d'énergie thermique occasionnée par l'évaporation de l'eau s'accompagne d'un refroidissement de l'air. En d'autres termes, l'air récupère sous forme de vapeur ce qu'il a perdu sous forme de chaleur sensible.

(Fig.3.2) L'évolution de la température de l'air dans les tranches du séchoir



(Fig.3.3) Evolution de l'humidité de l'air à la sortie des tranches.



La figure (3.2) montre qu'il y a Une montée en température de chaque tranche dans la matinée et une baisse dans l'après-midi. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en raison de l'augmentation de la densité du flux solaire incident dans la matinée et de sa diminution dans l'après-midi, la température de l'air à la sortie du capteur est constamment croissante dans la matinée et décroissante dans l'après-midi. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par **R.BENKHELFALLAH** [16], **J.NGANHOU, TNGANYA**- [17] et **HALLAK** et al [30].

Une montée dans l'humidité de l'air de séchage au niveau des tranches du séchoir (figure 3.3) est également constatée. en traversant la première tranche, l'air absorbe l'humidité dégagée par les fruits de la première tranche, il absorbe également l'humidité dégagée par les fruits de la deuxième puis de la troisième claie, par conséquent, son humidité relative augmente au fur et à mesure qu'il avance dans le séchoir. Pour mieux voir l'évolution de cette humidité, elle est représentée en fonction de l'ordre des claies et non pas sur un diagramme (H, X).

### **III - 2 Choix des paramètres**

L'étude paramétrique consiste à faire varier des paramètres et d'étudier leur influence sur le modèle.

Le choix de ces paramètres consiste à ce que ces derniers aient une relation directe avec l'opération du séchage et du séchoir utilisé.

Parmi ces paramètres citons :

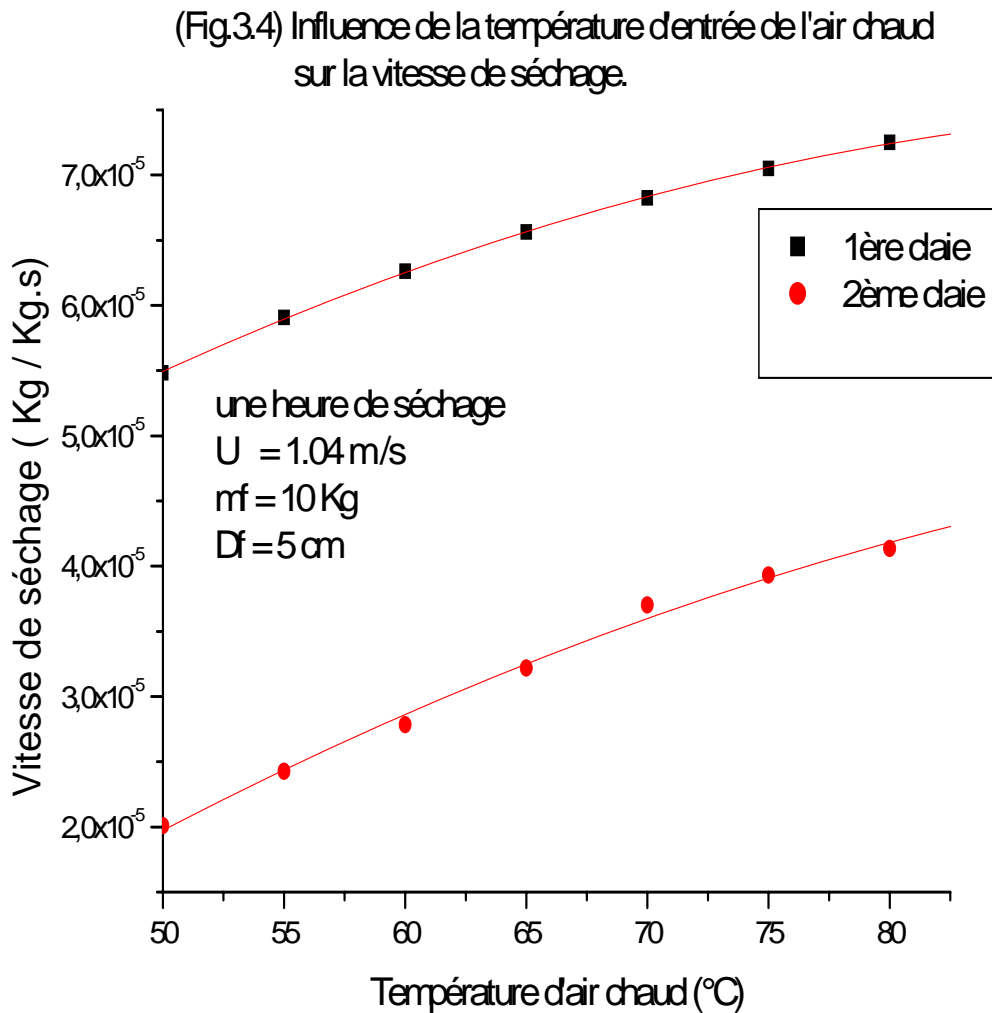
- La température de l'air chauffé entrant au séchoir,
- La masse du produit à sécher,
- Le diamètre du produit à sécher et d'autres que l'on citera tout au long de cette discussion.

#### **III - 2.1 L'influence de la température de l'air**

La gamme de températures utilisée est comprise entre 50°C et 80°C.

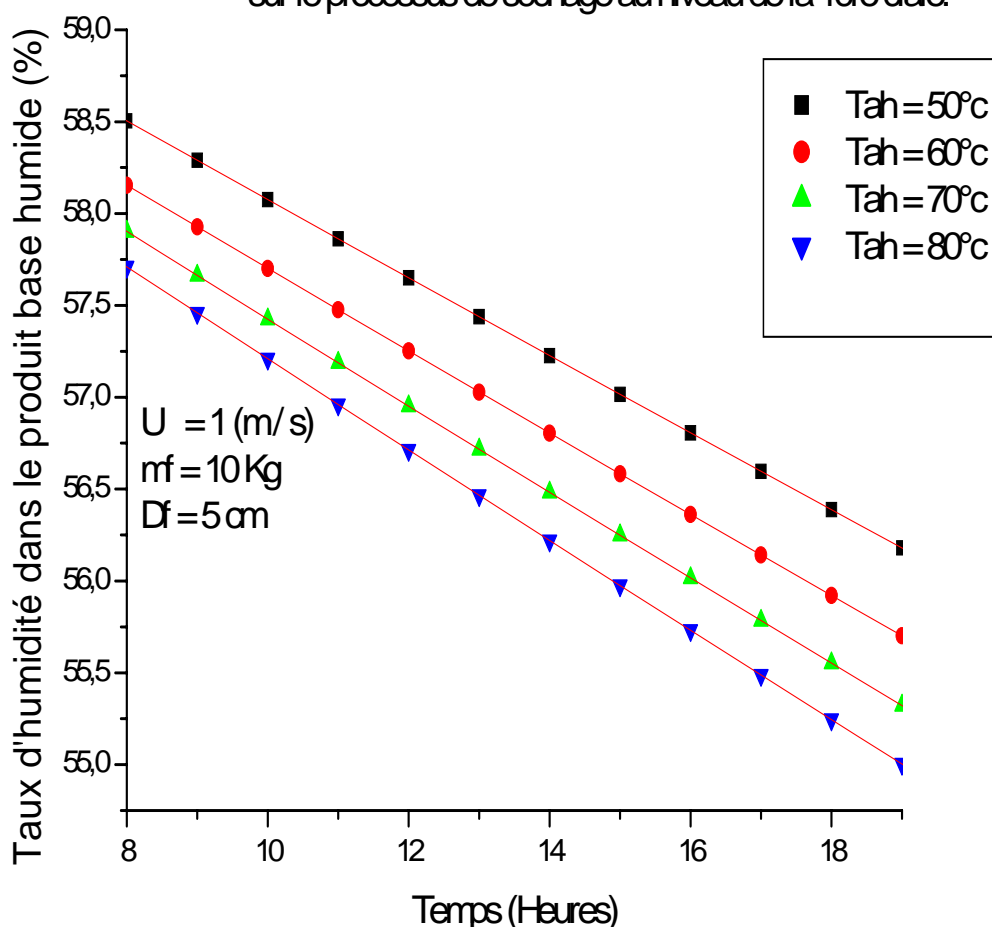
L'action simultanée de l'insolation des fruits et d'un préchauffage de l'air provoque une diminution importante du temps de séchage. En effet, l'air asséchant dans ce cas accroît le gradient de concentration de vapeur d'eau entre le produit et le

courant d'air, et par conséquent la vitesse de séchage augmente ce qui est montré par la courbe de la figure (3.4).



La figure (3.5) représente la variation de la teneur en eau du produit au niveau de la première tranche pour différentes températures et pour un temps fixé.

(Fig.3.5) Influence de la température d'entrée de l'air de séchage sur le processus de séchage au niveau de la 1ère claie.



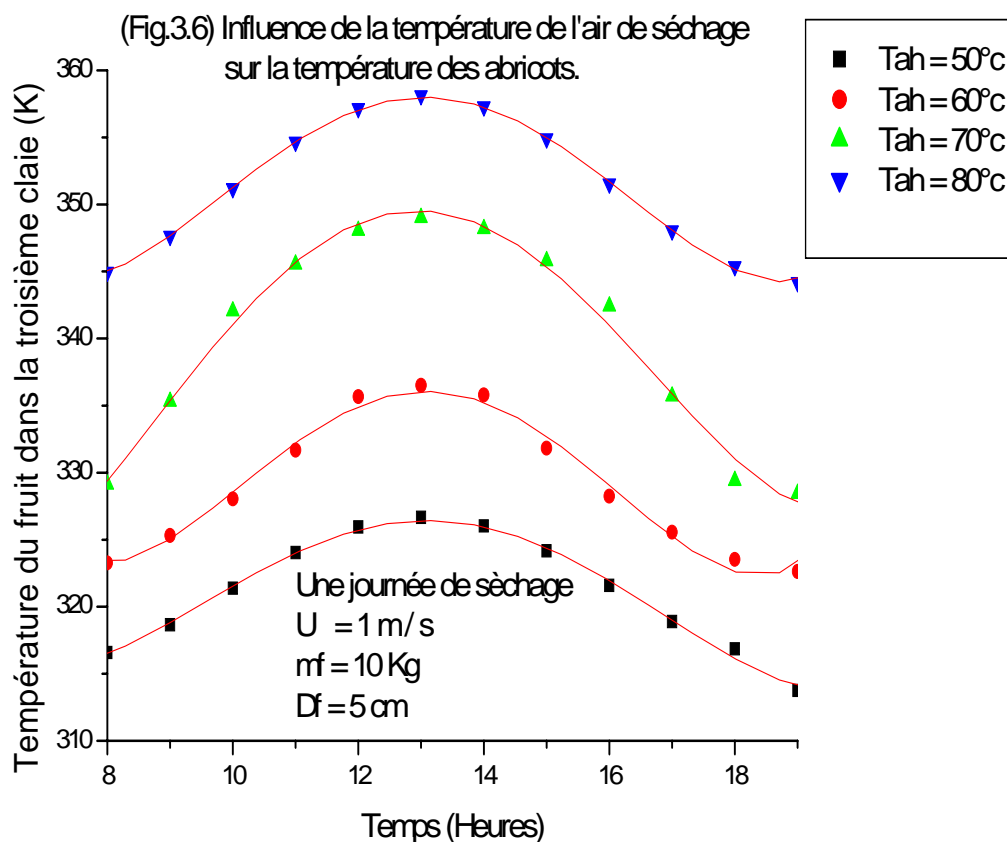
L'augmentation de la température permet de donner plus de chaleur au fruit (figure 3.6, au niveau de la dernière claie); donc plus d'évaporation d'eau du fruit (figure 3.5). Dans **INCI-** [19] où le même modèle de cinétique que le nôtre est pris des résultats expérimentaux similaires sont obtenus, même chose dans **E.KAVAK AKPINAR-** [29].

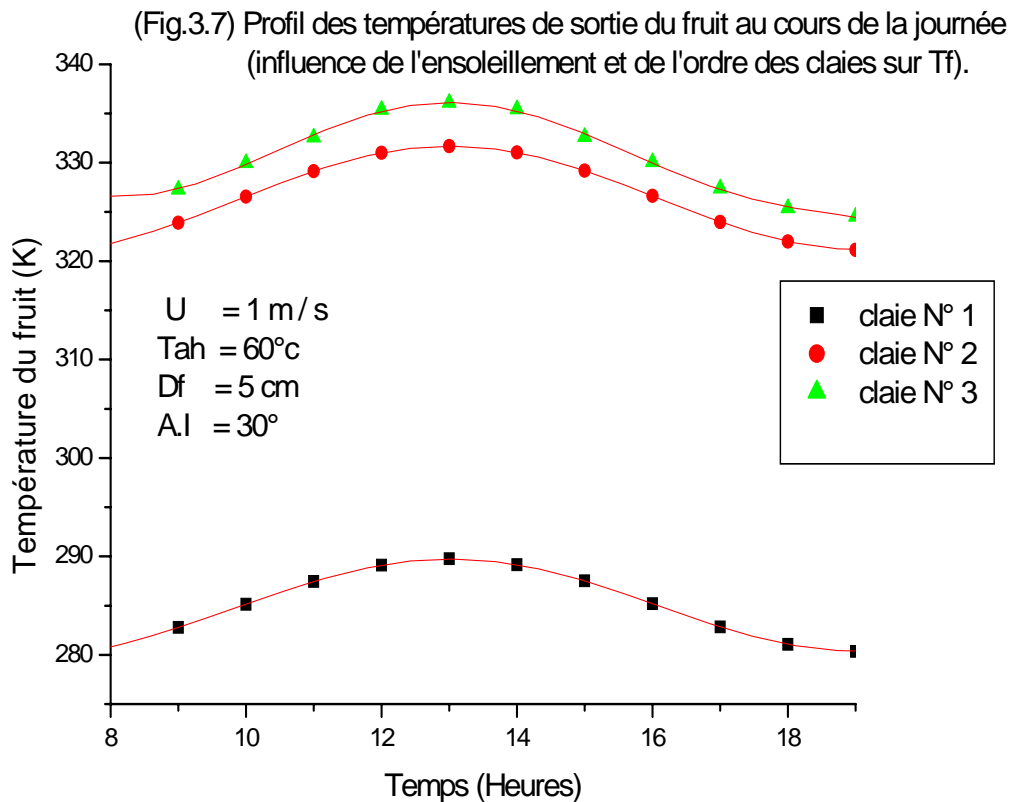
Il est impératif de signaler que la température du fruit ne doit pas dépasser la valeur de 65°C pour éviter sa détérioration. La chaleur apportée par l'air provoque l'évaporation de l'eau du fruit au niveau de la première tranche. La température de l'air au niveau de la deuxième claie va baisser, ce qui va diminuer la quantité d'évaporation de l'eau au niveau de la seconde tranche, donc une température interne du fruit plus importante (température de l'air diminue, humidité relative de

l'air augmente, température superficielle du produit augmente et l'humidité relative du produit diminue) **M.DAGUENET**- [5], même phénomène se traduit au niveau de la dernière tranche; voir la figure (3.7). En plus de l'ensoleillement le fruit se chauffe davantage, donc la température au sein du fruit de la dernière claie croit plus que celle au sein des premières claies **ZEGHMATI** -[13] et **SINGH** -[15]; ce qui risquerait sa détérioration.

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage, **TECH.ING**- [1].

L'appoint de chaleur intervient chaque fois qu'il est nécessaire de telles façons que la température de consigne (variable dans le temps) du produit à sécher soit respectée, **A.EL BOUARDI** et al -[38].





Une élévation de la température de séchage entraîne toujours une diminution de la teneur d'eau du produit, une augmentation de l'humidité de l'air de sortie du séchoir et une diminution du temps de séchage, **ZEGHMATI-** [13], **INCI-** [19], une communication de **KANDAHAR-** [21] et **BENNAMOUN-** [24]. Ceci confirme que la température de séchage est un paramètre important pour les transferts internes de l'eau pour l'abricot comme pour la plupart des produits ou plantes médicinales ou autres **A. LAMHARRAR-** [31].

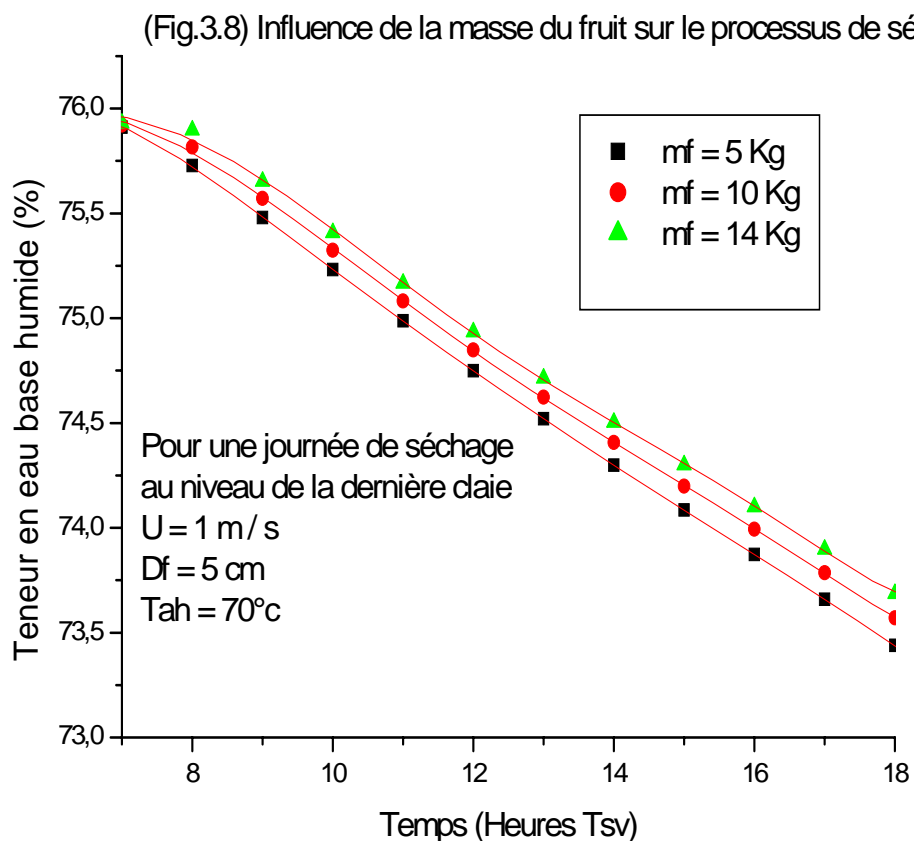
### III - 2.2 Effet de la masse du produit

Il est clair que l'humidité de 14 Kg est plus importante que celle de 10 Kg ou de 5 Kg. Le passage de l'air de séchage provoque l'évaporation de cette eau. Pour une température fixe de l'air de séchage, la quantité d'eau dégagée de 14 Kg est plus importante que celle dégagée par 10 ou 5 Kg.

L'air perd de sa chaleur en l'empreintant à l'évaporation de cette eau; cette perte est plus importante pour 14 que pour 10 Kg; par contre il gagne en humidité pour



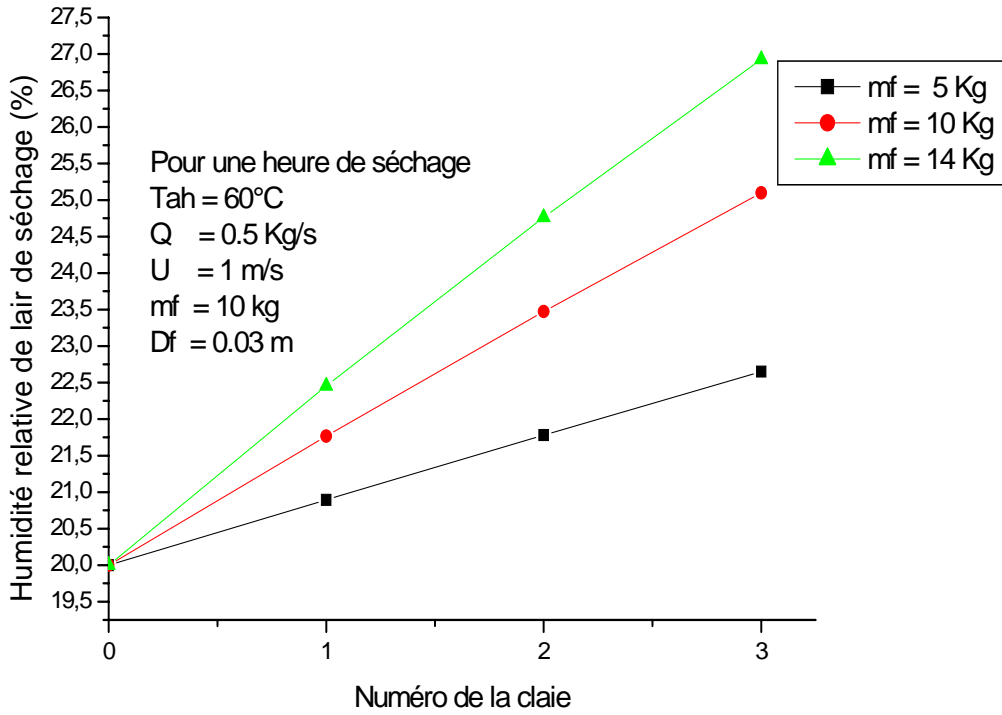
14 plus que pour 10 ou 5 Kg. Donc l'air asséchant au niveau de la seconde tranche et troisième tranche est plus frais (figure 3.10) et plus chargé en humidité pour 14 que pour 10 ou 5 Kg (figure 3.9). Par conséquent; son pouvoir évaporatoire diminue au fur et à mesure qu'il traverse le séchoir. De ce fait; il y aura moins d'évaporation d'eau au sein du produit dans les dernières tranches pour 14 Kg que pour 10 ou 5 Kg. Cette variation est représentée dans la figure (3.8) au niveau de la dernière tranche.



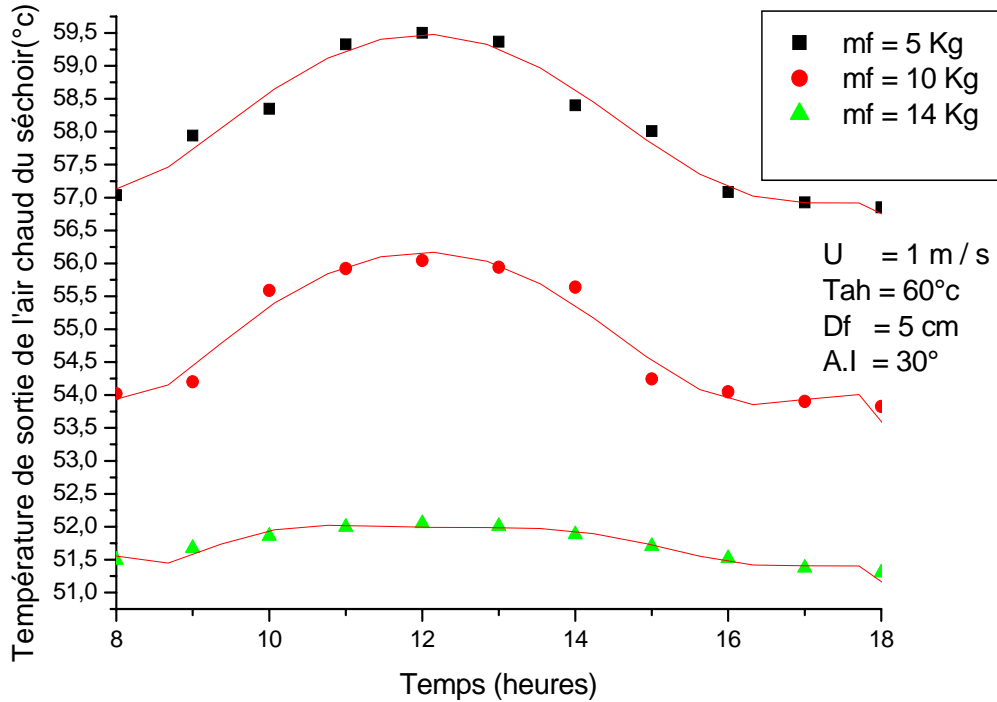
Cela peut être aussi expliqué par la présence d'un nombre plus important d'abricots dans 14 Kg que dans 10 Kg qui reçoivent ainsi moins de chaleur apportée par l'air de séchage. Ce qui nécessiterait un plus grand débit pour sécher les 14 Kg pour un même temps de séchage; ou un plus grand temps de séchage pour le même débit.

Cette allure est confirmée par les résultats obtenus par **GTZ MAROC**- [20] et **BENAMOUN**- [24].

(Fig.3.9) Influence de la masse du fruit sur l'humidité de l'air de séchage.



(Fig.3.10) Influence de la masse du fruit sur la température de sortie de l'air de séchage du séchoir pour une journée de séchage.



### III - 2.3 Effet du diamètre du produit

Considérons un produit à sécher traversé par un air humide en écoulement. Au fur et à mesure que l'air progresse en son sein, sa température sèche diminue en même temps que son humidité relative augmente. Inversement, la température sèche du produit augmente tandis que son humidité relative diminue. Il s'ensuit que chaque tranche du produit à sécher perpendiculaire à l'écoulement n'est pas traversée par un air possédant les mêmes propriétés. C'est pourquoi le phénomène de séchage est complexe **M.DAGUENET-** [5] et pour mieux le comprendre, il y a intérêt à considérer une tranche mince de produit.

Par ailleurs, le phénomène de diffusion de l'eau du produit se dirige du centre du produit vers la surface, il a donc un trajet plus court à parcourir pour 3 et 5 cm que pour 6 cm, d'où l'écoulement du liquide à travers les interstices est plus rapide dans le produit ayant un diamètre faible qu'un diamètre important (théorie capillaire, théorie de BERGER et PEI). Aussi la pression est plus grande dans 3 cm que dans 6 cm (phénomène de diffusion, théorie de LUIKOV).

D'après la formule (1), **TECH.ING-** [1], la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante (augmentation de la surface d'échange par fractionnement). Donc la diminution de la taille des particules constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules, **TECH.ING-** [1] et **M.DAGUENET-** [5], voir figure (3.11).

La figure (3.11) représente la variation de la teneur en eau du produit pour différents diamètres. Elle montre que l'augmentation du diamètre entraîne un ralentissement d'évaporation d'eau ainsi qu'une augmentation du temps de séchage.

Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par **J.NGANHOU, TNGANYA-**[17], **INCI-** [19], **L.BENAMOUN-** [24], **E.KAVAK AKPINAR** [29] et par les études expérimentales faites sur le séchage des produits en couches minces.

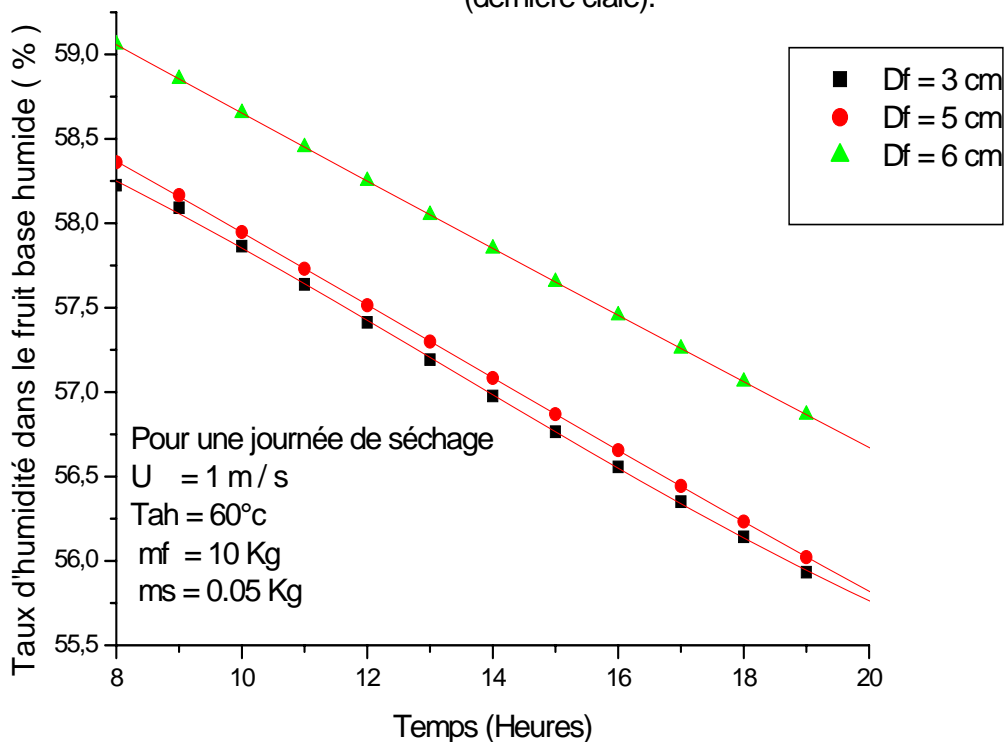
La figure (3.12) représente la variation de la température du produit dans le séchoir pour différents diamètres.

L'air chauffé pénètre dans le séchoir, chauffe le fruit et provoque l'évaporation d'une partie de son eau, ce qui se suit par une baisse de température de l'air

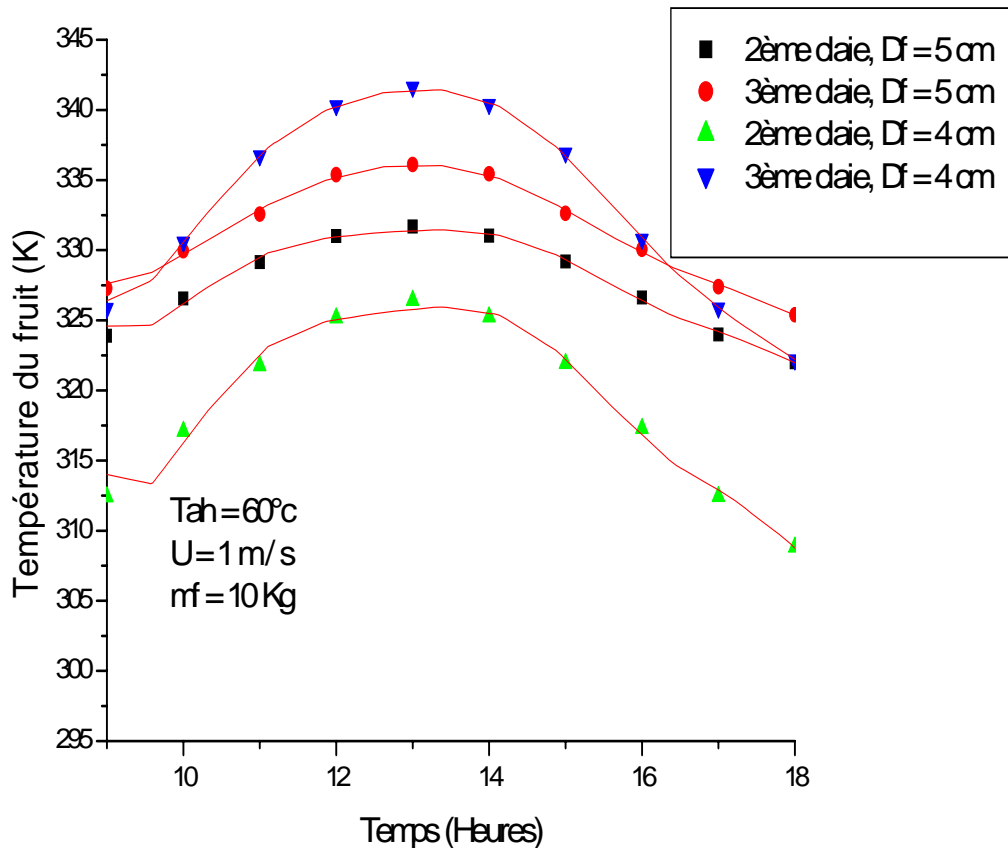
d'entrée dans la deuxième claie. Par conséquent la température du produit de la seconde claie va baisser au début du séchage. Cette baisse est plus importante dans l'air et le produit de la deuxième claie du fruit de 4 cm que celle du fruit de 5 cm (l'évaporation est plus importante pour 4 que pour 5 cm). D'où le pouvoir évaporatoire de l'air au sein de la deuxième et troisième claie est plus faible pour 4cm que pour 5 cm. Donc les fruits contiennent plus d'humidité dans les claies citées pour 4 que pour 5 cm. L'action directe de l'ensoleillement sur les fruits augmentera leur température beaucoup plus pour 4 que pour 5 cm (plus d'eau dans 4 que dans 5 cm donc plus de chaleur). Ainsi, les températures superficielles des fruits sont plus élevées dans la zone de sortie qu'au niveau de la zone d'entrée. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus dans **ZEGHMATI-** [13]. Inversement; la température de l'air est plus faible dans la zone de sortie que dans la zone d'entrée, pour 4 que pour 5 cm, pour les mêmes raisons que précédemment.

En conclusion; plus le diamètre du produit est grand et plus sa teneur en eau et son temps de séchage sont grands.

(Fig.3.11) Influence du diamètre sur le processus de séchage (dernière claie).



(Fig.3.12) Influence du diamètre du fruit sur sa température au cours de la journée

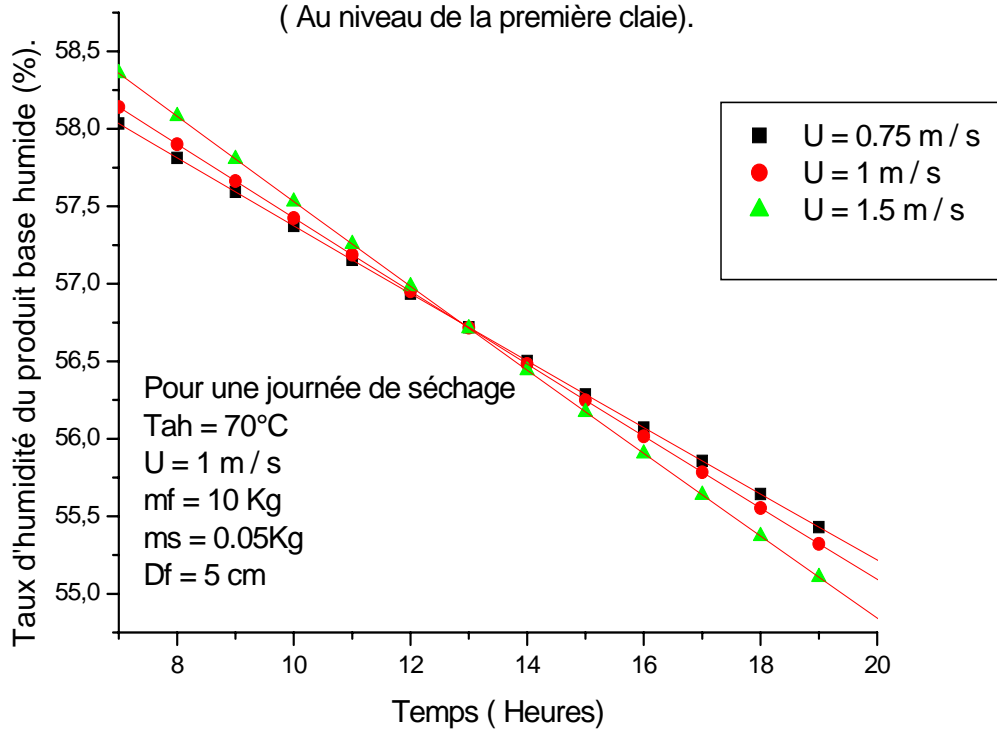


### III - 2.4 Influence du débit de l'air

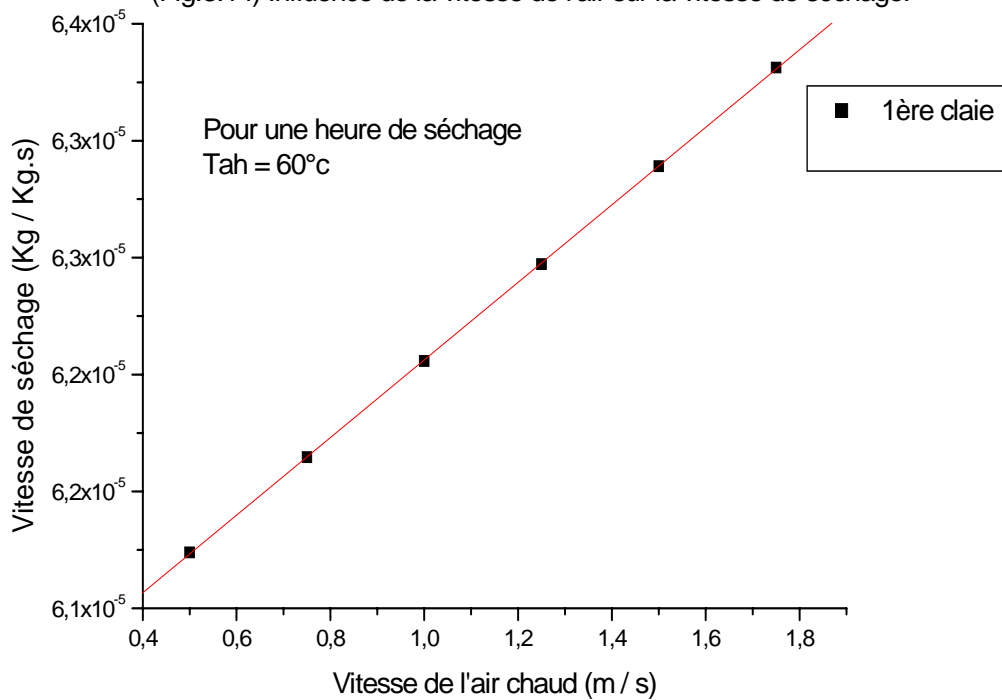
**Re** étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître **Nu**, donc la vitesse de l'air agit sur les coefficients d'échanges, augmentant ainsi les transferts thermiques et massiques entre le fruit et l'air, **TECH.ING-** [1] et **ZEGHMATI-** [13]. Donc la vitesse de séchage est une fonction croissante du débit **ZEGHMATI-** [13] (Cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur).

Comme il est montré dans les figures (3.13) et (3.14), l'augmentation de la vitesse entraînerait une augmentation du taux de séchage; donc une diminution de la teneur en eau du produit (figure 3.13) et une augmentation de la vitesse de séchage (figure 3.14). Par conséquent, une diminution dans le temps de séchage.

(Fig.3.13) Influence de la vitesse de l'air de séchage sur le processus de séchage en fonction du temps  
( Au niveau de la première claie).



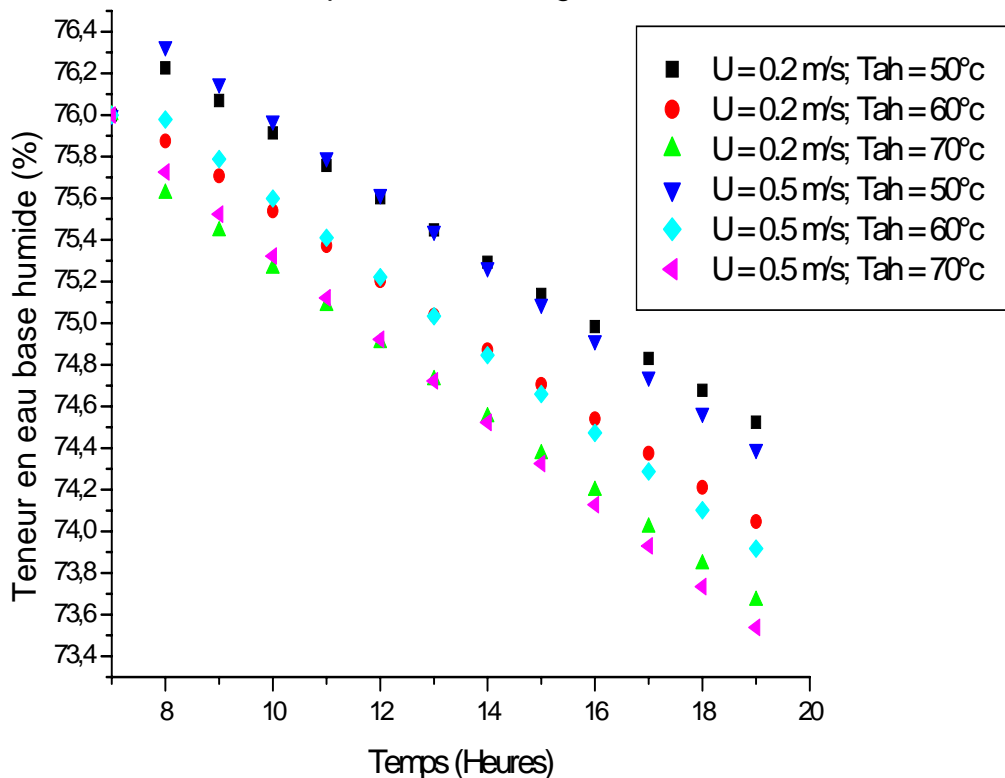
(Fig.3.14) Influence de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage.



Les résultats sont conformes aux études faites sur le séchage des abricots **INCI**-[19], à celles faites sur la fraise **E.KAVAK AKPINAR**- [29]; ainsi qu'à celles faites sur le séchage des produits alimentaires **MADAMBA ET AL**- [32].

Toutefois les résultats expérimentaux ont montré que la température d'air chaud a un effet significatif sur l'évolution du taux d'humidité contenu dans le fruit. Alors que la vitesse de séchage a un faible effet, voir figure (3.15). En d'autres termes; la température de l'air l'emporte sur sa vitesse **INCI**- [19], **E.KAVAK AKPINAR**- [29] et [31]. L'air a la capacité d'absorber de la vapeur d'eau. Plus sa température augmente et plus il peut en contenir (les vêtements sèchent plus rapidement par une journée chaude et ensoleillée que par temps couvert et pluvieux) **PH. DUDEZ**- [34].

(Fig.3.15) influence de la vitesse et de la température de l'air de séchage sur le processus du séchage.



Comme le montre la figure (3.15) les changements dans la teneur en eau des abricots; en variant la température et en gardant la vitesse constante; sont plus significatifs que ceux en variant la vitesse et en fixant la température. Si l'installation est chargée de produits à sécher, l'air à l'intérieure du séchoir perd en

température à cause de l'eau dégagée par les produits. La plus grande baisse en température est enregistrée pour un produit très humide **J.NGANHOU, TNGANYA-** [17], pour des produits relativement secs, il est possible de compenser la perte en température par absorption de l'énergie de rayonnement, et même d'augmenter la température vers la sortie du séchoir, **GTZ. Maroc-** [20]. Par conséquent si le débit est faible et sa température est importante; cette compensation est possible; inversement, si le débit est important et sa température est faible; la compensation nécessitera plus de temps. C'est ce qui se passe dans les capteurs solaires, plus le débit est faible, plus la température augmente. Il est tout de même impératif de noter qu'à faible débit, le risque de surchauffe est grand, donc la détérioration du produit est probable.

### **III - 3 Evolution du séchage en tenant en compte la porosité**

Au cours du séchage, le produit perd de son humidité. Sa chaleur spécifique ainsi que sa masse sont alors diminuées. En conséquence, un vide ou une porosité se crée entre les fruits disposés sur les claies, ce qui conduirait à une baisse de la chaleur échangée entre le fruit et l'air asséchant; qui va causer un meilleur séchage des fruits au niveau de la seconde claie (moins de rétrécissement), puis et pour la même raison le séchage des fruits de la troisième claie avant celles des premières claies. **SINGH-** [15] a remarqué au cours d'une étude expérimentale qu'il a mené que ce phénomène se produit après six heures de séchage (voir la partie : étude des travaux antérieures). C'est pourquoi, il arrête l'opération du séchage pour la reprendre le lendemain, après avoir remonté le produit dans les claies supérieures en minimisant au maximum le vide entre les fruits. La même procédure est suivie par les marocains lors du séchage des abricots dans le séchoir solaire (fabriqué par les allemands et qui connaît un énorme succès dans les pays du monde). Les marocains coupent les abricots en oreillons, les tassent les uns sur les autres sur la claie, la face intérieure vers le haut (pour augmenter le transfert entre l'air et le fruit, aussi entre le fruit et le soleil). Le processus de séchage se trouve ainsi inversé, c'est plus les fruits de la première claie qui sèchent avant, mais plutôt ceux de la dernière. Ceci est



représenté sur la figure (3.16). La teneur en eau à 13 heures sur la figure (3.16) n'est pas la même, elle est un petit peu plus importante dans le produit de la première claie que dans celui de la deuxième claie; celle de la deuxième plus importante de celle de la troisième de 2%; cette variation n'est pas trop apparente sur le graphe à cause du pas de l'incrémentation choisi.

Pour arriver à ces résultats, il fallait considérer la chaleur spécifique, la masse du fruit, ainsi que la porosité comme variables. Pour cela il fallait les calculer et tracer leurs courbes qui sont conformes à celles obtenue par **J.NGANHOU, TNGANYA-** [17].

### **Les propriétés thermo physiques du produit**

Les propriétés thermo physiques du produit revêtent une importance particulière dans une étude de séchage. Car elles constituent les paramètres de simulation qui rendent compte de l'état du produit. C'est par elles que le produit est pris en compte dans la modélisation. Parmi ces paramètres, citons la chaleur spécifique du fruit (calculée par la formule dans l'annexe : B), aussi la porosité **Po** qui se crée par le fait de rétrécissement des fruits au cours du séchage.

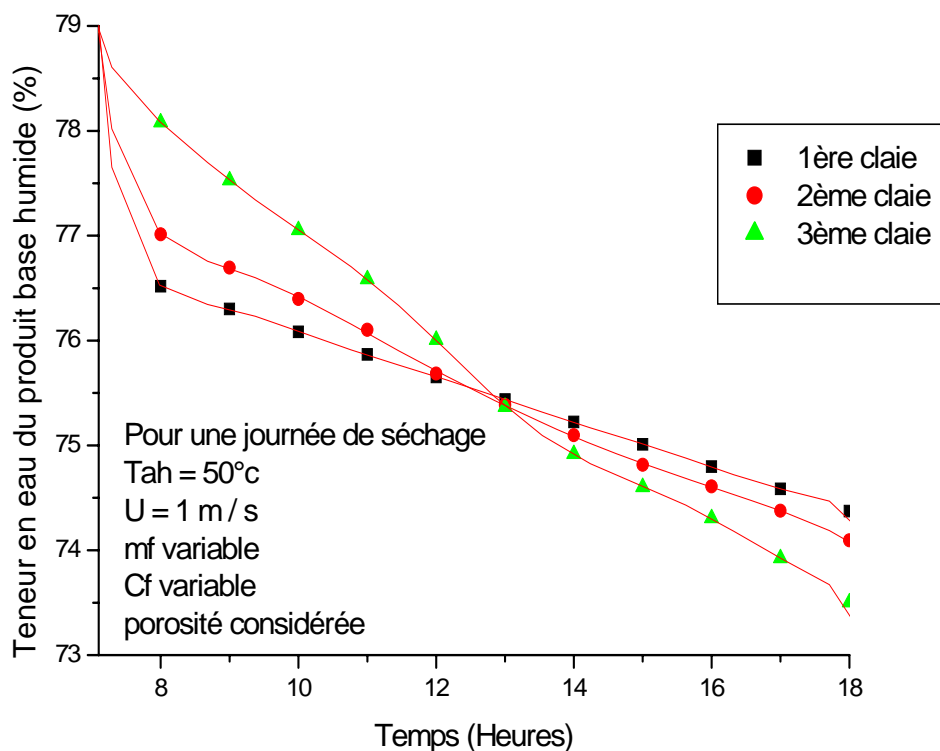
1. La chaleur spécifique initiale est de l'ordre de 3.7118449 (kJ /kg .k) calculée d'après la texture du fruit, ce qui est conforme aux valeurs présentées dans **RECKNAGEL-** [26]. Cette valeur diminue au fur et à mesure que le fruit sèche voir la figure (3.17), l'allure de la courbe est similaire à celle obtenue dans une étude expérimentale entreprise dans le séchage des fèves de cacao **J.NGANHOU, TNGANYA-** [17] (voir études antérieures). Plus la température de l'air de séchage augmente et plus la valeur de la chaleur spécifique du fruit diminue (figure 3.18). On peut expliquer cette diminution par la perte du fruit d'une quantité de son eau et qui est une fonction croissante de la température de séchage. Ainsi le besoin du fruit en chaleur pour l'évaporation de son eau diminue au fur et à mesure que le séchage progresse. C'est pourquoi dans la pratique; il est conseillé de démarrer le séchage avec un air ayant une température supérieure à l'admissible par le fruit de 10°C; et on la diminue au fur et à mesure que le fruit sèche.

2. La masse du fruit, elle aussi diminue au fur et à mesure que le séchage progresse. Cette diminution est plus importante que la température augmente pour les mêmes raisons énumérées précédemment voir figure (3.19).
3. La porosité augmente au fur et à mesure que le fruit se rétrécisse. La figure (3.20) le confirme; et ces résultats sont conformes à ceux obtenus par **J.NGANHOU, TNGANYA-** [17].

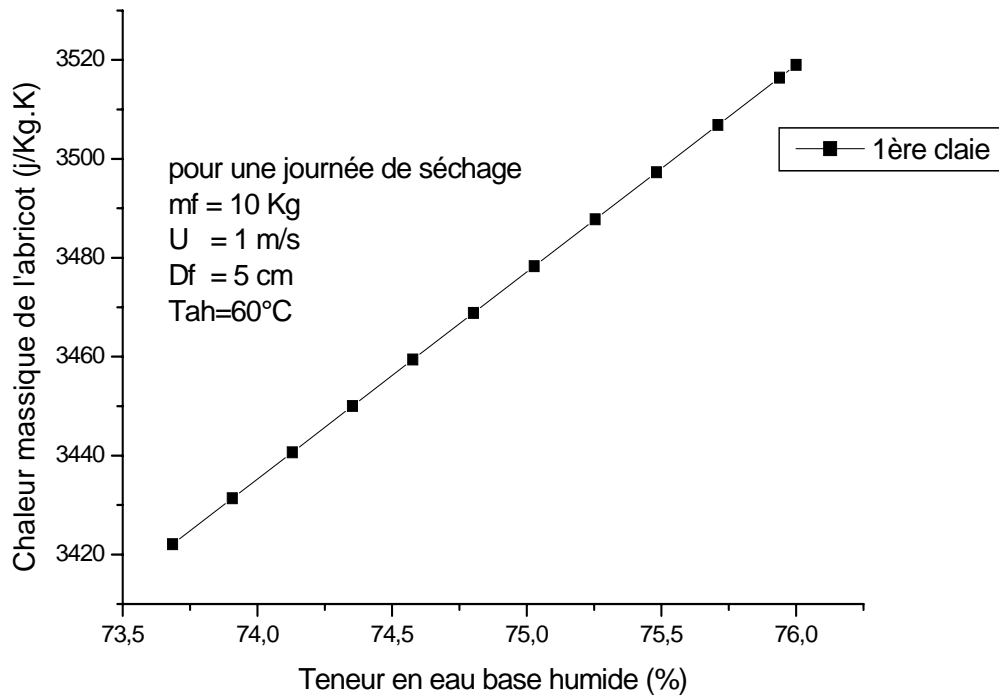
Il est à noter que les résultats de la simulation sont mieux quand on prend en compte la porosité que quand on la néglige. D'où un meilleur temps de séchage.

Le temps de séchage est de cent cinquante heures (on ne tient pas compte de la porosité), acceptable si on le comparait avec celui obtenu par le séchage direct des fruits de **R.BENKHELFELLAH** et al- [16] voir les tableaux de l'étude antérieure. Aussi il est impératif de signaler que le séchage se fait traditionnellement sur les toits des maisons, à l'air libre pendant trois semaines, **GERES-** [33], voir aussi la courbe de **L.AISSANI-** [18] dans étude antérieures.

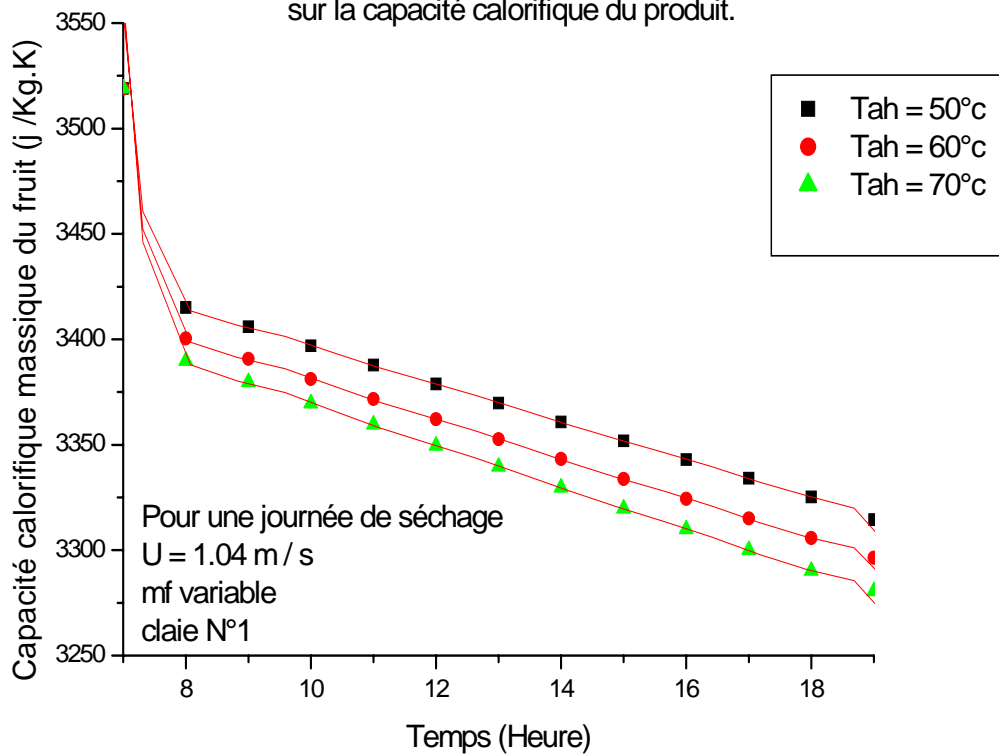
(Fig.3.16) Influence du rétrécissement du fruit sur le processus de séchage



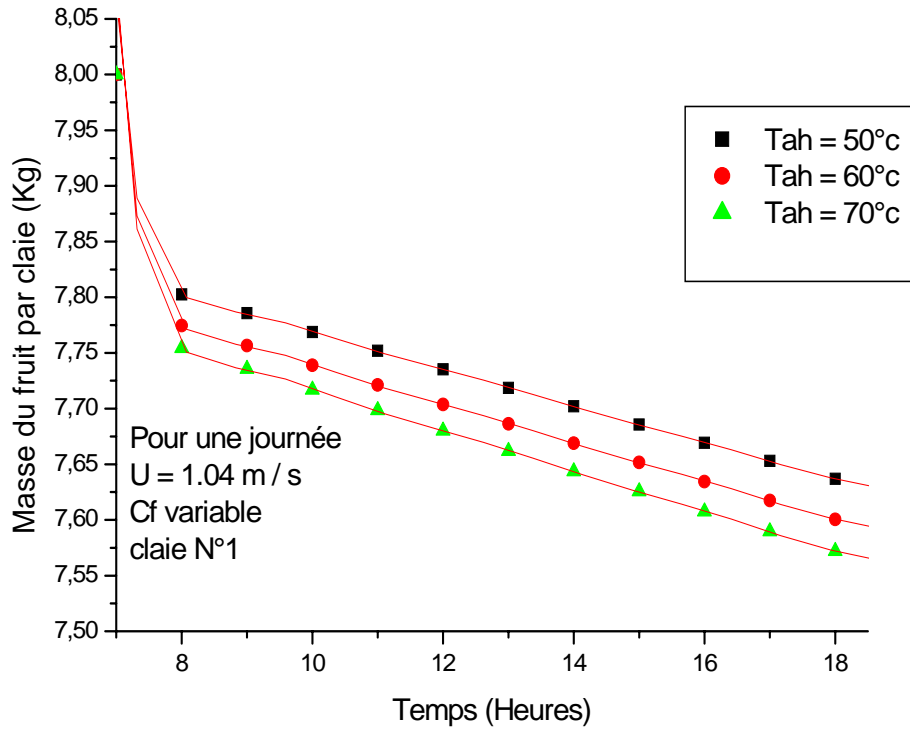
(Fig.3.17) Evolution de la chaleur massique de l'abricot lors du séchage.



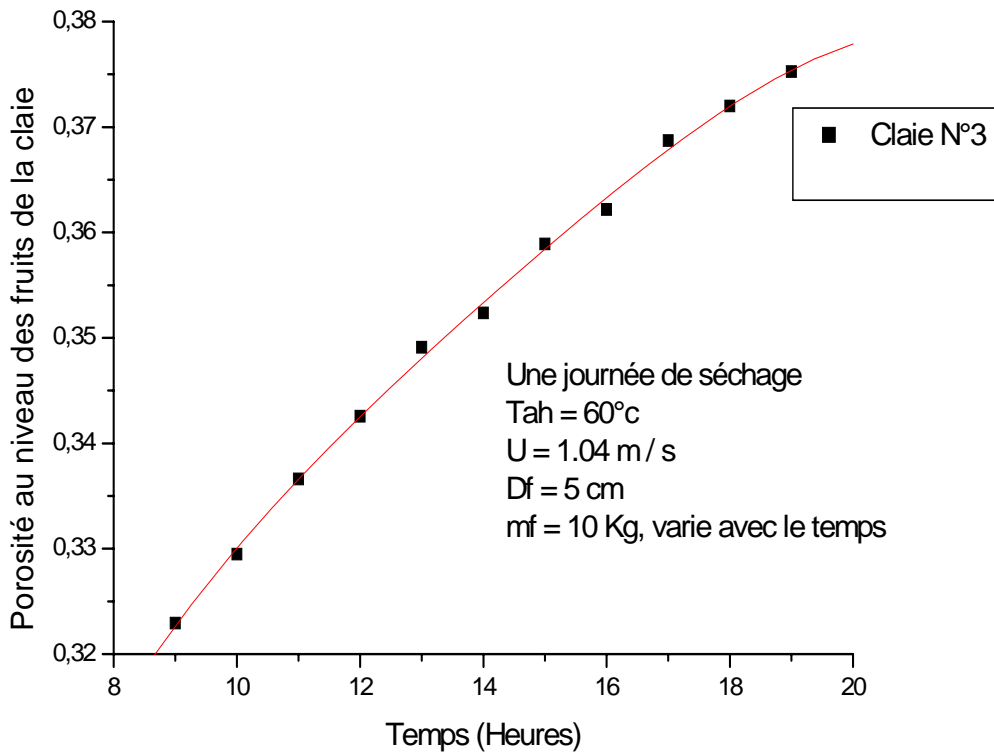
(Fig.3.18) Influence de la température et de l'effet de retrécissement sur la capacité calorifique du produit.



(Fig.3.19) Influence de la température d'air chaud sur la masse du fruit.



(Fig.3.20) Evolution de la porosité au niveau de la dernière claie.



### III - 4 Le couplage capteur – séchoir

Il est intéressant économiquement d'utiliser le séchoir sans lui adjoindre une unité de préchauffage de l'air, autrement dit, un séchoir autonome et que l'air circule, par exemple, grâce à la convection naturelle. Mais il est à craindre que les débits d'air soient très insuffisants et qu'une surchauffe des produits les détériore.

La figure (3.5) reflète l'influence de la température de l'air sur le séchage. Le préchauffage de l'air diminue considérablement le temps de séchage. L'action directe de l'ensoleillement sur les fruits augmente leur température de surface, le gradient de fraction massique entre le fruit et le courant d'air et la vitesse de séchage. Il en résulte un gain de temps appréciable.

Pour assurer ce préchauffage, un capteur solaire est utilisé, il dépend du milieu ambiant où il se trouve. Il est donc nécessaire de connaître les variations de ce milieu. C'est pourquoi une journée est choisie, une journée à ciel dégagé, c'est la journée qui est censée être la plus chaude; il s'agit de la journée du 15 juillet, où la variation de la température ambiante est connue durant toute la journée. Ces variations sont représentées dans la figure (3.21).

Le choix de l'inclinaison a été fait à base d'une remarque faite par quelques ouvrages tel **R.BERNARD**- [10], **ZEGHMATI**- [13] et **PH.DUDEZ**- [34], où il est conseillé de le choisir proche de la latitude (ne dépassant pas les 45°), d'où notre choix s'est fixé sur 30°, un angle proche de la latitude de Constantine qui est de 36.17 degrés.

Il est important aussi de connaître les variations des puissances absorbées par le capteur, la couverture du séchoir et le fruit. Elles sont calculées théoriquement et représentées dans les figures (3.25) et (3.26).

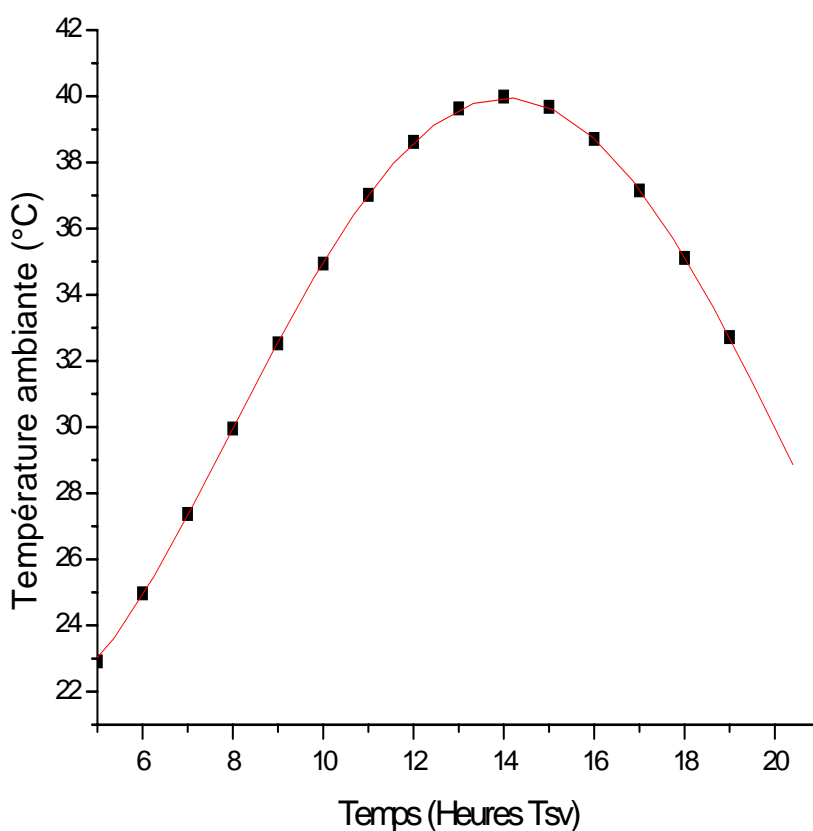
La figure (3.21) représente donc les variations des températures ambiantes de la journée spécifiée auparavant. Elle atteint son maximum à 14 heure Tsv (14 h 39 min heure local **ATLAS**-[27]), sa valeur est de 39.9 degrés centigrades. Pour un relevé expérimental, sa valeur atteint réellement le maximum à 15 local, mais ne dépassant pas les 37.7 degrés centigrades; ce qui représente une erreur de 0.064, donc inférieure à 10%. Vu l'échauffement de la planète et le manque de quelques températures communiquées par le service de météorologie de Constantine, il est préférable de travailler avec les données de la formule empirique.

Une étude comparative, représentant la variation des différentes puissances théoriques, a été réalisée, pour les angles d'inclinaison 15° et 30°.

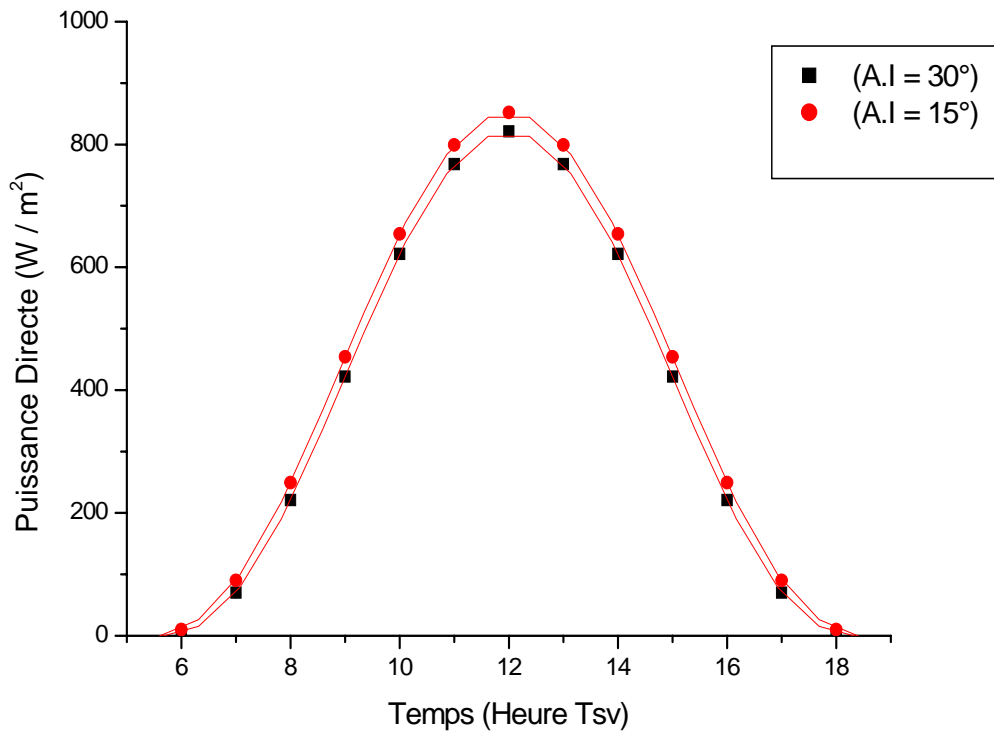
L'étude montre que les puissances : directe et globale (figures 3.22 et 3.24) sont plus élevées pour 15° que pour 30°. Quant à la puissance diffuse (figure 6.23), c'est l'inverse. La puissance captée par la couverture (figure 3.25) n'a pas changée pour autant, celle du fruit par contre (figure 3.26) est plus élevée pour 15° que pour 30°. La variation est d'environ 20 à 22 (w/m<sup>2</sup>). Quant aux températures de sortie du capteur, elles sont presque similaires pour les deux angles d'inclinaison et pour une surface de captation d'un mètre carré.

En augmentant la surface à deux mètres carrée, la variation est de deux degrés centigrades. Ce qui ne couvrirait pas la perte de l'air de séchage dans le séchoir, plutôt un refroidissement plus élevé (puissance au niveau du fruit plus élevée). C'est pourquoi, notre choix s'est porté finalement pour un angle d'inclinaison de 30°.

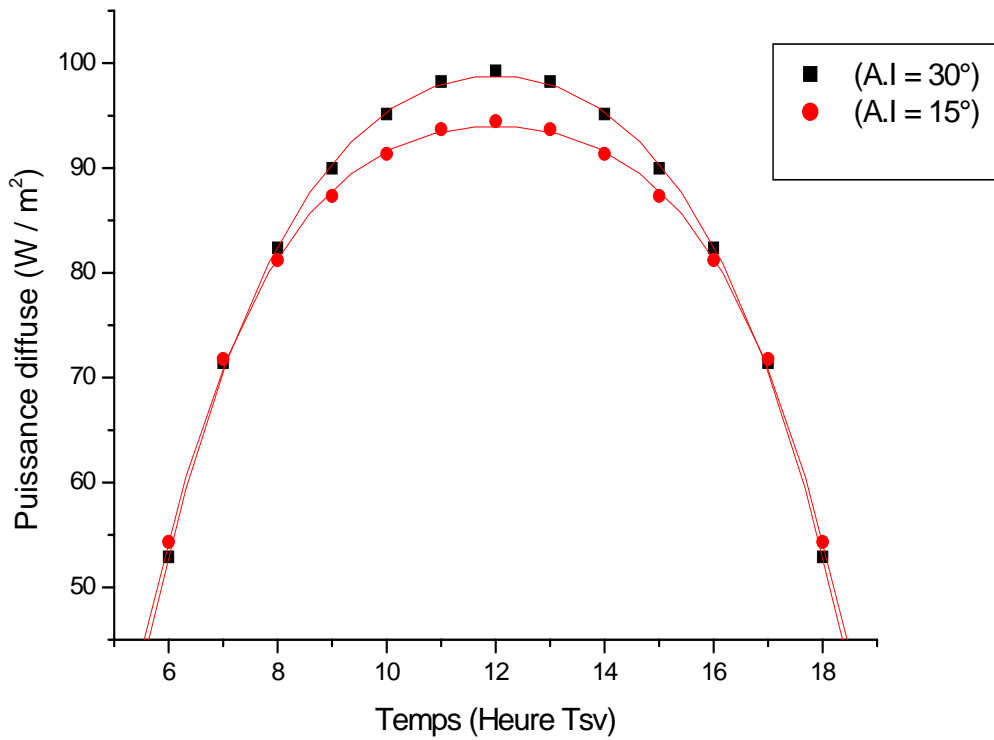
(Fig.3.21) Variation de la température ambiante durant la journée du 15 Juillet.



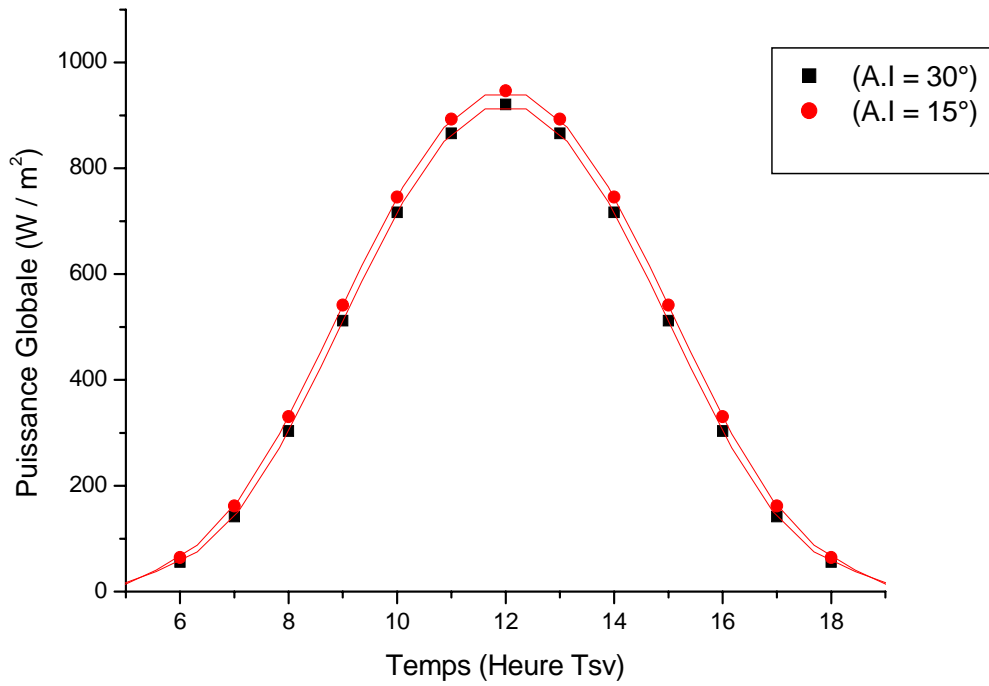
(Fig.3.22) Influence de l'inclinaison sur la puissance Directe.



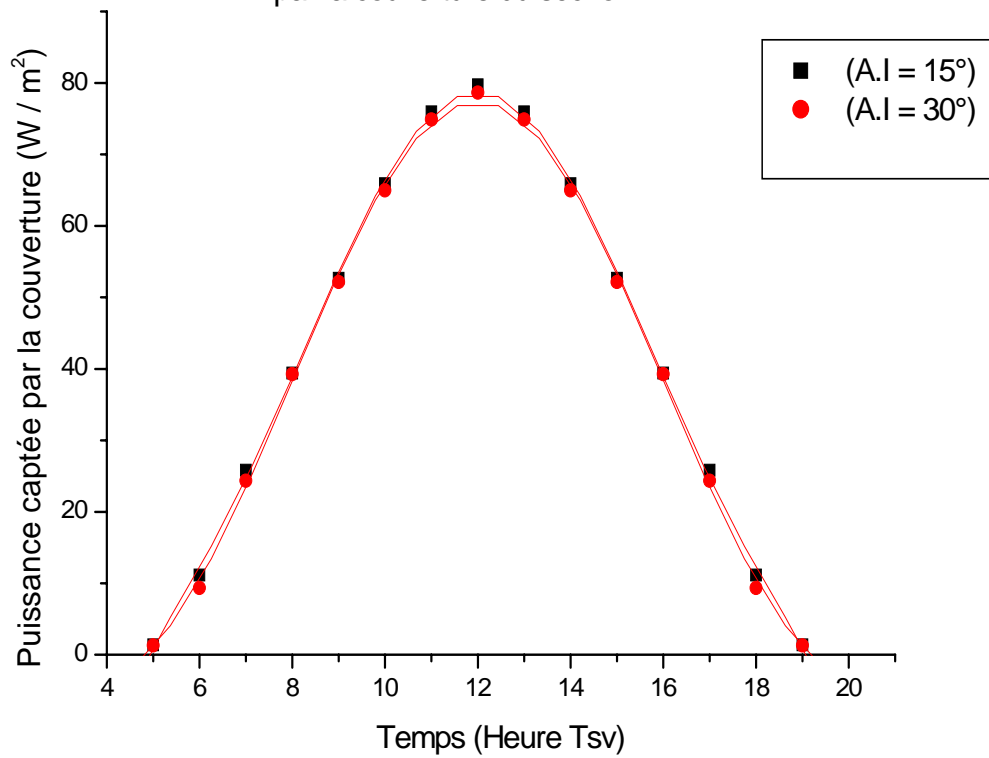
(Fig.3.23) Influence de l'inclinaison sur la puissance diffuse.



(Fig.3.24) Influence de l'inclinaison sur la puissance Globale.

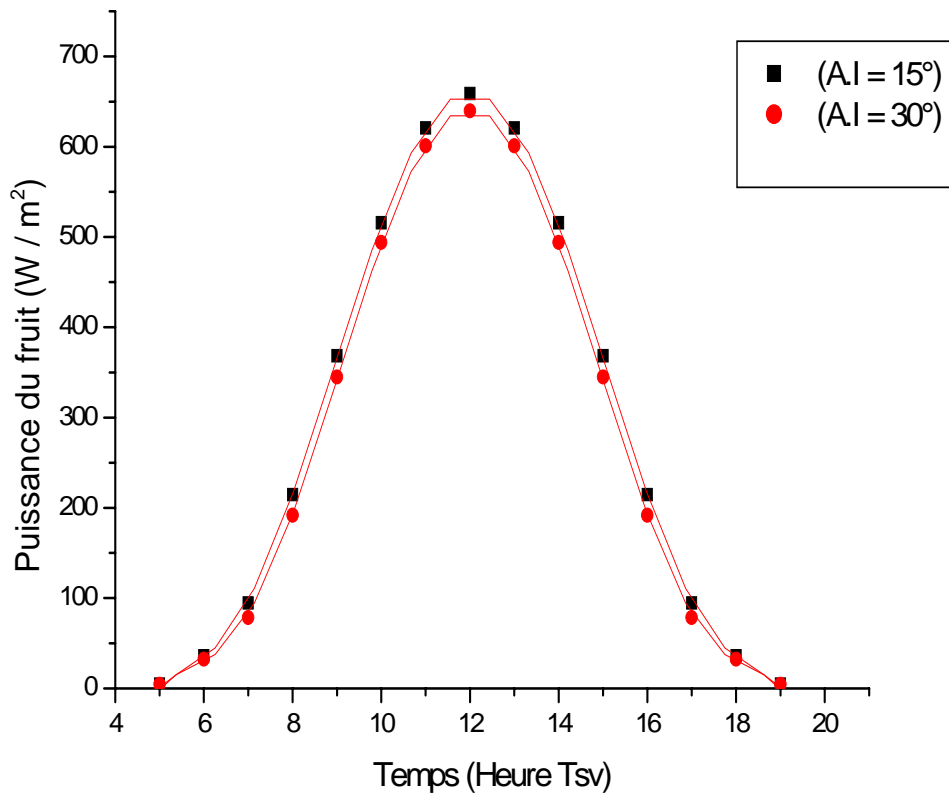


(Fig.3.25) Influence de l'angle d'inclinaison sur la puissance captée par la couverture du séchoir.





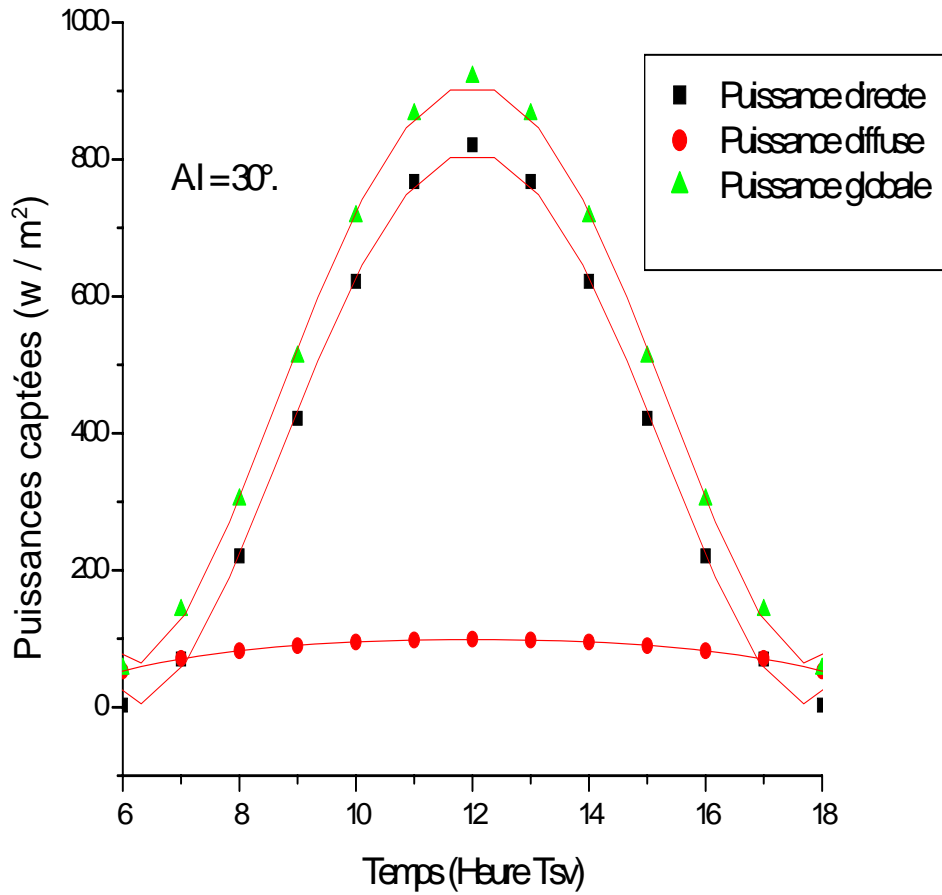
(Fig.3.26) Influence de l'inclinaison sur la puissance captée par le fruit.



### Intensité du rayonnement solaire

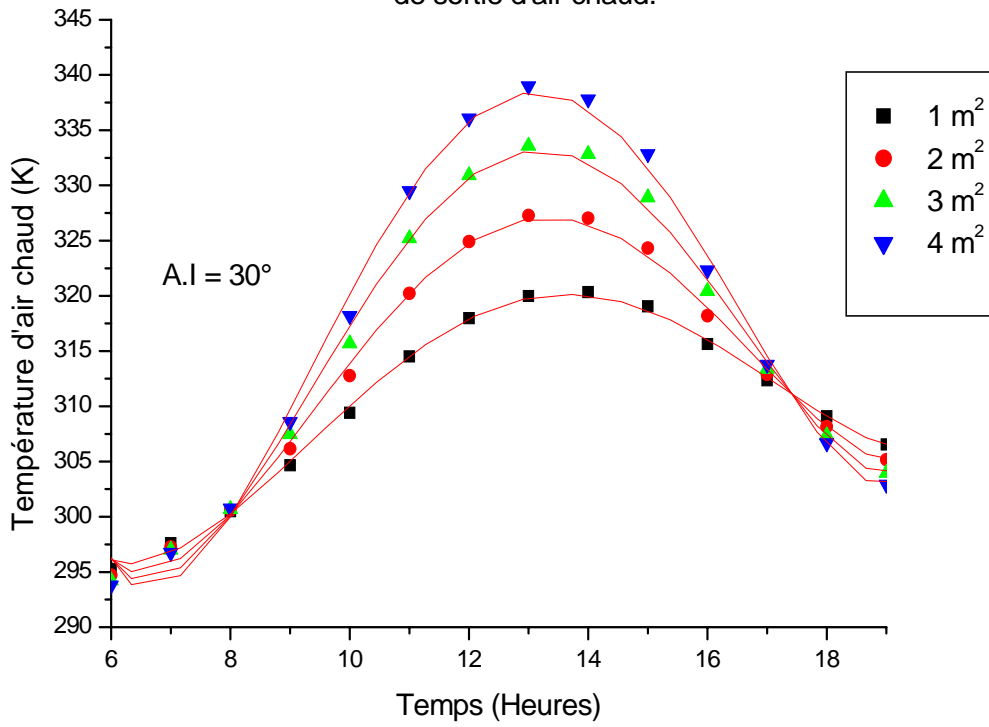
La figure (3.27) illustre l'évolution théorique des composantes : incidente, diffuse et globale du rayonnement solaire. L'intensité lumineuse incidente (directe) augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur théorique maximale de  $821.327 \text{ (W/m}^2\text{)}$  à 12 Tsv (12h 39 min heure locale), **ATLAS-** [27], puis chute pour ne plus en recevoir à 18h Tsv (18h 39 min heure locale). Pour ce qui est du rayonnement diffus, nous pouvons voir que le maximum est de  $99.26928 \text{ (W/m}^2\text{)}$ , soit 11% de l'éclairement énergétique total. Étant le résultat de la somme des rayonnements diffus et direct, la distribution du rayonnement global atteint une valeur théorique maximale de  $920.5966 \text{ (W/m}^2\text{)}$  (figure 3.27). Une similitude est notée entre les courbes expérimentales réalisées par **R.BENKHELFELLAH** et al [16] et les courbes théoriques réalisées par ce travail (voir études antérieures).

(Fig.3.27) variation des différentes puissances captées au cours du 15 juillet.

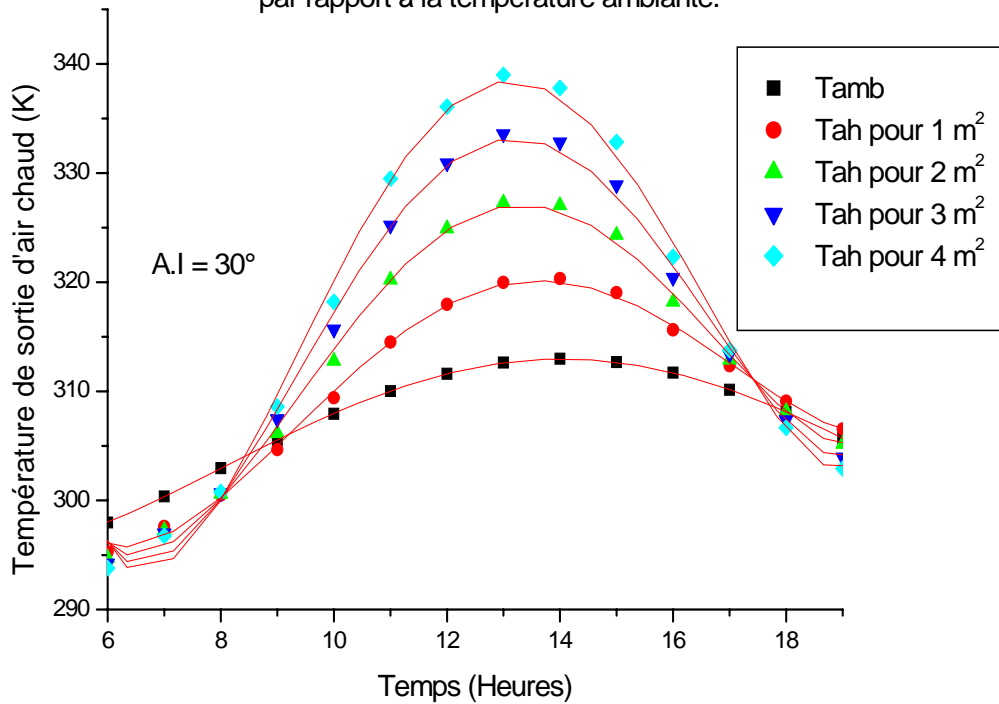


Pour la journée en question, le rayonnement global est absorbé par le collecteur et le compartiment séchage, transformé en énergie thermique et conduit à l'air de séchage. Avec le rayonnement, la température de l'air de séchage augmente et atteint à l'entrée du séchoir des températures qui varient avec la surface du capteur, voir les figures (3.28) et (3.29).

(Fig.3.28) Influence de la surface du capteur sur la température de sortie d'air chaud.



(Fig.3.29) Comparaison des différentes températures de sortie d'air chaud par rapport à la température ambiante.



La figure (3.29) illustre la variation de la température de sortie du capteur en fonction de sa surface (pour les conditions normales du séchage). Ce n'est que vers 6 heures que le capteur commence à recevoir de l'énergie solaire. Cette énergie sert au début à réchauffer les éléments du capteur (l'inertie thermique). C'est pourquoi, au cours des deux premières heures, la variation de la température de sortie de l'air du capteur n'est pas très importante (inférieure à la température ambiante). La puissance absorbée pour chauffer les éléments du capteur ayant une surface d' 1 (m<sup>2</sup>) est insuffisante pour chauffer celle de 4 (m<sup>2</sup>). En conséquence; les températures de sortie de l'air du capteur ayant une faible surface sont plus chaudes que celles ayant une plus grande surface (avant 8 heures). A huit heures, l'équilibre s'établit, les températures de sortie des quatre surfaces du capteur sont voisines les unes des autres et ayant à peu près la valeur de 300.5 (k). Après huit heures, la température de l'air de sortie du capteur devient une fonction croissante de la puissance globale et de la surface de captation.

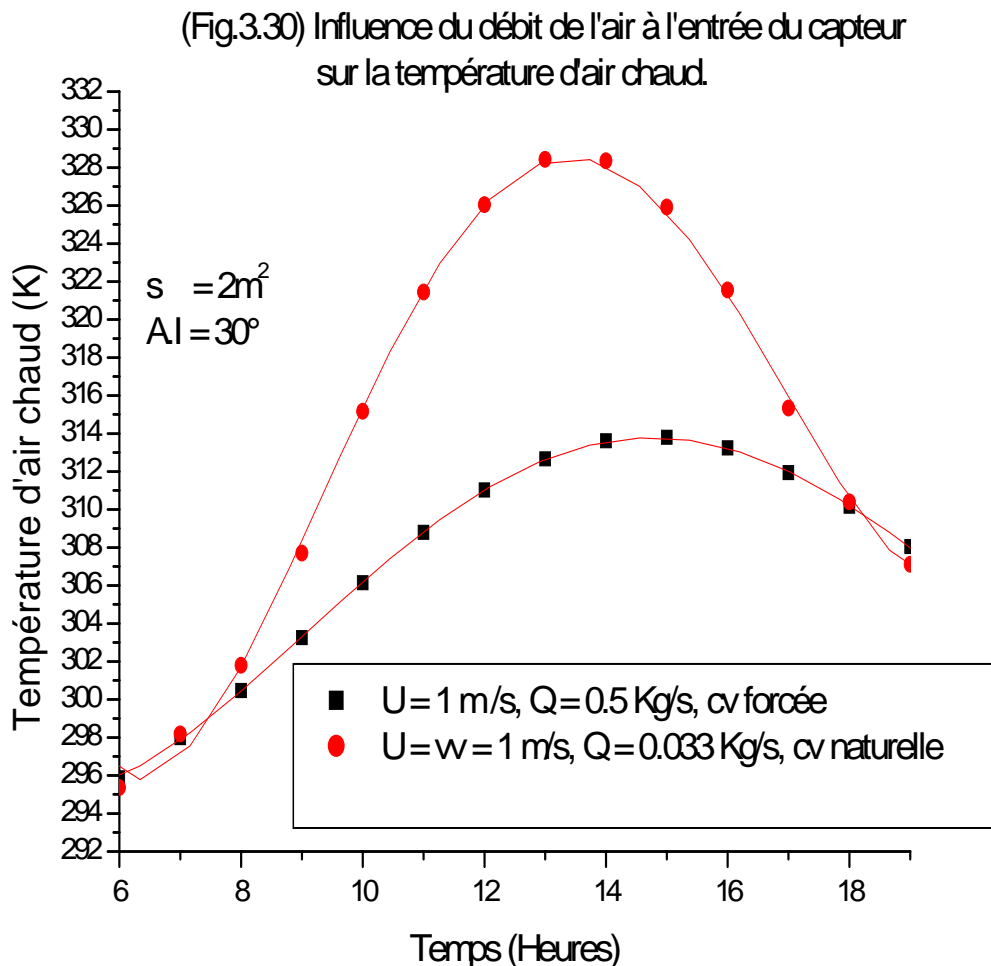
Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par **L.BENNAMOUN**-[24] dans son étude théorique et par **L.AISSANI** [18] lors de son étude théorique et expérimentale, effectuée à Constantine.

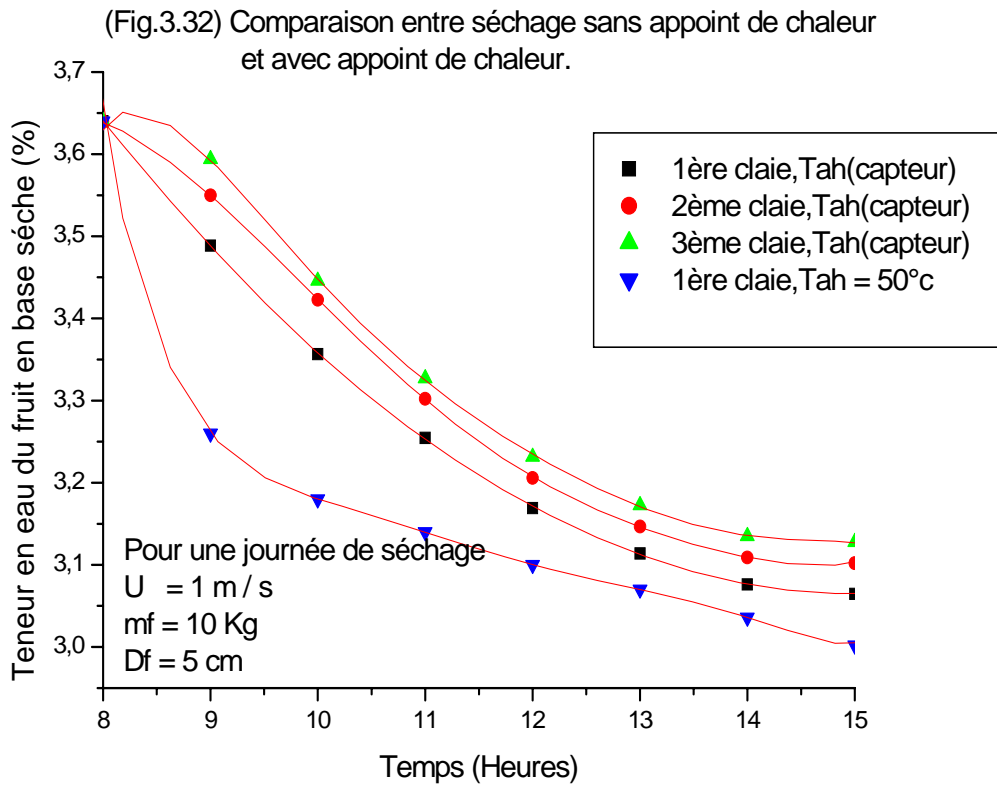
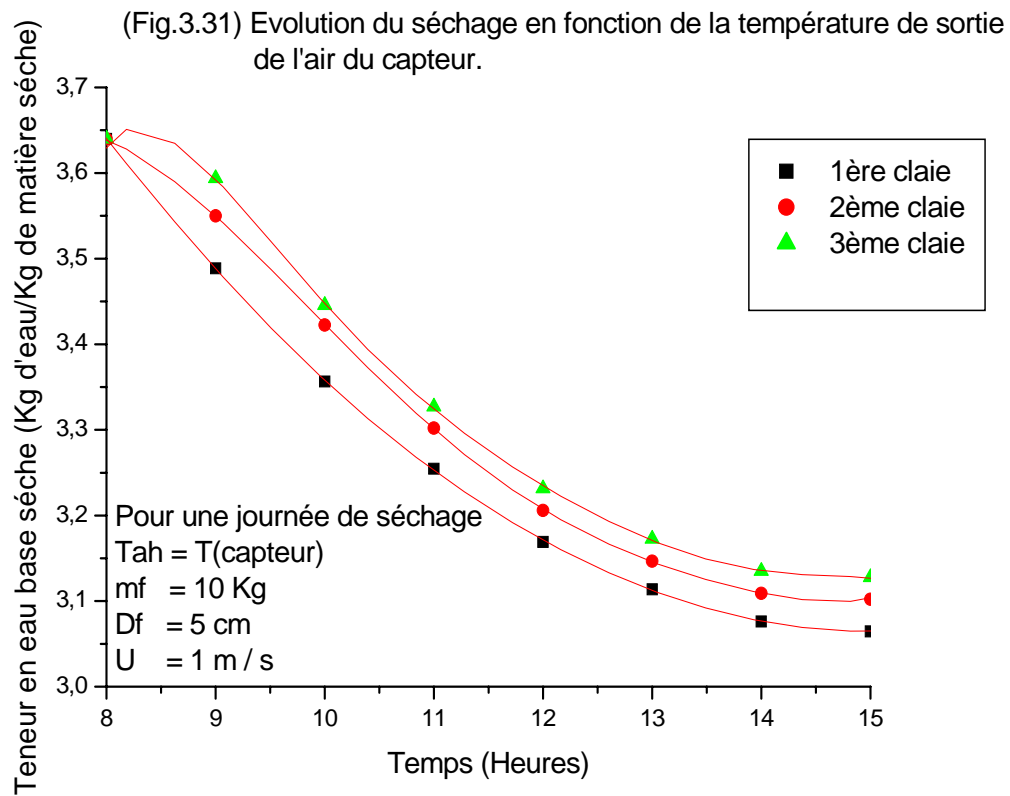
Dans la plage des débits considérés, il est à remarquer que pour augmenter les températures de sortie de l'air du capteur (pour accélérer le séchage); il faut utiliser des faibles débits. Autrement dit; la tension d'alimentation du ventilateur doit être faible. Seulement, le pouvoir évaporatoire d'un tel débit est faible, aussi il y a risque de surchauffe au sein du séchoir. C'est pourquoi, il est recommandé d'augmenter le débit d'air tout en augmentant la surface du capteur, **GTZ** Maroc-[20]. Car; les températures de sortie dans ce cas là sont beaucoup inférieures à celles obtenues par convection naturelle. Ceci est aussi conforme aux résultats sur site obtenus par **GTZ**- [20] et à **KANDAHAR**- [21], voir la figure (3.30).

La teneur en eau du produit est une fonction décroissante de la température de sortie de l'air du capteur. En d'autres termes, plus la température augmente et plus la teneur en eau du produit diminue, voir la figure (3.31). L'opération du séchage ne commence qu'une fois la température d'équilibre est atteinte, le séchage est arrêté comme dans la plupart des séchoirs solaires à 15 heures. La même évolution du séchage est constatée au niveau des claies que précédemment; les fruits à l'entrée du séchoir sèchent plus vite que les fruits à sa sortie. Car, l'air à

l'entrée est plus chaud, au fur et à mesure qu'il traverse le séchoir, il perd de sa chaleur et gagne en vapeur, à cause de l'évaporation de l'eau au niveau des premières claies.

Pour accélérer le séchage, il est nécessaire d'adjoindre un chauffage d'appoint au système, voir figure (3.32). Ainsi, le séchage peut débuter très tôt (température de séchage initiale importante ici égale à 50°C au lieu de 23°C) et ne pas s'arrêter pendant tous les jours du séchage. Ceci a été testé par **GTZ** Maroc-[20], et à **KANDAHAR**- [21], ça a donné de très bons résultats, le temps de séchage a diminué de plus d'une semaine à trois jours seulement.





### **III - 5 CONCLUSION :**

Le modèle étudié est régi des lois du transfert de chaleur et de masse. Les résultats obtenus sont en parfaite concordance avec ces lois.

L'étude du régime transitoire nous a permis de tester divers paramètres et d'en déduire les plus influents sur le séchage.

L'augmentation du débit et de la température de l'air chaud à l'entrée du séchoir réduisent considérablement Le temps de séchage. Contrairement à l'augmentation du diamètre et de la masse du fruit.

Dans notre système l'ensoleillement contribue à l'élévation de la température du fruit, mais pas vraiment à la vitesse de séchage.

En traversant le séchoir, l'air se refroidit en cédant de la chaleur et en absorbant de la vapeur. Contrairement à l'air ; les températures des fruits augmentent à cause de leur absorption du rayonnement solaire.

Avec un faible débit les températures de l'air de séchage augmentent, sans pour autant accélérer le séchage des fruits. Ceci peut être expliqué par le faible pouvoir évaporatoire de cet air. D'où l'augmentation du débit est nécessaire tout en augmentant la surface de captation du rayonnement solaire pour avoir des températures de séchage satisfaisantes.

Le rajout d'un chauffage d'appoint est impérativement recommandé, car il compense le déficit des températures de sortie de l'air du capteur. Par suite la vitesse de séchage s'accroît alors que sa durée de séchage décroît.

Il est recommandé de placer un lit de cailloux (granite par exemple), sur la face inférieure du séchoir, afin de stocker l'énergie solaire du jour pour la restituer quand l'intensité du rayonnement diminue ou disparaît.

## Conclusion générale

L'étude présentée combine les deux types de séchage : séchage direct et séchage indirect. C'est pourquoi, l'étude est divisée en deux parties. L'une traitant le capteur solaire et l'autre le séchoir solaire. Cette dernière passe par la cinétique de séchage où un modèle expérimental, traitant le séchage des tranches d'abricots a été adopté.

Le séchoir choisi, est de conception artisanale. Il est fabriqué à partir de matériaux locaux et n'utilisant pas les techniques sophistiquées qui sont fort coûteuses.

Afin de le rendre rentable et d'accélérer le processus de séchage; un capteur plan à air, de conception très simple, lui a été couplé.

L'étude entreprise est adaptée à la région de Constantine. La journée du 15 Juillet est choisie pour ses innombrables caractéristiques : ciel clair, températures ambiantes élevées et des puissances de rayonnement solaire importantes.

L'étude simule numériquement le comportement de tout le système; teste l'influence des divers paramètres sur la vitesse de séchage et prédit le modèle de séchoir le plus approprié, réalisant ainsi les meilleures performances.

Pour que la simulation garde son intérêt, un modèle physique est établi, traduisant le mieux possible, les différents transferts thermiques et massiques dont le système réel est le siège.

La méthode adaptée consiste à découper fictivement le capteur et le séchoir en tranches dans le sens du courant d'air. L'air est prélevé du milieu ambiant et préchauffé dans le capteur, balaie sous l'action d'un ventilateur, l'ensemble du séchoir. Il s'humidifie au contact des fruits et se refroidit. Ce qui diminue son pouvoir évaporatoire et augmente le temps de séchage au niveau des autres claies. C'est la raison pour laquelle un chauffage d'appoint est utilisé. Par conséquence, le paramètre le plus influent est la température de l'air chaud. Plus elle augmente et plus le séchage est rapide.



L'étude montre aussi une différence de séchage du produit des diverses claies du séchoir. Elle montre que plus l'air passe par des claies et plus il s'humidifie, d'où une augmentation du débit est souhaitable. Autrement dit, la vitesse de l'air de séchage est également un paramètre influent sur le séchage.

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

Le rajout du chauffage d'appoint, accélère le processus de séchage et tend à l'uniformiser au niveau des différentes claies. Son utilisation peut également donner une indépendance des conditions climatiques.

L'idée consistait au début de baisser la température du fruit afin d'éviter sa détérioration; c'est pourquoi l'absorbeur du séchoir a été supprimé. Hélas; en fin de compte, il s'est avéré qu'il est responsable de chauffer l'air grâce aux échanges convectifs avec ce dernier. L'accroissement de la température du fruit est dû essentiellement à l'absorption de ce dernier du rayonnement solaire. Il est donc intéressant de reprendre l'étude en incorporant l'absorbeur et en jouant sur les paramètres climatiques tels : l'angle d'inclinaison et l'orientation du séchoir qui ne devraient pas être les mêmes pour le séchoir et le capteur et ainsi diminuer la puissance solaire absorbée par le fruit. On peut également utiliser un absorbeur strié au niveau du capteur afin de diminuer la surface de ce dernier et d'augmenter la température de sortie de l'air chaud.

- [1] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés  
Séchage  
Théorie et calculs.  
Par André Charreau et Roland Cavallé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [2] A. Gauthier  
Industries alimentaires et agricoles, juin 1990 ;  
Citée par L. Bennamoun.
- [3] A. Bondil et J. Hrabovsky  
Isolation thermique ; tome 1, édition Eyrolles.
- [4] S. Whitaker  
Heat and mass transfer in granular porous media,  
Advances in drying I, Hemisphere publication, 1980, pp. 23-16 ;  
Cited par L. Bennamoun.
- [5] M. Daguénet  
Les séchoirs solaires: théorie et pratique, 1985.
- [6] O.V. Ekechukwu, B. Norton  
Review of solar-energy drying systems II: an overview of  
Solar drying technology  
Energy Conversion Management 40 (1999) 615-655.
- [7] Robin Alexandre  
Sécheur solaire 2003 / 2004.
- [8] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés  
Séchage  
Appareillage et choix d'un procédé.  
Par André Charreau et Roland Cavallé, j 2484-2 ; 2484-16.
- [9] Microsoft Encarta 2006.

- [10] Roger Bernard  
Le rayonnement solaire  
conversion thermique et applications ; 2<sup>e</sup> édition, 1980.
- [11] D.K. Edwards / traduit par L. Marlot  
Capteurs solaires, 1979.
- [12] J.R.Vaillant  
Utilisation et promesses de l'énergie solaire, 1970.
- [13] B. Zeghmati  
Modélisation informatique d'un séchoir à effet de serre  
pour fruits et légumes.  
International solar gas heating workshop. Decembre 17-22, 1979.
- [14] PENSIFS.com ; rubrique économique  
Séchage solaire.
- [15] Surkhmcet Singh  
Technical note  
Multi-shelf portable solar dryer  
Renewable energy 29 (2004) 753-765.
- [16] R.Benkhefella, S.El Mokretar, R.Miri et M.Belhamel  
Séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir solaire direct.  
Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [17] J.NGANHOU, TNGANYA  
Simulation numérique du comportement dynamique d'un système  
de séchage solaire de fèves de Cacao au Cameroun ;  
doc. Extré du PBA 1 / article 40-2003.

- [18] L.Aissani  
Etude et réalisation d'un séchoir solaire pour fruits et légumes.  
Thèse de Magister – Université de Constantine, 1988.
- [19] Inci Turk Togrul et Dursun Pehlivan  
Modelling of drying Kinetics of single apricot  
Journal of food Engineering 58 (2003) 23-32.
- [20] GTZ Maroc  
Manuel du séchage au Maroc, 1995.
- [21] Association DARAH  
Transformation de fruits à Kandahar (Afghanistan) 2-2  
Dimensionnement et caractéristiques de l'installation.
- [22] أبو مصباح  
2007 مارس تصنيع غذائي و تجفيف الفاكهة  
الملتقى الزراعي - وزارة الزراعة- فلسطين
- [23] Yves Jannot  
Transferts thermiques, 2003.
- [24] Lyes Bennamoun  
Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local.  
Thèse de Magister – Université de Constantine, 2001.
- [25] André.B.De vriendt  
La transmission de la chaleur, Volume 2  
Introduction au rayonnement thermique, 1984.
- [26] Recknagel  
Manuel pratique du génie climatique, 2<sup>e</sup> édition, 1986.

- [27] Michel Capderou  
Atlas Solaire de l'Algérie,  
Office des publications Universitaires, Tome 3, Volume 2, 1986.
- [28] Robert Siegel  
Thermal radiation heat transfer,  
Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
- [29] E.Kavak Akpinar, Y.Bicer  
Mathematical modeling and experimental study on thin layer drying of  
Strawberry, Volume 2, Article 1, 2006.
- [30] H.Hallak, J.Hilal, F.Hilal et R.Rahhal  
The staircase solar dryer : design and characteristics  
1996 Elsevier science Ltd.
- [31] Abdelkader Lamharrar, M.Kouhila, A.Idlimam, A.Jamali, N.Kechaou  
Séchage solaire convectif en couches minces des feuilles d'Absinthe,  
12<sup>èmes</sup> journées internationales de thermique,  
Tanger, Maroc, du 15 au 17/11/2005.
- [32] Madamba  
The thin layer drying characteristics of garlic slices.  
Journal of food Engineering, 29,75-97.
- [33] GERES  
Le séchage solaire des fruits en Himalaya, 24 janvier 2003.
- [34] PH. Dudez, A.Thémelin et M.Reynes (CIRAD).  
Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes  
Expériences et procédés, GRET 1996.

- [35] Si. Youcef Youcef  
L'analyse numérique en langage 'C'  
Edition El Maarifa, 2001.
- [36] Goodfellow  
Information sur matériaux  
Caractéristiques thermiques du Polycarbonate (PC), on line source.
- [37] Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre  
Indice de réfraction, février 2007.
- [38] A. El Bouardi, H.Ezbakhe, T.Ajzoul.  
Dimensionnement et optimisation énergétique  
d'une installation de séchage solaire, 2002.

## - ANNEXE A -

### Aperçu général de la méthode de Gauss – Seidel, SI. YUCEF- [35]

Les étapes de calcul: soit le système suivant

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{bmatrix}$$

Mettre le système sous la forme de  $X = F(x)$ . Résoudre pour cela chaque équation 'i' par rapport à  $x_i$  nous obtenons:

$$X_1 = [y_1 - (a_{1,2} x_2 + a_{1,3} x_3 + a_{1,4} x_4 + a_{1,5} x_5)] / a_{1,1}$$

$$X_2 = [y_2 - (a_{2,1} x_1 + a_{2,3} x_3 + a_{2,4} x_4 + a_{2,5} x_5)] / a_{2,2}$$

$$X_3 = [y_3 - (a_{3,1} x_1 + a_{3,2} x_2 + a_{3,4} x_4 + a_{3,5} x_5)] / a_{3,3}$$

$$X_4 = [y_4 - (a_{4,1} x_1 + a_{4,2} x_2 + a_{4,3} x_3 + a_{4,5} x_5)] / a_{4,4}$$

$$X_5 = [y_5 - (a_{5,1} x_1 + a_{5,2} x_2 + a_{5,3} x_3 + a_{5,4} x_4)] / a_{5,5}$$

Choisir arbitrairement un vecteur initial  $X^0$  tel que:

$$X^0 = \begin{Bmatrix} X_1^0 \\ X_2^0 \\ X_3^0 \\ X_4^0 \\ X_5^0 \end{Bmatrix}$$

Et à partir de la 1<sup>ère</sup> équation, calculer  $x_1$  par substitution des  $X_i^0$  aux  $X_i$  dans le deuxième membre.

$$X_1^1 = [y_1 - (a_{1,2} X_2^0 + a_{1,3} X_3^0 + a_{1,4} X_4^0 + a_{1,5} X_5^0)] / a_{1,1}$$

De la 2<sup>ème</sup> équation actualiser la valeur de  $X_1^0$  et calculer  $X_2$  de la même façon que pour  $X_1^1$

$$X_2^1 = [y_2 - (a_{2,1} X_1^1 + a_{2,3} X_3^0 + a_{2,4} X_4^0 + a_{2,5} X_5^0)] / a_{2,2}$$

Procéder de même à partir de la 3ème et calculer  $X_3^1$  en actualisant  $X_2$

$$X_3^1 = [y_3 - (a_{3,1} X_1^1 + a_{3,2} X_2^1 + a_{3,4} X_4^0 + a_{3,5} X_5^0)] / a_{3,3}$$

De même pour  $X_4$ , le calculer de la 4ème équation pour obtenir :

$$X_4^1 = [y_4 - (a_{4,1} X_1^1 + a_{4,2} X_2^1 + a_{4,3} X_3^1 + a_{4,5} X_5^0)] / a_{4,4}$$

Enfin, calculer  $X_5$  de la 5ème équation :

$$X_5^1 = [y_5 - (a_{5,1} X_1^1 + a_{5,2} X_2^1 + a_{5,3} X_3^1 + a_{5,4} X_4^1)] / a_{5,5}$$

Un second vecteur  $X_1$  est ainsi généré qui a la forme suivante :

$$X^1 = \begin{Bmatrix} X_1^1 \\ X_2^1 \\ X_3^1 \\ X_4^1 \\ X_5^1 \end{Bmatrix}$$

Les composantes de ce nouveau vecteur serviront à calculer un autre vecteur  $X_2$ .

Le processus sera répété jusqu'à ce que la différence entre 2 vecteurs successifs

$X^i$  et  $X^{i-1}$  soit inférieure à la précision tolérée ' $\varepsilon$ ' et à ce moment nous dirons que le processus a convergé vers la solution  $X^i$ .

**Rq:** la méthode de Gauss – Seidel converge si la condition:

$$|a_{i,i}| > \sum_{j=1}^n |a_{i,j}| \quad (1 < i < n) \text{ \& } (j \neq i) \text{ est vérifiée.}$$