



**Université Kasdi Merbah Ouargla**

**FACULTE DES SCIENCES  
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**Resumé de mémoire de magister**

**Spécialité : Physique**

**Option : Physique énérgétique**

**Thème**

**RECHERCHE DES CONDITIONS OPTIMALES DE  
FONCTIONNEMENT D'UN SECHOIR SOLAIRE**

Réalisé par :  
**Nadia Nadir**

Dirigé par:  
**Mr: Bachir. Bouchekima**  
**Mr: Slimane. Boughali**

## REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie **Dieu** qui ma aidé à réaliser ce travail.

Je remercie mon encadreur Monsieur **Bachir Bouchejkima**, Professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux, et la compétence de son encadrement.

J'exprime tous mes remerciements à mon co-encadreur Monsieur **Slimane Boughali**, maître assistant chargé de cours à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour tous ses efforts, ses soigneux conseils et tout son soutien physique dont j'avait besoin. Je le remercie beaucoup pour sa patience et pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Je remercie Monsieur **Omar Boukraa**, Maître de Conférences à l'université Kasdi Marbah, Ouargla, pour avoir accepté de présider ce jury.

Je remercie vivement Messieurs **Ahmed Benzaoui**, Maître de Conférences à l'USTHB Alger, et **Salah Dounit**, Maître de conférences à l'université Kasdi Merbah, Ouargla, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également, Monsieur **Djamel Bechki**, Monsieur **Djamel Mennouche** et **Madame Rahim**, Maîtres assistants chargés de cours à l'université de Ouargla, pour leurs aides, leurs conseils, ainsi que leurs encouragements.

Une attention particulière à ma chère amie **Roukja Mahdadi**, et son époux Monsieur **Saïd Mahdadi**, pour leurs disponibilités dont j'avais besoin, et leur aide tout au long de cette étude.

Je remercie mes amies : R. Yamina, B. Souad, B. Warda, T. Khadidja, B. Fella pour leur soutien moral et leur aide durant mon travail. Enfin je passe un grand remerciement à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire

---

## Résumé

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de séchage par convection forcée d'un produit agro-alimentaire (la tomate) dans un séchoir solaire indirect muni d'un appoint électrique. L'objectif de ce travail vise d'une part l'étude de l'effet des paramètres de l'air asséchant (température et vitesse), l'épaisseur du produit et le prétraitement dans une solution (sel, sucre et calcium) sur la durée du séchage. D'autre part, le calcul de la diffusivité efficace, de l'énergie d'activation et l'approche des résultats expérimentaux par un modèle mathématique ont été effectués.

**Mot clés :** séchage, séchage solaire, tomate, paramètre de fonctionnement, diffusivité efficace, modèle mathématique.

## Abstract

This work presents the results of an experimental study concerning drying of tomato in a partial solar dryer which functions by forced convection. The objective of this work aims to study on one hand the effect of drying air parameter (temperature and velocity), slice thickness and the pré-treatment in a solution (salt, sucrose and calcium) on the drying time. On the other hand, to calculate the effective diffusivity and the activation energy. The experimental results were fitted with mathematical models.

**Keywords :** Drying, solar drying, tomato, effective diffusivity, activation energy, mathematical models.

## ملخص

هذا العمل يمثل النتائج المتحصل عليها من دراسة تجريبية للتجفيف بالحمل القسري للمنتوج زراعي-غذائي (الطماطم) وذلك باستعمال مجفف شمسي غير مباشر مزود بطاقة كهربائية مكملة. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير عوامل هواء التجفيف (درجة الحرارة و السرعة), سمك العينة و المعالجة قبل التجفيف بمحلول مكون من ( ملح سكر وكالسيوم) على زمن التجفيف من جهة و من جهة أخرى حساب الانتشارية الفعالة و الطاقة الفعالية و تقريب النتائج المتحصل عليها بنموذج رياضي.

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف, التجفيف بالطاقة الشمسية, طماطم, انتشارية فعالة, نموذج رياضي.

# Sommaire

## REMERCIEMENTS

## NOTATIONS

## LISTE DES FIGURES

## INTRODUCTION

01

## CHAPITRE I : Notions générales sur le séchage

### I. Généralités

04

#### I.1. Définition

#### I.2. Gisement solaire

I.2.1 Données relatives au soleil	04
I.2.2. Mouvements de la terre	04
I.2.3. Rayonnement solaire hors atmosphère	04
I.2.4. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	05
I.2.5. Rayonnement solaire au niveau du sol	06
I.2.6. L'éclairement solaire	07

#### I.3. L'air humide

08

I.3.1. Définition des principaux paramètres caractérisant l'air humide	08
I.3.1.1. Humidité relative	08
I.3.1.2. Humidité absolue	08
I.3.1.3. Degré de saturation	09
I.3.1.4. Températures caractéristiques de l'air humide	09
I.3.1.4.1. Température sèche «température de bulbe sec »	09
I.3.1.4.2. Température humide«température de bulbe humide »	09
I.3.1.4.3. Température de rosée	09

I.3.2. Diagramme de l'air humide	10
----------------------------------	----

#### I.4. Les milieux poreux

10

I.4.1. Répartition de l'eau dans les milieux poreux	11
I.4.2. Propriétés du milieu poreux	11
I.4.2.1. La porosité	11

I.4.2.2. La perméabilité	12
I.4.3. Caractérisation des solides humides	12
I.4.3.1. Humidité absolue	12
I.4.3.2. Humidité relative	13
<b>I.5. Activité de l'eau</b>	<b>13</b>
<b>I.6. Isothermes de sorption</b>	<b>13</b>
<b>I.7. Séchage et mouillage d'un solide</b>	<b>15</b>
<b>I.8. Les phénomènes physiques dans le produit lors du séchage</b>	<b>16</b>
<b>I.9. Méthodes de séchage</b>	<b>17</b>
I.8.1. Séchage par convection	17
I.8.2. Séchage par conduction	17
I.8.3. Séchage par rayonnement	17
<b>I.10. Vitesse de séchage</b>	<b>17</b>
<b>I.11. Cinétique du séchage</b>	<b>18</b>
<b>I.12. Classification des systèmes de séchage à énergie solaire</b>	<b>19</b>
I.12.1. Systèmes de séchage à énergie solaire passifs	20
I.12.1.1. Les séchoirs solaires directs	20
I.12.1.2. Les séchoirs solaires indirects	21
I.12.1.3. Les séchoirs solaires mixtes	23
I.12.2. Systèmes de séchage à énergie solaire actifs «Les séchoirs hybrides »	23
<b>I.13. Capteurs solaires</b>	<b>24</b>
I.13.1. Bilan thermique du capteur	24
I.13.2. Rendement instantané d'un capteur	24

## **CHAPITRE II : Phénomènes des transferts appliqués au séchage solaire**

<b>II. Modes de transfert</b>	<b>27</b>
II.1. Transfert de chaleur	27
II.1.1. Transmission de la chaleur par conduction	27
II.1.2. Transfert de chaleur par convection	29
II.1.3. Transmission de la chaleur par rayonnement	32
II.2. Transfert de masse	36
II.2.1. Transfert de masse par diffusion moléculaire	36
II.2.2. Le coefficient de transfert de masse	37

## CHAPITRE III : étude expérimentale

<b>III. Introduction</b>	<b>40</b>
<b>III.1. Description du système de séchage</b>	<b>40</b>
III.1.1. Le générateur d'air chaud	40
III.1.2. La chambre de séchage	41
<b>III.2. Appareillages de mesures</b>	<b>41</b>
III.2.1. Mesure du rayonnement solaire	41
III.2.2. Mesure de la vitesse, température et humidité relative de l'air dans le séchoir	41
III.2.3. Les mesures externes	42
<b>III.3. Fonctionnement du système</b>	<b>42</b>
<b>III.4. Séchage de la tomate</b>	<b>42</b>
III.4.1. Préparation du produit	42
III.4.2. Détermination de la masse sèche du produit	43
III.4.3. Protocole expérimental	43
<b>III.5. Résultats expérimentaux</b>	<b>44</b>
III.5.1. L'effet du rayonnement sur la température	44
III.5.2. Profil des températures du produit et de l'air asséchant	50
III.5.3. L'effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	54
III.5.3.1. Influence de la température de l'air	54
III.5.3.2. Influence de la vitesse de l'air	56
III.5.4. Cinétique de séchage	58
III.5.5. Calcul de la diffusivité efficace	61
III.5.6. Energie d'activation	67
III.5.7. Influence de l'épaisseur du produit sur la cinétique de séchage	70
III.5.8. Influence du traitement sur la cinétique de séchage	73
III.5.8.1. Préparation des échantillons	74
III.5.8.2. La cinétique de séchage des échantillons traités	74
III.5.8.3. Détermination de la diffusivité efficace	76
III.5.9. Modèle mathématique des courbes de séchage	77
III.5.10. Evaluation de la couleur des tomates	87

<b>CONCLUSIONS</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>96</b>
<b>ANNEXES</b>	

### Introduction générale

Les fruits et les légumes jouent un rôle très important dans notre vie, puisqu'ils sont une source non seulement de fibres crues mais également d'aliments essentiels : vitamines, protides, glucides, lipides et sels minéraux...etc. La nature saisonnière de la production des fruits et légumes, ainsi que leur teneur élevée en eau qui les rend périssables, nous a amené à la recherche de différentes technologies pour les préserver et pour nous permettre de rendre ces produits disponibles à tout moment [1]. Le séchage est l'une des plus anciennes opérations unitaires qui permet la conservation des aliments par l'élimination partielle ou totale d'eau, auquel les réactions chimiques microbiennes de détérioration sont considérablement réduites au minimum. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant. [2]

Diverses techniques de séchage existent déjà ; elles se sont largement développées dans les zones arides et semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée. Les méthodes traditionnelles du séchage de fruits et de légumes consistent à exposer les produits au rayonnement direct des rayons solaires. Cette technique est facile et non coûteuse, mais elle a besoin d'un temps de séchage qui peut avoir des conséquences défavorables sur la qualité du produit : le produit final peut être souillé de la poussière et des insectes ou souffrir de l'enzyme et de l'activité microbienne [3]. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, des dispositifs de séchage fonctionnant à partir d'énergies diverses ont été mis au point. Parmi ces dispositifs, les séchoirs solaires s'avèrent être une solution particulièrement intéressante dans les zones rurales en raison de leur relative simplicité d'utilisation.

A cet effet, le séchoir installé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (L E N R E Z A) à l'université de Ouargla est un séchoir solaire indirect à convection forcée muni d'un appoint électrique permettant d'assurer une température constante et réglable à l'entrée de l'armoire de séchage. Ces doubles possibilités lui permettent d'assurer un fonctionnement toute l'année. Dans ce travail on s'intéresse particulièrement au séchage convectif des tomates. La tomate (*lycopersicon esculentum* ou *solanum lycopersicum*), est une plante herbacée de la famille des solanacées comme la pomme de terre. C'est une source de vitamines C, le rôle que joue la vitamine C dans l'organisme va au-delà de ses propriétés antioxydants. Elle contribue aussi à la santé des os, des cartilages, des dents et des gencives. La tomate contient également des minéraux et



oligoéléments essentiels (potassium, calcium, magnésium, cuivre, manganèse et zinc) qui aident à chasser la fatigue [4]. La tomate doit sa couleur rouge au bêta carotène et au lycopène. Le premier est un pigment caroténoïde qui a la propriété de protéger les cellules contre les attaques des radicaux libres, responsables du vieillissement. Le second est un antioxydant qui aide à réduire les risques de cancer (notamment de la prostate) et maladies cardio-vasculaires [5]. La tomate est le légume le plus généralement commercialisé au monde. La production de tomate au monde a atteint environ 125 millions de tonnes [6], l'Algérie a produit environ 500 milles tonnes de tomates en 2004 [7].

Les températures élevées ou les longs temps dans l'opération de séchage peuvent endommager sérieusement la saveur, la couleur et les aliments du produit. Les plus communs sont : la dégradation du colorant, particulièrement caroténoïdes comme le lycopène et l'oxydation de l'acide ascorbique. En agroalimentaire d'une façon générale, l'optimisation du processus de séchage est effectuée pour recommander des états de traitement rapides rapportant un produit de qualité acceptable [8].

L'objectif de ce travail consiste à rechercher les conditions optimales de fonctionnement des séchoirs solaires. Dans cette étude la première partie a été consacrée à l'étude de l'influence des diverses paramètres de l'air asséchant (température, débit), l'épaisseur de produit et le prétraitement sur la cinétique de séchage des tranches de tomate. La seconde partie concerne le calcul de la diffusivité efficaces, l'énergie d'activation, et l'approche par un modèle mathématique pour décrire le processus de séchage.

La présentation de ce mémoire est résumée selon le cheminement suivant :

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué la notion de gisement solaire ainsi une étude théorique qui consiste à résumer les phénomènes de transfert.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le phénomène de séchage en générale, les différents types de séchoirs solaires. Ainsi que la présentation des capteurs solaire.

Le troisième chapitre traite : le dispositif expérimental utilisé ainsi que les appareils de mesure et les résultats expérimentaux obtenus des séries des expériences.

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

## **I. Généralités**

### **I.1. Définition**

Le séchage est l'opération ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide. Le séchage met en jeu un transfert thermique (fourniture de chaleur permettant le changement de phase du liquide) et un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse).

### **I.2. Gisement solaire**

La connaissance du gisement solaire pour une région donnée est nécessaire pour les applications solaires, tels que le dimensionnement du système de conversion. La méthode la plus précise est la mesure directe avec les appareils de mesure.

#### **I.2.1 Données relatives au soleil [9]**

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 kms. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 kms de la terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes.

#### **I.2.2. Mouvements de la terre**

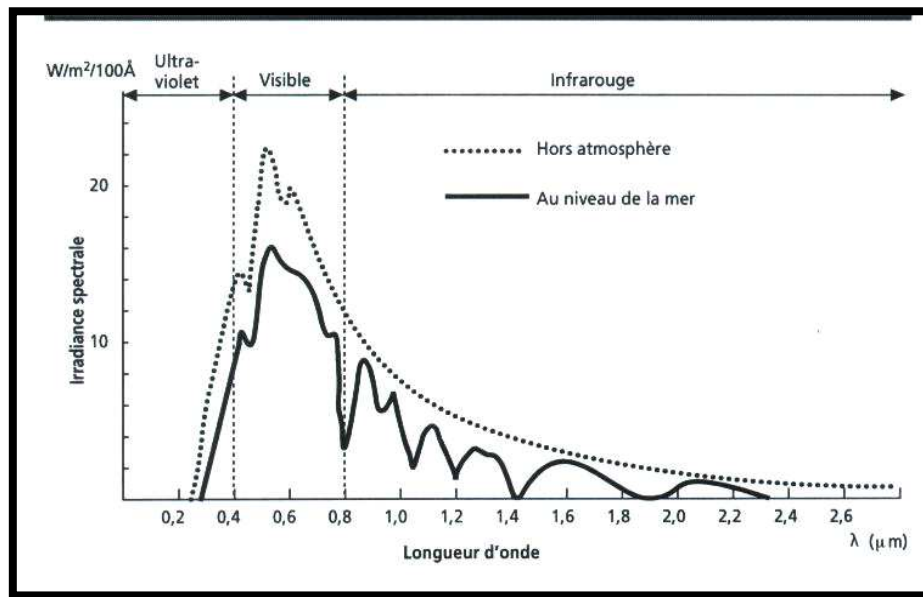
La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe un foyer. Selon sa position par rapport au soleil on a les différentes saisons. La distance terre-soleil varie donc peu au cours de l'année plus au moins 1,65 %. Elle est la plus faible (périgée) vers le début de janvier et la plus longue (apogée) début juillet.

#### **I.2.3. Rayonnement solaire hors atmosphère**

L'essentiel du rayonnement solaire hors atmosphère se trouve dans l'intervalle spectral 0,25 – 4  $\mu\text{m}$ . Nous pouvons voir sur la figure I-1 la répartition spectral de l'émission du corps noir à la température  $T = 5700 \text{ K}$ .

---

---



**Figure I.1: le spectre solaire**

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- ♦ Le domaine de l'ultraviolet ( $0,29 < \lambda < 0,4$ )  $\mu\text{m}$ , représente environ (9%) de l'énergie totale émise par le soleil.
- ♦ Le domaine du visible ( $0,4 < \lambda < 0,8$ )  $\mu\text{m}$ , représente (40%) de l'énergie totale.
- ♦ Le domaine de l'infrarouge ( $0,8 < \lambda < 3,5$ )  $\mu\text{m}$ , représente (51%) de l'énergie totale.

L'éclairement énergétique d'une surface placée perpendiculaire à l'axe soleil terre est en moyenne de  $1367 \text{w/m}^2$ , cette grandeur est appelée constante solaire, elle varie avec la distance terre soleil de plus ou moins (3,5%) au cours de l'année.

#### **I.2.4. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire**

Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dus principalement aux phénomènes d'absorption et /ou de diffusion causée par les aérosols (poussière de diverses origines), ainsi que par les molécules d'eau et les différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc.) présents dans la couche atmosphérique enveloppante. Ces modifications apportées au rayonnement dépendent de plusieurs facteurs variables avec le lieu et le temps (composition de l'atmosphère, épaisseur...). La référence spectrale pour un éclairement donné est obtenue en regroupant ces facteur en un seul paramètre représentant l'épaisseur de l'atmosphère traversée.

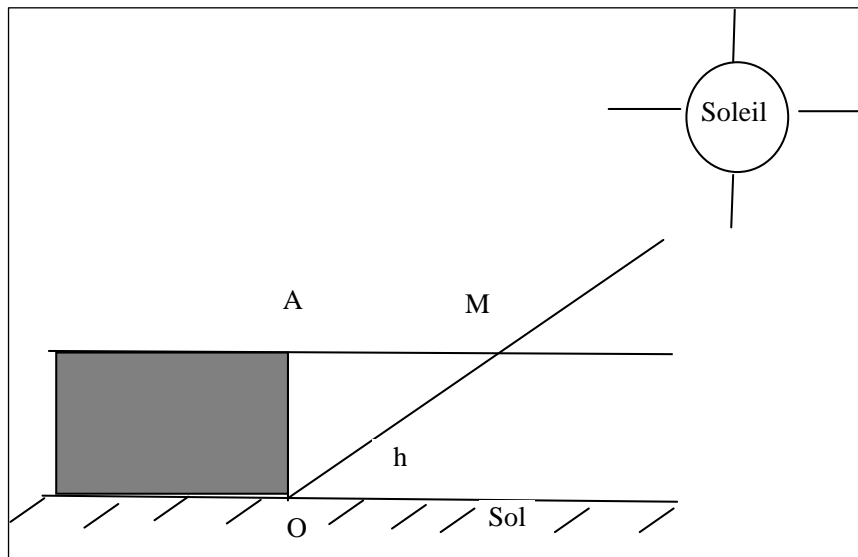
Ce paramètre appelé «masse atmosphère » ou «le nombre d'air masse»  $m$ , il est la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer figure I- 2.

A l'aide des points O, A et M et cet angle  $h$ , on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h}$$

Et on appelle  $m$  le rapport :

$$\frac{OM}{OA} \Rightarrow m = \frac{1}{\sin h}$$



**Figure I .2: la masse d'air**

### I.2.5. Rayonnement solaire au niveau du sol

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, sans diffusion par l'atmosphère : l'autre sera diffusé une autre composante du rayonnement est mise en évidence, c'est a partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol. Cette partie s'appelle L'ALBIDO, et qui varie en fonction du sol et de son état. Le rayonnement globale est défini comme étant la somme du rayonnement direct et diffus Figure I-3 [10].

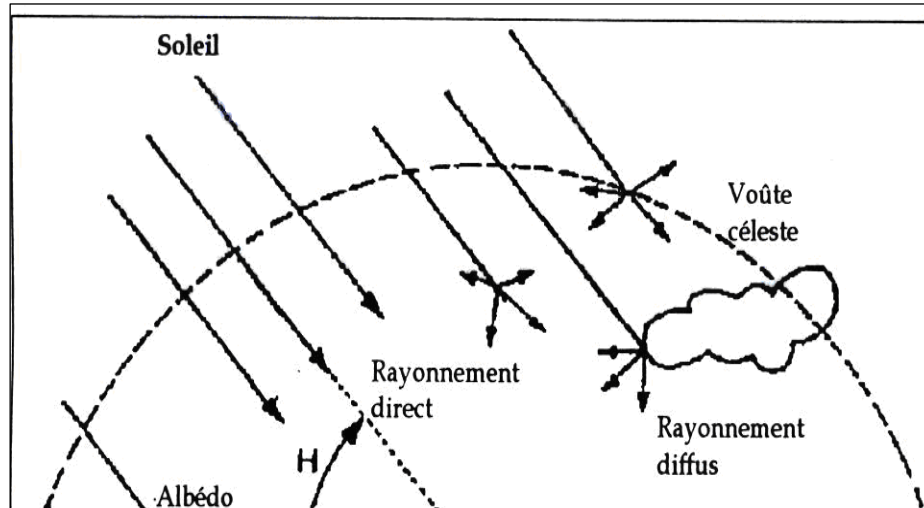


Figure I.3 : Bilan du rayonnement solaire au niveau du sol

### I.2.6. L'éclairement solaire

On introduit la relation de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux dans les conditions atmosphérique, cette densité de puissance atteint  $1 \text{ kw/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer.

Il est important de préciser que chaque fois nous parlerons de puissance du rayonnement solaire rapporté à une surface de un mètre carré, nous utiliserons le terme d'éclairement solaire ( $\text{w/m}^2$  ou  $\text{kw/m}^2$ ). Pour les énergies nous utiliserons le terme d'irradiation solaire exprimé en  $\text{wh/m}^2$  ou  $\text{kwh/m}^2$  [9].

### I.3. L'air humide [11]

L'air atmosphérique est un mélange, en proportions variable, d'air sec et de vapeur d'eau. L'air sec est lui-même un mélange de gaz, mais dont les proportions sont invariables, du moins pour les principaux constituants (Azote, Oxygène et Argon), qui représentent 99,97 % en volume de sa composition.

#### I.3.1. Définition les principaux paramètres caractérisant l'air humide

Considérons une masse  $M_h$  d'air humide, occupant le volume  $V$  à la température  $T$  et sous la pression  $P$

- ♦ La masse  $M_h$  d'air humide contenue dans ce volume est la somme d'une masse  $m_a$  d'air sec et  $m_v$  de vapeur d'eau:

$$M_h = m_v + m_a \quad (I.1)$$

- ♦ La pression totale  $p$ , est la somme des pressions partielles  $P_a$  de l'air sec et  $P_v$  de la vapeur d'eau :

$$P = P_v + P_a \quad (I.2)$$

#### I.3.1.1. Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport à une température donnée  $T$  entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air  $P_v$  et la pression de saturation  $P_s$  de cette vapeur d'eau .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.3)$$

#### I.3.1.2. Humidité absolue

Par définition, l'humidité absolue est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume  $V$  d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume.

L'humidité absolue est encore parfois appelée rapport de mélange, humidité spécifique, teneur en eau cette humidité est donnée par la relation suivante:

---

---

$$H_a = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{I.4})$$

Cette relation peut écrire sous la forme suivante:

$$H_a = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{En kg d'eau /kg d'air sec}) \quad (\text{I.5})$$

### I.3.1.3. Degré de saturation

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

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (\text{I.6})$$

### I.3.1.4. Températures caractéristiques de l'air humide

#### I.3.1.4.1. Température sèche «température de bulbe sec »

La température de bulbe sec  $T_s$  est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, ledit thermomètre étant placé dans l'air.

#### I.3.1.4.2. Température humide«température de bulbe humide »

C'est La température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air, dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation est prélevée de l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.

#### I.3.1.4.3. Température de rosé

Si l'on refroidit l'air à pression constante, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur 100% sur la courbe de saturation. Il se produit un équilibre vapeur liquide et les premières gouttes d'eau condensée vont apparaître, la température de ce point est appelée la température de rosée  $T_r$  de l'air.

Donc la température de rosé est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation. Cette température  $T_r$  est tel que:  $P_v=P_s(T_r)$

### I.3.2. Diagramme de l'air humide

Toutes les grandeurs caractéristiques de l'air humide ne sont pas indépendantes. Connaître deux grandeurs permet de calculer toutes les autres.

Ainsi, ces grandeurs ont été regroupées dans des diagrammes appelés diagrammes de l'air humide, plusieurs types de diagramme sont utilisés et dépendent principalement des coordonnées utilisées pour la représentation. Citons par exemple :

- ♦ Diagramme de Mollier ( $H_a, i$ ), qui donne l'humidité spécifique en fonction de l'enthalpie spécifique.
- ♦ Diagramme psychrométrique ( $T, H_a$ ), qui donne la température en fonction de l'humidité spécifique. Il regroupe les principales caractéristiques de l'air humide pour une pression atmosphérique donnée (en générale celle au niveau de la mer).

L'utilisation du diagramme psychrométrique permet, bien entendu, d'obtenir l'état de l'air étudié.

### I.4. Les milieux poreux

On appelle milieu poreux un solide de forme compliqué délimitant et englobant des vides appelés pores. Ces vides peuvent communiquer entre eux et contenir une aux plusieurs phases fluides, la partie solide encore appelée matrice se présente sous deux formes:

- ♦ **non consolidée:** la matrice solide est alors formée de graine ou fibres non soudés entre eux (graviers, sable, ...).
- ♦ **consolidée :** dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roche, tissus végétaux et animaux.).

Dans les conditions naturelle, le volume poreux est généralement occupé par une phase gazeuse (mélange air + vapeur d'eau) et de l'eau liquide [12].

---

---



### I.4.1. Répartition de l'eau dans les milieux poreux

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états: eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau [13].

- ♦ L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire.
- ♦ L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau ( un produit constitué de "petits pores " aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores").
- ♦ La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

### I.4.2. Propriétés du milieu poreux [14]

#### I.4.2.1. La porosité

La porosité totale est le rapport entre le volume des vides et le volume total du milieu poreux :

$$\varepsilon = \text{Volume des vides} / \text{volume total}$$

Une partie de l'eau contenue dans le milieu poreux est liée à celui-ci. Elle ne peut pas circuler. D'un point de vue hydrodynamique, elle peut être considérée comme une partie du solide. Cela nous conduit à définir une porosité cinématique ou porosité efficace,  $\varepsilon_c$ , liée à la circulation des fluides donc la porosité efficace est le rapport du volume d'eau mobile, par opposition à l'eau liée à la matrice par des forces d'attraction moléculaire, qu'un milieu poreux peut contenir à son volume total.

$$\varepsilon_c = \text{volume d'eau mobile} / \text{volume total}$$

---

---

### I.4.2.2. La perméabilité

La perméabilité intrinsèque  $k$  [ $L^2$ ] est une propriété intrinsèque du milieu poreux, indépendamment des caractéristiques du fluide. Il caractérise l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de charge, elle est donnée par:

$$k = \frac{\varphi \cdot \mu}{S(\Delta P / \Delta X)} \quad (I.9)$$

Avec:

$\varphi$  : débit du fluide [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ]

$\mu$  : la viscosité dynamique du fluide [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]

$S$ : l'aire de la section traversée par le fluide [ $L^2$ ]

$\Delta P / \Delta x$  : la variation de la charge par l'unité de longueur [ $ML^{-2}T^{-2}$ ]

Le coefficient de perméabilité  $K$  [ $L/T$ ] (ou la conductivité hydraulique) est le paramètre reliant la vitesse d'écoulement au gradient hydraulique dans la loi de Darcy. Elle dépend de la perméabilité intrinsèque  $k$  mais aussi de la viscosité dynamique  $\mu$  [ $M L^{-1} T^{-1}$ ] et de la masse volumique du fluide  $\rho$  [ $M L^{-3}$ ] qui circule :

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (I.10)$$

### I.4.3. Caractérisation des solides humides [15]

#### I.4.3.1. Humidité absolue

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

$$X_a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.11)$$

### I.4.3.2. Humidité relative

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

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{I.12})$$

### I.5. Activité de l'eau

L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau  $P_v$  à la surface du produit et la pression de vapeur d'eau pure  $P_s(T)$  à la température  $T$  du produit.

$$a_w = \frac{P_v}{P_s(T)} \quad (\text{I.13})$$

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre,  $P_v$ ,  $T$ ,  $P_{va}$  et  $T_a$  étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air.

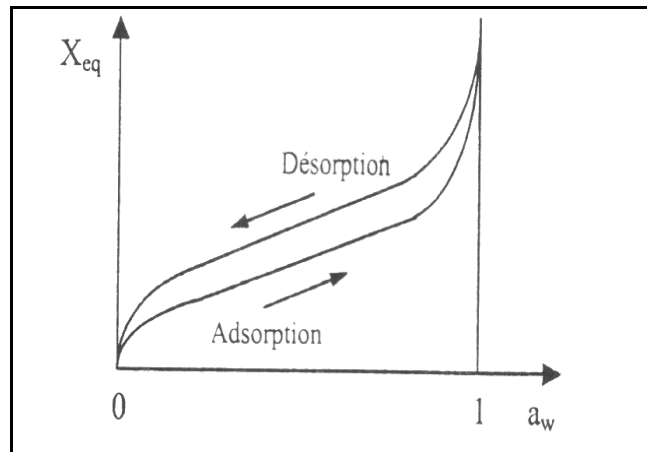
L'équilibre impose :  $T = T_a$  (pas de transfert de chaleur) et  $P_v = P_{va}$  (pas de transfert de masse). Or l'humidité relative  $H_{ra} = \frac{P_{va}}{P_s(T_a)}$  d'où l'on déduit :  $H_{ra} = a_w$ .

L'activité de l'eau dans un produit est donc aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit [16].

### I.6. Isothermes de sorption

Dans chaque opération de séchage, il y a un équilibre d'humidité air-produit que nous devons prendre en compte. Cet équilibre où plus exactement la valeur de l'humidité d'équilibre est déterminée pratiquement par les isothermes de sorption du produit.

L'isotherme de sorption est habituellement décrite par une courbe, qui illustre l'évolution de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  d'un produit en fonction de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative de l'air qui l'entoure  $H_r$  pour une température  $T$  [17, 18]. Cette courbe fournit donc des informations valables au sujet de l'équilibre hygroscopique du produit.



**Figure I.4 : Les isothermes d'adsorption désorption**

Les isothermes d'adsorption désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit [19] :

**Zone 1 :** Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit

Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.

**Zone 2 :** Adsorption des molécules sur la monocouche initiale.

L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

**Zone 3 :** Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue.

### I.6.1. Détermination expérimentale des isothermes de sorption

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température  $T$  et à humidité relative  $H_r$  de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à  $(T, H_r)$ . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau  $X$ , le couple  $(H_r, X)$  fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Le produit est suspendu dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme [20].

### I.7. Séchage et mouillage d'un solide

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

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

Si la tension de vapeur  $P_m$  (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de  $P_v$  il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque  $P_v = P_m$  [15].

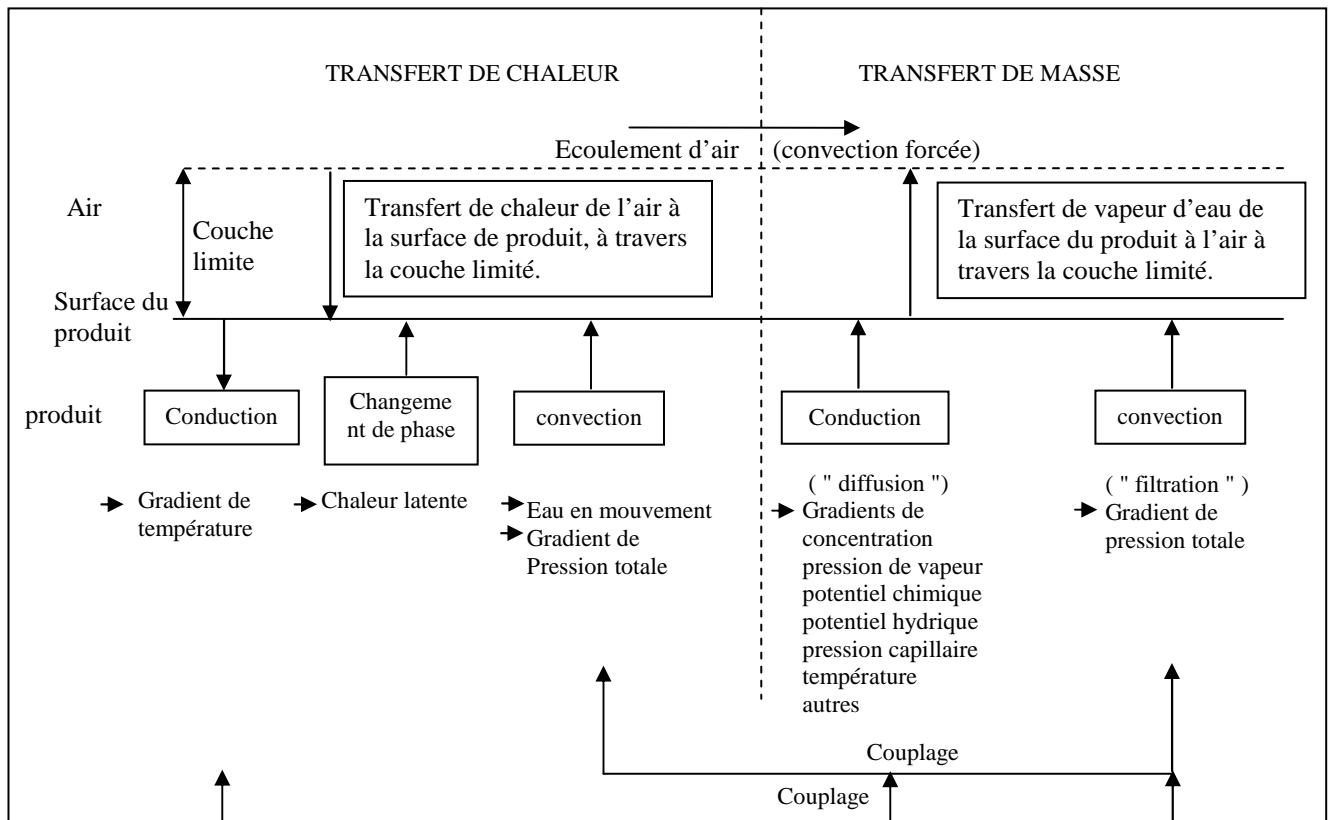
- ♦ Si  $P_v > P_m$  ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.
  - ♦ Si  $P_v < P_m$  le transfert de matière s'effectue du solide vers la phases gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.
  - ♦ Lorsque  $P_v = P_m$  l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière.
- 
-

**I.8. Les phénomènes physiques dans le produit lors du séchage**

Le séchage fait intervenir plusieurs phénomènes physiques qui interagissent entre eux. Ces phénomènes sont présentés schématiquement à la Figure I-5 elle représente des phénomènes de transfert de chaleur et de masse à cause du séchage par convection forcée.

Deux phénomènes se produisent simultanément à l'interface produit-air, soit un échange de chaleur de l'air vers le produit et un échange de vapeur d'eau du produit à l'air.

On reconnaît habituellement trois mécanismes différents pour expliquer le transfert de chaleur se produisant à l'intérieur du produit, soit la conduction, la convection ou les changements de phase.



**Figure I.5 : Représentation schématique des phénomènes de transfert de chaleur et de masse lors du séchage du produit par convection forcée.**

## **I.9. Méthodes de séchage [21]**

### **I.9.1. Séchage par convection**

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique: on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée. La température du gaz diminue entre l'entrée et la sortie alors que c'est le contraire pour le solide.

### **I.9.2. Séchage par conduction**

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition.

### **I.9.3. Séchage par rayonnement**

Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

## **I.10. Vitesse de séchage**

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou tout simplement la limite du quotient de la différence de teneur  $\Delta w$  par l'intervalle de temps  $\Delta t$ , c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- ♦ La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
  - ♦ La température, l'humidité et la vitesse de l'air.
- 
-

### **I.11. Cinétique du séchage [22, 23]**

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps, au celle donnant la vitesse de séchage  $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$  en fonction de X. Ces courbes sont généralement obtenue pour différents conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Sur la courbe schématique présentée à la Figure I.6, on peut distinguer trois phases:

#### **I.11.1. Période de mise en température (Période 0)**

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croit ou décroît) jusqu'à la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important.

#### **I.11.2. Période à vitesse constant**

Durant cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet des forces capillaires, l'équilibre entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité interne au sein du produit vers la surface est établi, la température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface, cette période s'achève lorsque les forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation l'eau de surface, et couvre généralement une grande partie du temps de séchage.

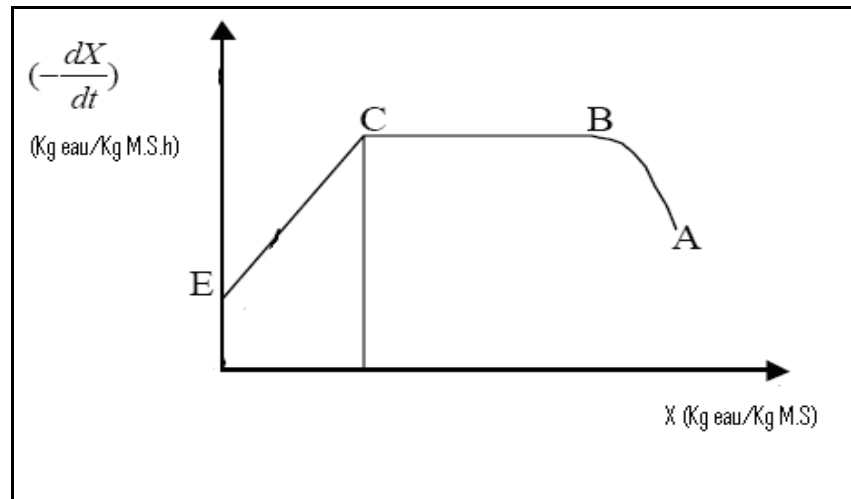
#### **I.11.3. Période de ralentissement**

Pendant cette phase, les forces capillaires ne sont plus suffisantes pour acheminer l'eau vers la surface du produit. La vitesse de séchage ne peut plus être maintenue constante et elle commence à décroître.

---

---





**Figure I. 6 : Cinétique de séchage**

En réalité, le séchage est beaucoup plus complexe car le déplacement de l'eau est influencé par plusieurs phénomènes :

- ♦ Les forces de capillarité qui entraînent une migration de l'eau en sens inverse du gradient de température.
- ♦ Les différences de pression partielles  $P_v$  et  $P_a$  qui entraînent un déplacement de l'eau sous forme vapeur.
- ♦ La migration des matières solubles (sucre, sels) à la surface qui entraînent une résistance supplémentaire.
- ♦ La résistance au déplacement est fonction de la structure cellulaire ou fibreuse du produit.
- ♦ La déformation du produit très importante pour les produits biologiques.

### **I.12. Classification des systèmes de séchage à énergie solaire [24, 25]**

Les systèmes de séchage à énergie solaire sont classés principalement selon leurs modes de chauffage et la façon en la quels la chaleur solaire est utilisée. De façon générale, ils peuvent être classés dans deux groupes principaux, à savoir :

- ♦ Systèmes de séchage à énergie solaire actifs (dont la plupart des types se nomment souvent les dessiccateurs solaires hybrides);
- ♦ Systèmes de séchage à énergie solaire passifs.

Trois classes secondaires distinctes des systèmes de séchage solaires actifs ou passifs peuvent être identifiées (qui changent principalement dans l'arrangement de conception des composants de système et le mode de l'utilisation de la chaleur solaire), à savoir :

- ♦ Les séchoirs solaires directs.
- ♦ Les séchoirs solaires indirects.
- ♦ Les séchoirs solaires mixtes.

### **I.12.1. Systèmes de séchage à énergie solaire passifs**

#### **I.12.1.1. Les séchoirs solaires directs**

Les séchoirs directs sont des appareils simples (Figure I.7) et caractérisé par :

- ♦ Simplicité de fonctionnement et de construction
- ♦ Produit protégé

Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur. Une feuille de plastique en polyéthylène transparent sert généralement de toit mais peut également utiliser d'autre matériaux, plus chers comme le verre ou les plastique spéciaux, donc le séchoir solaire direct combine deux effets :

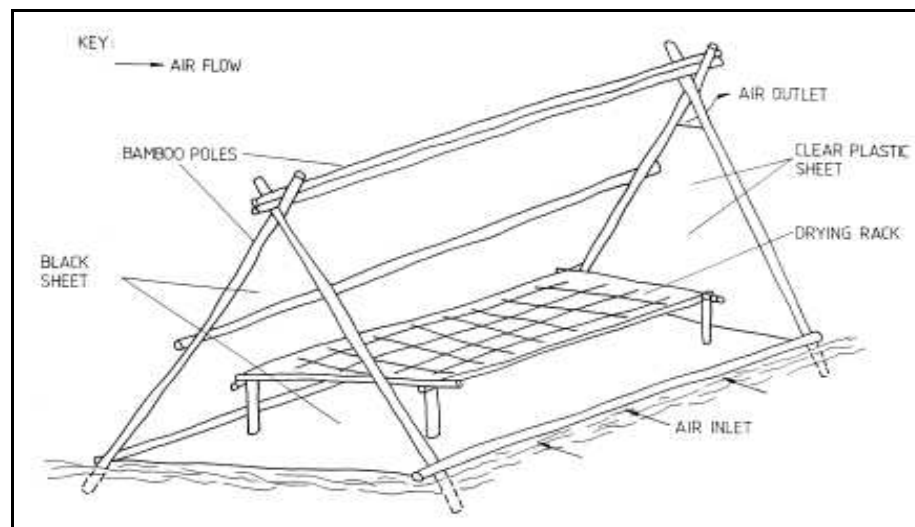
- ♦ La température qui augmente sous l'effet de serre.
- ♦ La circulation naturelle de l'air dans le séchoir.

#### **Avantages**

- ♦ Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
  - ♦ Pas besoin de main d'oeuvre qualifiée.
  - ♦ Grandes possibilités de conception.
- 
-

### Inconvénients

- ◆ Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, décoloration.
- ◆ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- ◆ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.



**Figure I.7 : Le séchoir solaire tente en polyéthylène.**

#### I.12.1.2. Les séchoirs solaires indirects

Les séchoirs solaires indirects comportent des insolateurs placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer ou préchauffer l'air avant son envoi dans cette dernière.

#### Principe de fonctionnement

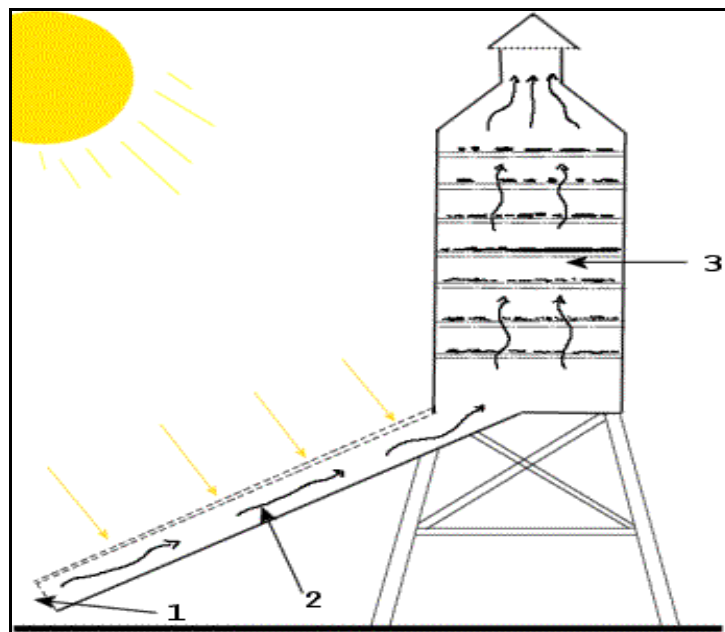
Dans les séchoirs solaires indirects, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

**Avantages**

- ♦ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.
- ♦ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

**Inconvénients**

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

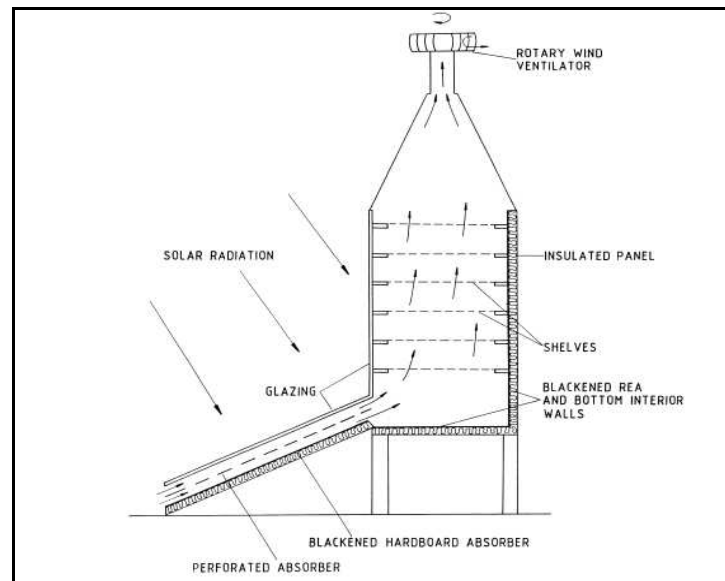


1. Entrée d'air
2. L'air asséchant
3. Claie

**Figure I.8 : Séchoir solaire indirect**

### I.12.1.3. Les séchoirs solaires mixtes

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



**Figure I.9 : Séchoir solaire mixte à circulation forcée.**

### I.12.2. Systèmes de séchage à énergie solaire actifs «Les séchoirs hybrides »

Les systèmes de séchage solaires actifs utilisent les systèmes de chauffage à énergie solaire et/ou électriques ou par combustible fossile basés et les ventilateurs et/ou les pompes motorisés pour la circulation d'air. L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

- ♦ L'énergie d'appoint permet de maintenir une température constante à l'intérieur du séchoir quelles que soient les conditions climatiques. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire, elle permet de préchauffer l'air.
- ♦ Le ventilateur assure la circulation de l'air. Ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

**Avantages**

- ◆ Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- ◆ Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

**Inconvénients**

- ◆ coût de production et d'investissement élevé.
- ◆ Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- ◆ Personnel qualifié pour la maintenance.

**I.13. Capteurs solaires [26]**

Les capteurs solaires sont des appareils permettant la conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique, en se basant sur l'effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge, un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre.

Les principaux composants des capteurs solaires sont :

Le couvercle : C'est une plaque qui peut être soit en verre, soit en plexiglas, soit en polycarbonates, mais le verre est le plus souvent utilisé.

L'absorbeur : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur thermique ; cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ◆ Une bonne conductivité thermique ;
- ◆ Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité;

Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.

L'isolant : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques. Les matériaux utilisés comme isolant sont :

---

---

- ♦ Les isolants non organiques tel que la laine de verre, les cendres de végétaux, le bois.
- ♦ Les isolants organiques tel que la mousse de polyuréthane.

Le fluide caloporteur : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. Les fluides caloporteurs utilisés sont :

- ♦ L'air : C'est un fluide gratuit mais il possède une faible capacité calorifique en comparaison avec celle de l'eau.
- ♦ L'eau : Elle possède les avantages suivants : une grande chaleur massique, et une faible viscosité.

### I.13.1. Bilan thermique du capteur

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\Phi_a = \Phi_u + \Phi_p + \Phi_s \quad (\text{I.14})$$

Où  $\phi_a$  : Le flux solaire absorber à la surface de l'absorbeur,

$\phi_u$  : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur,

$\phi_p$  : La puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur,

$\phi_s$  : La puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

### I.13.2. Rendement instantané d'un capteur

Le rendement instantané d'un capteur est définit par :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = \frac{\phi_u}{\phi_a} \quad (\text{I.15})$$

## II. Modes de transfert

Le séchage est un processus basé sur le principe d'un transfert d'énergie permettant simultanément un :

- ♦ Transfert thermique au produit à partir de la source de chaleur
- ♦ Transfert de masse de l'humidité à partir de l'intérieur du produit à sa surface et à partir de la surface à l'air environnant.

### II.1. Transfert de chaleur

Les échanges thermiques sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils peuvent se faire selon 3 modes : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé.

#### II.1.1. Transmission de la chaleur par conduction [27]

La conduction est un processus physique de propagation de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide ou gazeux), sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes vers les zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique pour les solides et transmission d'énergie cinétique opérée entre les molécules pour les fluides).

##### II.1.1.1. Loi de Fourier

La loi de Fourier traduit la relation existante, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique et le gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -S\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II .1})$$

$\lambda$  : est la conductivité thermique du matériau considéré ( $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

Le signe (-) caractérise le fait que l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes, du chaud vers le froid.

---



**II.1.1.2. Équation générale de la conduction [28]**

Considérons un milieu solide de volume  $V$ . Soit  $(\rho C)$  sa chaleur volumique,  $\lambda$  sa conductivité, et  $q$  la puissance générée par unité de volume, due aux sources internes.

On applique le premier principe de la thermodynamique à un volume fini  $V$ , de surface  $S$ , contenu dans  $V$ . Avec les conventions habituelles, on compte positivement les énergies reçues par ce système.

En chaque point de  $V$  et pour un milieu homogène et isotrope, les caractéristiques thermiques  $\lambda$  et  $\rho C$ , constantes et pour lesquels  $q$  est indépendant de la température, on obtient l'équation linéaire classique de la chaleur:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \frac{q_v}{\lambda} \quad (\text{II.2})$$

$T$ : température fonction du temps et de la position dans l'espace ( $^{\circ}\text{C}$ )

$q_v$ : génération de puissance thermique ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$a$ : diffusivité thermique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

On en déduit aisément les cas particuliers suivants que l'on rencontre très fréquemment :

- ♦ milieu avec sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T + \frac{q}{\lambda} = 0, \quad \text{équation de POISSON}$$

- ♦ milieu sans sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T = 0, \quad \text{équation de LAPLACE}$$

- ♦ milieu sans sources internes, en régime variable :

$$\Delta T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \text{équation de FOURIER}$$

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

### II.1.2. Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement au sein des milieux fluides. Elle apparaît lorsqu'un fluide, liquide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température. La convection intervient en particulier dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide en mouvement.

Alors que la conduction peut être considérée comme un transfert d'énergie par des mouvements microscopiques, la convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques.

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

- ♦ conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent;
- ♦ mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Deux types de convection sont généralement distingués :

#### La convection naturelle

Dans ce cas, le mouvement du fluide est dû aux variations de sa masse volumique avec la température ; cette variation crée un champ des forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide.

---

### La convection forcée

Dans ce cas le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques, par exemple une pompe ou un ventilateur ; c'est donc un gradient de pression extérieure qui provoque les déplacements des particules du fluide.

#### II.1.2.1. Coefficient de convection

Considérons la surface d'un corps solide d'aire  $S$  et de température  $T_p$ . Si le corps est au contact d'un milieu fluide en mouvement caractérisé par une température  $T_\infty$  (différente de  $T_p$ ), la quantité de chaleur qui traverse  $S$  peut s'écrire :

$$\Phi = hS(T_p - T_\infty) \quad (\text{II.3})$$

Où :

$T_p$  : température de la surface du solide ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_\infty$  : température du fluide loin de la paroi ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h$  : coefficient d'échange thermique par convection ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ )

Cette équation est appelée **loi de Newton** où  $h$  représente le coefficient de transfert convectif. Ce coefficient ne dépend pas en général de la nature de la paroi mais uniquement des propriétés du fluide (viscosité, densité ...) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

#### II.1.2.2. Estimation des coefficients de transfert de chaleur

La littérature spécialisée contient de nombreuses lois empiriques permettant d'estimer le coefficient de convection. L'analyse dimensionnelle permet de généraliser et de comparer les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions particulières.

Pour la convection forcée, les coefficients d'échange  $h$  sont exprimés par l'intermédiaire du nombre sans dimension de NUSSELT «Nu» :

---

$Nu = \text{Transfert par convection} / \text{Transfert par conduction}$

$$N_u = \frac{h \Delta T}{\lambda \Delta T / \delta} = \frac{h \delta}{\lambda} \quad (\text{II .4})$$

$\delta$ : longueur "*caractéristique*"

L'expérience montre que:  $N_u = f(\text{Re}, P_r)$  (II .5)

$P_r$  : nombre de Prandtl qui résume les propriétés thermophysiques du fluide.

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad (\text{II .6})$$

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide (Diffusivité de quantité de mouvement) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$a$  : diffusivité thermique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$R_e$  : nombre de Reynolds caractérisant le régime d'écoulement du fluide :

$R_e = \text{Forces d'inertie} / \text{Forces de viscosité}$

$$R_e = \frac{\rho D_h v}{\mu} \quad (\text{II .7})$$

- ♦ Pour la convection naturelle, le nombre de NUSSELT s'exprime par une fonction du nombre de GRASHOF et du nombre de PRANDTL :

$$N_u = f(G_r, P_r) \quad (\text{II .8})$$

$$= f(R_a, P_r)$$

$R_a$  : nombre de RAYLEIGH,  $R_a = G_r \cdot P_r$

$G_r$  : nombre de GRASHOF, qui joue le même rôle en convection naturelle que le nombre de REYNOLDS en convection forcée.

$G_r = \text{Force de pesanteur} / \text{Force de viscosité}$

$$G_r = \frac{g \beta \rho^2 \delta^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{II.9})$$

$\delta$  : échelle caractéristique de longueur,

$\Delta T$  : écart caractéristique de la température,

$g$  : accélération de la pesanteur,

$\mu$  : viscosité dynamique,

$\beta$  : coefficient de dilatation volumique du fluide à pression constante.

### II.1.3. Transmission de la chaleur par rayonnement [29]

Tous les corps solides, liquides ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Si cette énergie rayonnée rencontre un corps absorbant pour ses longueurs d'onde, elle se transforme en chaleur.

Le rayonnement thermique, comme toutes les radiations électromagnétiques, n'exigeant pas de support matériel pour se propager, se produit même dans le vide.

#### II.1.3.1. Le corps noir

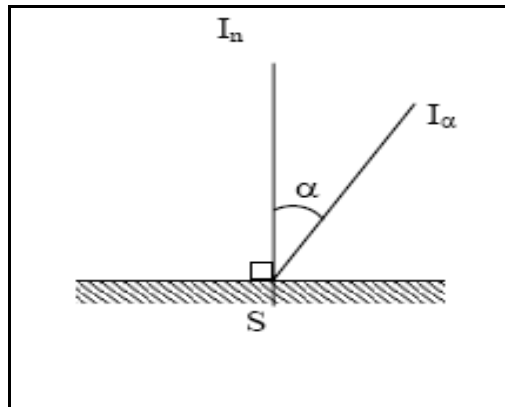
L'émetteur ou l'absorbeur idéal est un cas limite appelé corps noir. Il a la propriété d'absorber tout le rayonnement qui lui parvient quelque soit sa longueur d'onde ; son coefficient d'absorption  $\alpha$  est égal à 1 et son coefficient de réflexion  $\rho = 0$  ; maintenu à la température  $T$ , il émet le maximum de rayonnement thermique possible.

#### II.1.3.2. Loi de Lambert

Dans le cas où la source est isotrope, la luminance est indépendante de la direction ou encore sources à émission isotrope, dans ce cas :  $L_x = L$

$$\text{Donc : } L = \frac{I_\alpha}{dS \cos \alpha} = \frac{I_n}{dS} \quad (\text{dans la direction normale à } dS)$$

$$\text{On en déduit que : } I_\alpha = I_n \cos \alpha$$



Lorsqu'un corps suit la loi de Lambert, on montre qu'émittance et luminance sont proportionnelles :

$$M = \pi.L \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{II.10})$$

### II.1.3.3. Loi de PLANCK « Emission monochromatique »

Cette loi relie l'émission monochromatique du corps noir,  $M_\lambda^0$  à la longueur d'onde  $\lambda$  et à sa température  $T$ . Elle s'exprime sous la forme :

$$M_\lambda^0 = \frac{2 \pi h C^2 \lambda^{-5}}{\exp \frac{hc}{k \lambda T} - 1} \quad (\text{II.11})$$

Dans laquelle :

$C$  est la vitesse des ondes électromagnétiques dans le milieu où se propage le rayonnement,  $C = \frac{C_0}{n}$

Avec :  $n$ : indice de réfraction du milieu

$$C_0 = 2,9979.10^8 \text{ (m/s)}$$

$$h: \text{ constante de PLANCK, } h = 6,6255.10^{-34} \text{ (J.s)}$$

$$K: \text{ constante de BOLTZMANN, } K = 1,3805.10^{-23} \text{ (J/K)}$$

Lorsque le rayonnement se propage dans un milieu dont l'indice de réfraction  $n$  est égal à l'unité, la loi de PLANCK s'exprime sous la forme suivante :

$$M_{\lambda}^{\circ} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1} \quad (\text{II.12})$$

Avec :  $C_1 = 2\pi^5 h^2 C_0^2 = 3,742 \cdot 10^{-16}$  (W. m<sup>-2</sup>)

$$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ (m. K)}$$

En particulier, pour les courtes longueurs d'onde ( $\lambda < 5 \mu\text{m}$ , visible et proche infra-rouge) la formule de PLANCK peut être approchée par l'expression:

$$M_{\lambda}^{\circ} = C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad (\text{II.13})$$

#### II.1.3.4. Loi de WIEN

Deux lois fournissent respectivement l'abscisse et l'ordonnée du maximum d'émittance monochromatique du corps noir pour chaque température.

##### 1<sup>ère</sup> loi de WIEN ou loi du déplacement

L'abscisse  $\lambda_m$  du maximum de  $M_{\lambda}^{\circ}$  se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température croît. Il donne la valeur de  $\lambda_m$  en fonction de T.

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)} \quad (\text{II.14})$$

##### 2<sup>ème</sup> loi de WIEN

Il donne la valeur de  $M_{\lambda_m}^{\circ}$  en fonction de T. Cette loi s'exprime sous la forme suivante

$$M_{\lambda_m}^{\circ} = \beta T^5 \quad (\text{II.15})$$

$$\beta = 1,287 \cdot 10^{-5} \text{ (w/m}^3 \cdot \text{K}^5)$$

**II.1.3.5. Loi de STEFAN-BOLTZMANN**

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température. On peut l'établir par intégration de la formule de PLANCK sur l'ensemble du spectre rayonné :

$$M^{\circ} = \sigma T^4 \quad (\text{II.16})$$

Avec:

$M^{\circ}$  : émittance totale

$\sigma$ : constante de STEFAN-BOLTZMANN

$$\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}^4$$

**II.1.3.6. Réception du rayonnement par un corps « Réflexion, absorption et transmission »**

Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps, une fraction  $\rho$  de la puissance totale incidente est réfléchi, une autre fraction  $\alpha$  est absorbée dans la masse du récepteur, et une troisième fraction  $\tau$  peut être transmis figure (II-1).

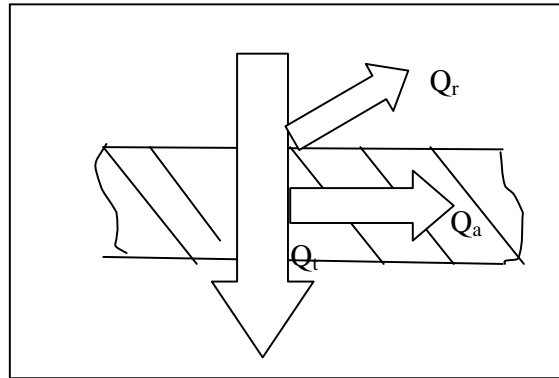
Si  $Q_i$ ,  $Q_a$ ,  $Q_r$ ,  $Q_t$  sont respectivement les flux totaux incident, absorbé, réfléchi et transmis, on désigne sous les noms de :

- ♦ absorptivité (totale), la quantité  $a = \frac{Q_a}{Q_i}$ ,
- ♦ réflectivité (totale), la quantité  $r = \frac{Q_r}{Q_i}$ ,
- ♦ transmittivité (totale), la quantité  $\tau = \frac{Q_t}{Q_i}$ ,

Ces trois grandeurs sont liées par la relation :

$$\mathbf{a + r + \tau = 1} \quad (\text{I.17})$$





**Figure II-1 : Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission.**

## **II.2. Transfert de masse [29, 30]**

Le transport d'un constituant d'une solution fluide d'une région de haute concentration à une région de concentration plus faible est appelé transfert de masse. On peut très facilement comprendre le mécanisme du transfert de masse en faisant une analogie avec la transmission de chaleur. La chaleur est transmise dans une direction où le gradient de température existant va en diminuant; la masse est transférée dans une direction où le gradient de concentration existant va en diminuant.

Le déplacement de matière, qu'il soit de nature diffusive ou convective induit toujours un transfert de chaleur.

### **II.2.1. Transfert de masse par diffusion moléculaire**

La diffusion moléculaire est un phénomène lié à l'agitation moléculaire. En effet, s'il existe entre deux points du fluide une différence de concentration, le déplacement aléatoire de la molécule a lieu pour uniformiser la concentration dans le milieu.

Le transfert de masse par diffusion moléculaire est directement analogue à la transmission de chaleur par conduction ou au transfert de quantité de mouvement dans l'écoulement laminaire.

---

**1<sup>ère</sup> loi de FICK**

Le flux massique, dans une direction  $\vec{n}$  donnée, est proportionnel au gradient de concentration qui a provoqué le mouvement. Si  $C$  est la concentration du constituant considéré, exprimée en  $\text{kg/m}^3$ , et  $\dot{m}$  le débit massique à travers un élément de surface  $dS$  normale à la direction  $\vec{n}$ , la loi de FICK s'exprime par la relation :

$$\dot{m} = -D_c \frac{\partial C}{\partial n} dS \quad (\text{II.18})$$

$D_c$  est le coefficient de diffusion moléculaire, il s'exprime en  $\text{m}^2/\text{s}$ , comme la diffusivité thermique.

La loi de FICK se généralise sans peine à trois dimensions :

$$\vec{\varphi}_m = -D_c \overrightarrow{\text{grad}C} \quad (\text{II.19})$$

$\vec{\varphi}_m$  : est la densité de flux ( $\text{Kg/m}^2.\text{s}$ )

**2<sup>ème</sup> loi de FICK**

L'équation (II.20) n'est utilisable qu'en régime non permanent, car le flux en chaque point varie avec le temps.

L'équation transitoire unidimensionnelle de transfert de masse peut s'écrire sous une forme identique à l'équation de la transmission de la chaleur de FOURIER :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{II.20})$$

**II.2.2. Le coefficient de transfert de masse**

Considérons une surface plane d'eau à la température  $T_e$ , au voisinage de laquelle circule un écoulement d'air dont la concentration est  $C_0$ , la pression de vapeur est  $P_{v0}$  et la température est  $T_0$ .

Il se produit simultanément deux phénomènes :

- Un transfert de chaleur du à l'écart de température ( $T_e - T_0$ ) entre l'eau et l'air, ce transfert est appelé « transfert de chaleur sensible »
- Un transfert de masse du au gradient de pression de vapeur d'eau dans l'air

Le coefficient de transfert de masse caractérisant les échanges à travers un élément  $dS$  de surface liquide est introduit par les relations suivantes :

$$d \dot{m} = h_{cc} (c_e - c_0) dS$$

Avec :

$d \dot{m}$  : Débit d'eau évaporée sur la surface  $dS$  du liquide (kg/s)

$h_{cc}$  : coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration (m/s)

$C_e$  : concentrations en vapeur d'eau ( $\text{kg/m}^3$ )

La même approche par l'analyse dimensionnelle permet également de rendre compte des transferts de masse. Les groupements sans dimension relatifs sont les suivants :

$$Sh = \frac{h_{cc} L}{D_c} \quad \text{Nombre de CHERWOOD}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_c} \quad \text{Nombre de SCHMIDT}$$

Il joue le même rôle pour le transfert de masse que le nombre de PRANDTL pour le transfert de chaleur (le coefficient de diffusion moléculaire  $D_c$  correspondant à la diffusivité thermique).

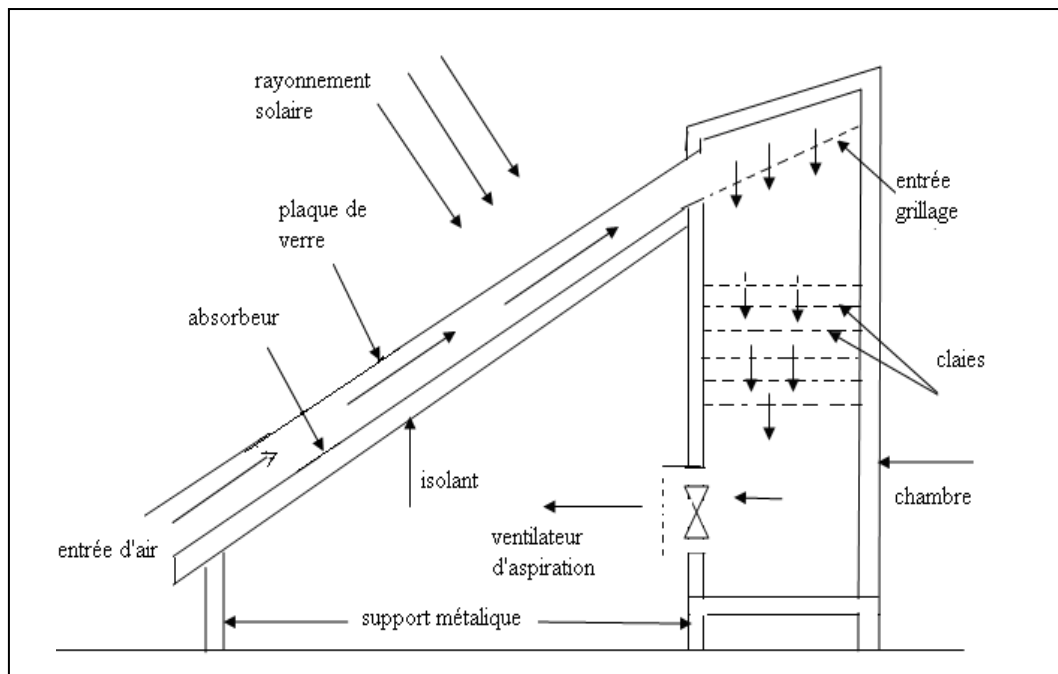
---

### III. Introduction

La partie expérimentale a été réalisée au niveau de la terrasse du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes LENREZA de l'université de Ouargla

#### III.1. Description du système de séchage

Le dispositif utilisé est schématisé sur la figure (III-1), c'est un séchoir solaire indirect à convection forcée, il est composé de deux parties principales : un capteur solaire et une chambre de séchage.



**Figure III.1 : Schéma descriptif du système de séchage**

##### III.1.1. Le générateur d'air chaud

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (2,5 m x 1m). Il transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Il est constitué d'un absorbeur en tôle galvanisée peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre d'épaisseur 0,004m. Les cotés latéraux et les parties

inférieures sont isolés thermiquement avec le polyuréthane. L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur.

Le capteur est incliné d'un angle de  $31^{\circ}$  (latitude de la ville de Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.

### **III.1.2. La chambre de séchage**

La chambre de séchage est une boîte de forme parallélépipédique de hauteur 2,10 m, de longueur 1 m et de largeur 0,60 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polyuréthane. A l'intérieur de cette armoire se trouve :

- ♦ Des résistances électriques de puissance 700, 1500 et 1500 kW, pilotées par un thermostat. Ce dispositif de chauffage est placé à l'entrée de la chambre de séchage.
- ♦ Un aspirateur de marque KFA-30A, avec un débit d'air réglable à l'aide d'une vanne, de vitesse 1400 tours/min et un débit volumique de  $19,5 \text{ m}^3/\text{min}$ , est collé à la sortie du caisson.
- ♦ Six claies de forme rectangulaire en grillage galvanisé, les claies sont distantes les unes des autres de 0,12 m.

## **III.2. Appareillage de mesure**

### **III.2.1. Mesure du rayonnement solaire**

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en  $\text{W}/\text{m}^2$  à l'aide d'un solarimètre (de type DS 120) et ceci durant la journée de l'expérience.

### **III.2.2. Mesure de la vitesse, température et humidité relative de l'air dans le séchoir**

La vitesse et la température de l'air sont mesurées dans plusieurs endroits du séchoir solaire :

Sortie de la chambre de séchage : Les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil testo 445 à affichage numérique muni d'un anémomètre pour la mesure de la vitesse de l'air, et d'une sonde pour la mesure de la température, et d'un hygromètre pour la mesure de l'humidité relative de l'air.

---

Les mesures des températures sont effectuées à l'aide des thermocouples de type K (chromel-alumel) dans plusieurs endroits : entrée et sortie du capteur, entrée de la chambre et au niveau du produit.

Les résultats de mesure sont affichés sur un appareil testo 945 à affichage numérique.

### **III.2.3. Les mesures externes**

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air ambiant sont effectuées à l'aide d'un anémomètre manuel à affichage numérique de type LV 110 et d'un hygromètre de type POS 09 pour mesurer l'humidité relative de l'air.

### **III.3. Fonctionnement du système**

L'air frais capté de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, le contact air absorbeur ainsi que le transfert convectif permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de l'armoire de séchage et avant de traverser les claies, l'air est chauffé par des résistances électriques qui fournissent en cas de besoin un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage fixe et réglable. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse les claies superposées et l'évacue vers l'extérieur.

### **III.4. Séchage de la tomate**

#### **III.4.1. Préparation du produit**

Des tomates fraîches ont été achetées dans un marché local à Ouargla ; les étapes nécessaires pour la préparation du produit sont :

- 1- Les tomates ont été lavées manuellement avec de l'eau fraîche pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations.
  - 2- Découper en rondelles de 1 cm d'épaisseur avec un couteau.
  - 3- Etaler sur les claies.
-

### III.4.2. Détermination de la masse sèche du produit

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité de type MA 45. Après la préparation d'un échantillon de tomate de 45g, on l'introduit dans l'analyseur d'humidité. Cet appareil est réglé à une température de 70°C [31], elle s'arrête automatiquement dès que la masse devient constante. L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001 g qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil. L'expérience a été refaite trois fois pour chaque échantillon pour minimiser les erreurs. Une valeur moyenne d'humidité relative trouvée est de 93,24 % ( $\pm 0,9$ ).

### III.4.3. Protocole expérimental

Des expériences de séchage ont été effectuées à 50, 65 et 75 °C avec une épaisseur d'échantillon approximativement égale à 1 cm, et pour différentes vitesses de l'air (1, 1,5 et 2 m/s). La masse de l'échantillon au niveau de la claie est de 2400 g.

L'humidité initiale mesurée est d'environ 93,24 %, le séchage se produit jusqu'à une humidité finale de 13 % [31] en prélevant la perte d'humidité chaque 60 minutes, au moyen d'une balance numérique. En plus les mesures de température, du rayonnement, de la vitesse, et d'humidité relative de l'air sont effectuées chaque 30 minutes.

Les expériences de séchage ont été effectuées pendant les périodes (Novembre - Avril 2007-2008) dans les conditions climatiques de Ouargla, chaque expérience commence à 9 h et se termine à 17h.

Après 17h, les échantillons sont stockés dans des boîtes en plastique et placés dans un réfrigérateur afin d'empêcher la fermentation et garder leur états pour la continuité de l'opération de séchage le lendemain. A la fin de l'opération, les échantillons secs sont laissés se refroidir à la température ambiante et puis scellés dans des sacs en plastique.

---

### III.5. Résultats expérimentaux

#### III.5.1. Effet du rayonnement sur la température

Les figures. (III.2a), (III.2b), (III.2c), (III.2d) et (III.2e) montrent la variation journalière de la température de l'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, et les rayonnements solaires en fonction du temps. On remarque que l'allure des températures est identique à celle du rayonnement solaire.

Durant un jour de l'expérience (15-11-2007) à Ouargla, les valeurs moyennes quotidiennes de la température de l'air ambiant, la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur et le rayonnement solaire varient respectivement de 16,2-22,8°C, 18-24,6 °C, 20,5–45°C, 31-752 W / m<sup>2</sup>. Elles atteignent des valeurs maximales entre 12 h et 14 h.

En outre, il y avait une différence significative entre les valeurs de la température à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, cette différence de températures varie de 0,1 à 21,9°C durant la durée de l'expérience. L'écart est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur et à l'effet de serre qui en résulte entre l'absorbeur et la vitre, jouant un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur solaire.

---



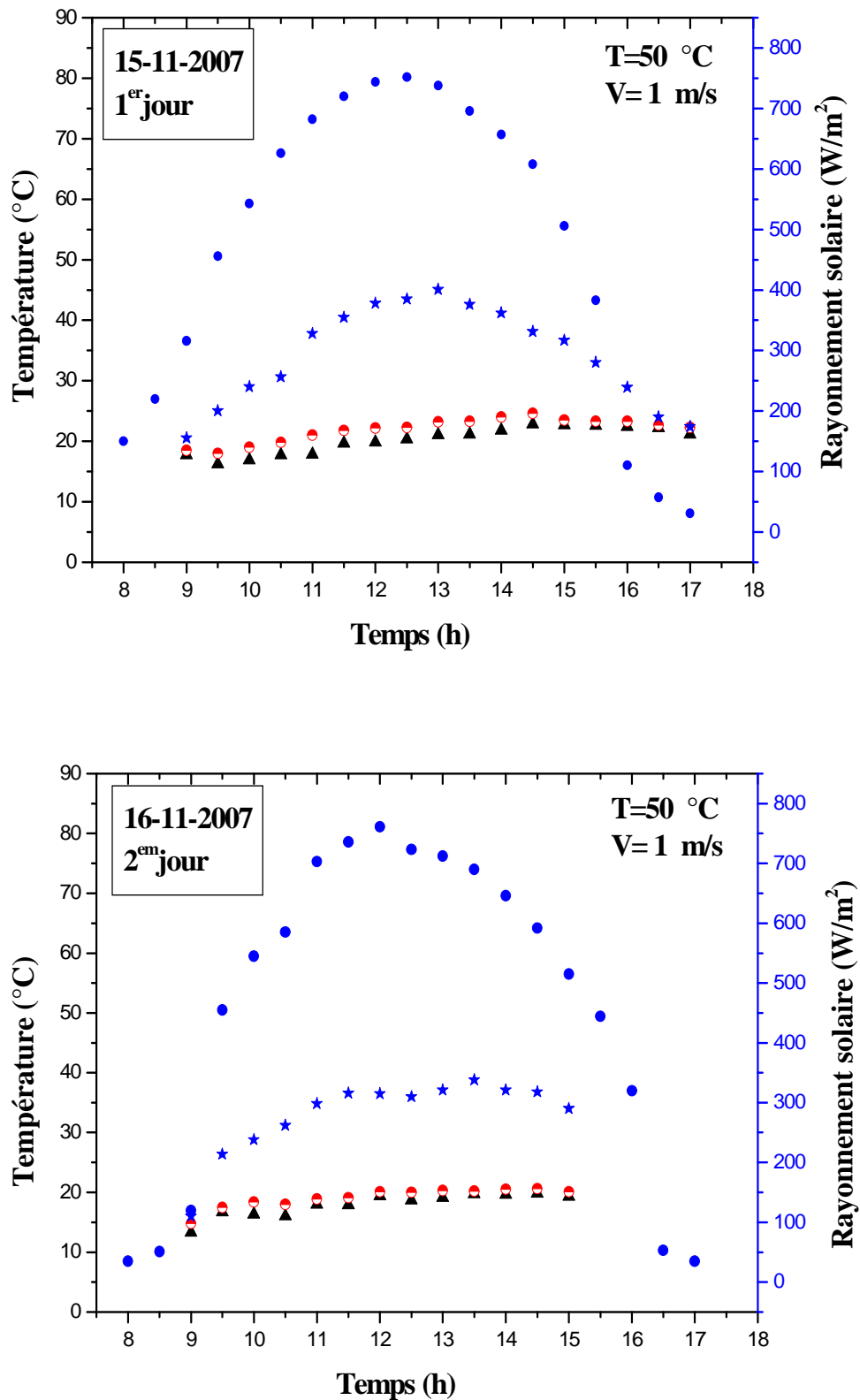
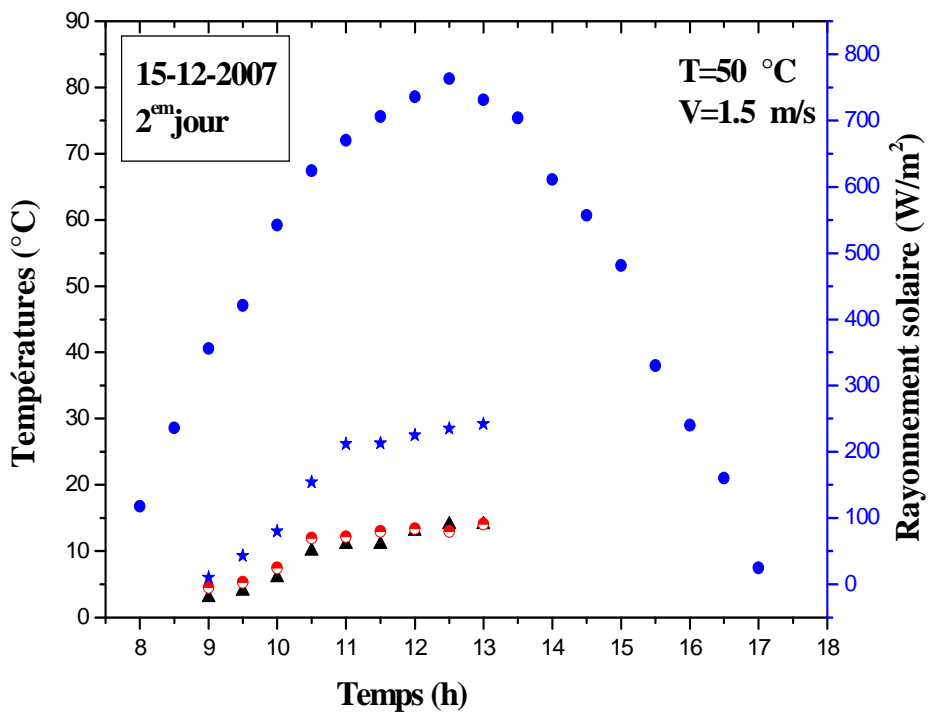
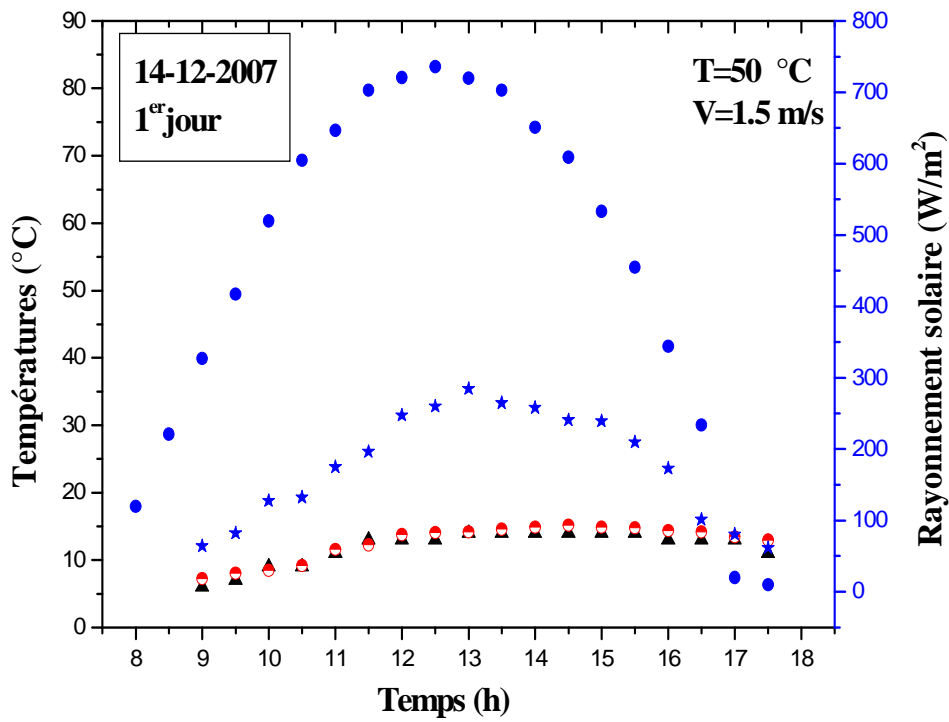


Figure III.2a : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.



**Figure III.2b : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.**

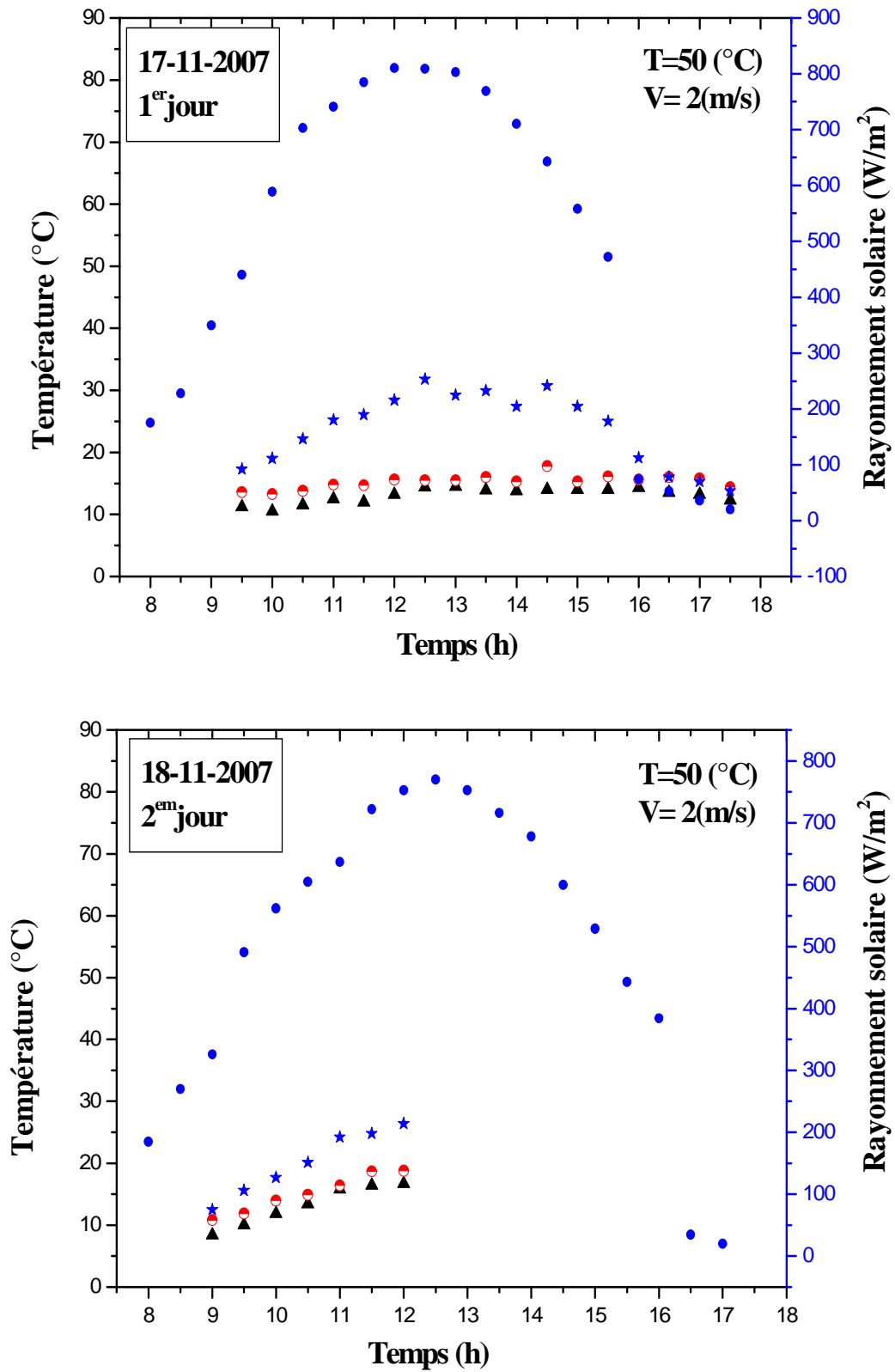


Figure III.2c : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

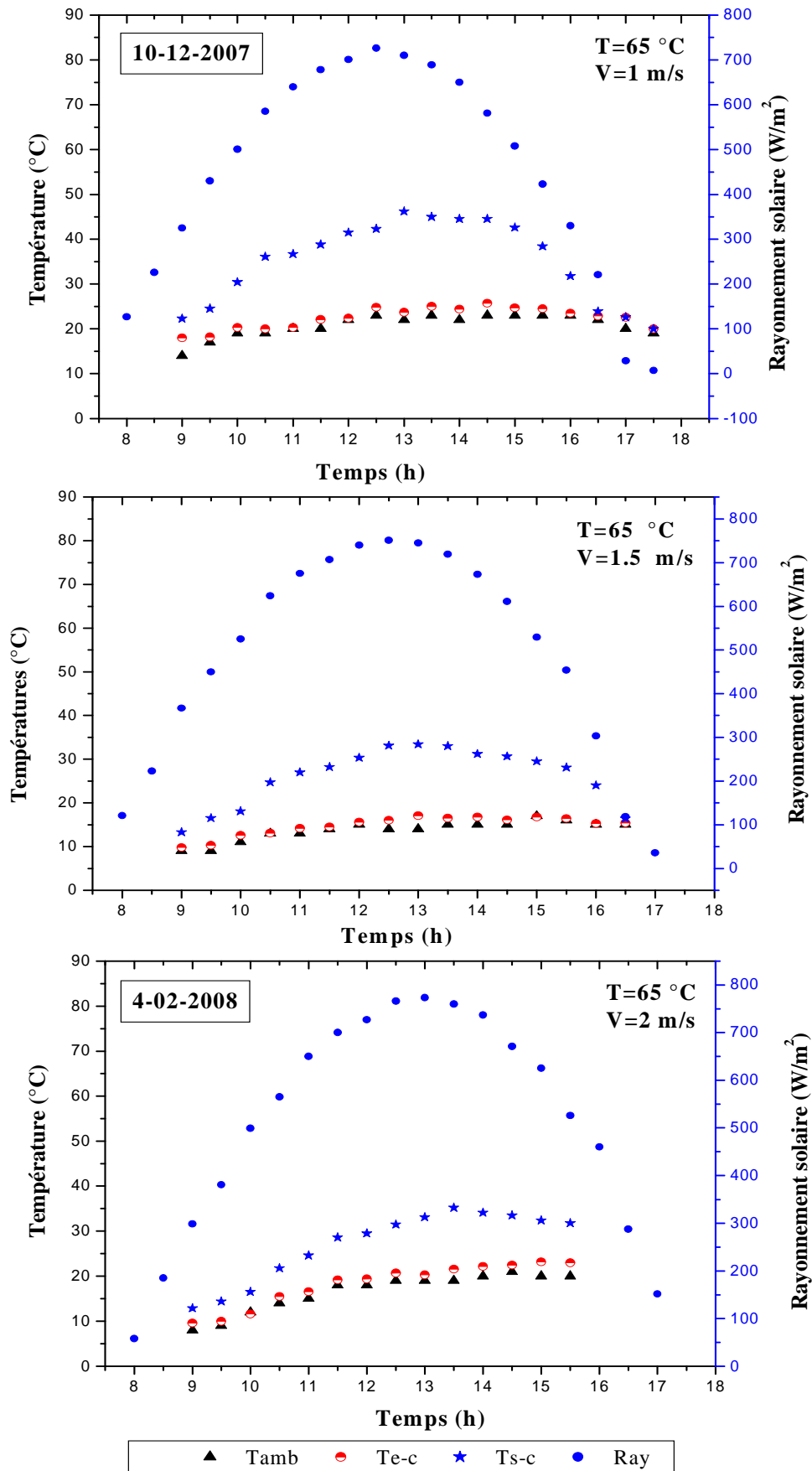


Figure III.2d : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

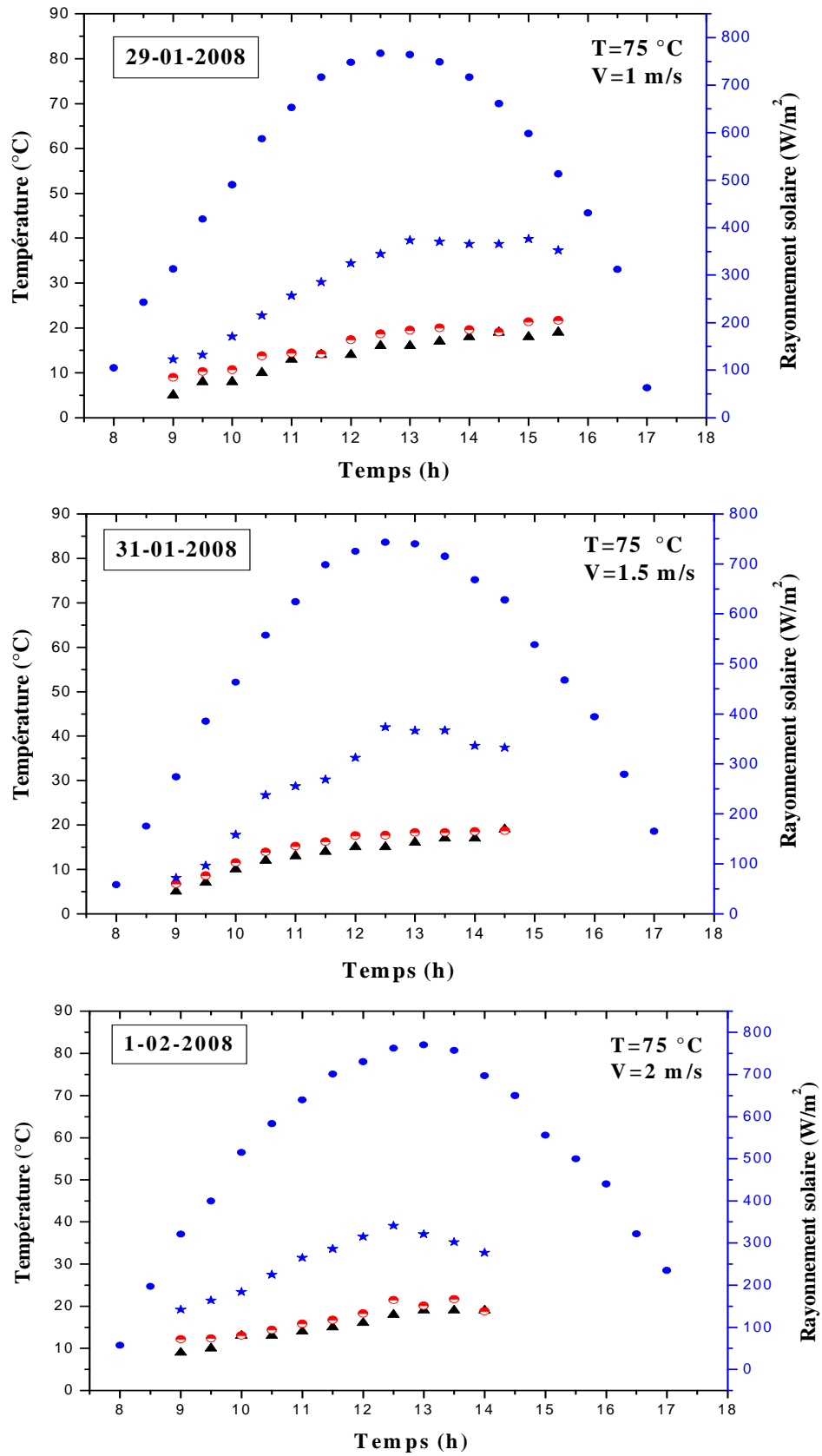


Figure III.2e : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

**III.5.2. Profil des températures du produit et de l'air asséchant**

L'évolution des températures de l'air asséchant, à l'entrée de l'armoire de séchage et la température centrale d'un échantillon de tomate, en fonction du temps de séchage, pour les différentes expériences, est représentée sur les figures (III.3a), (III.3b) et (III.3c).

On peut voir qu'après une augmentation rapide et continue de la température du produit au début de l'expérience due à un gradient important de température entre le milieu asséchant et le produit ; la température du produit croît très lentement et ceci à cause de l'extraction difficile des molécules d'eau qui sont liées dans la structure interne du produit. Enfin de nouveau, la température du produit croît rapidement jusqu'à atteindre la température de l'air asséchant lorsque le produit est complètement séché.

---

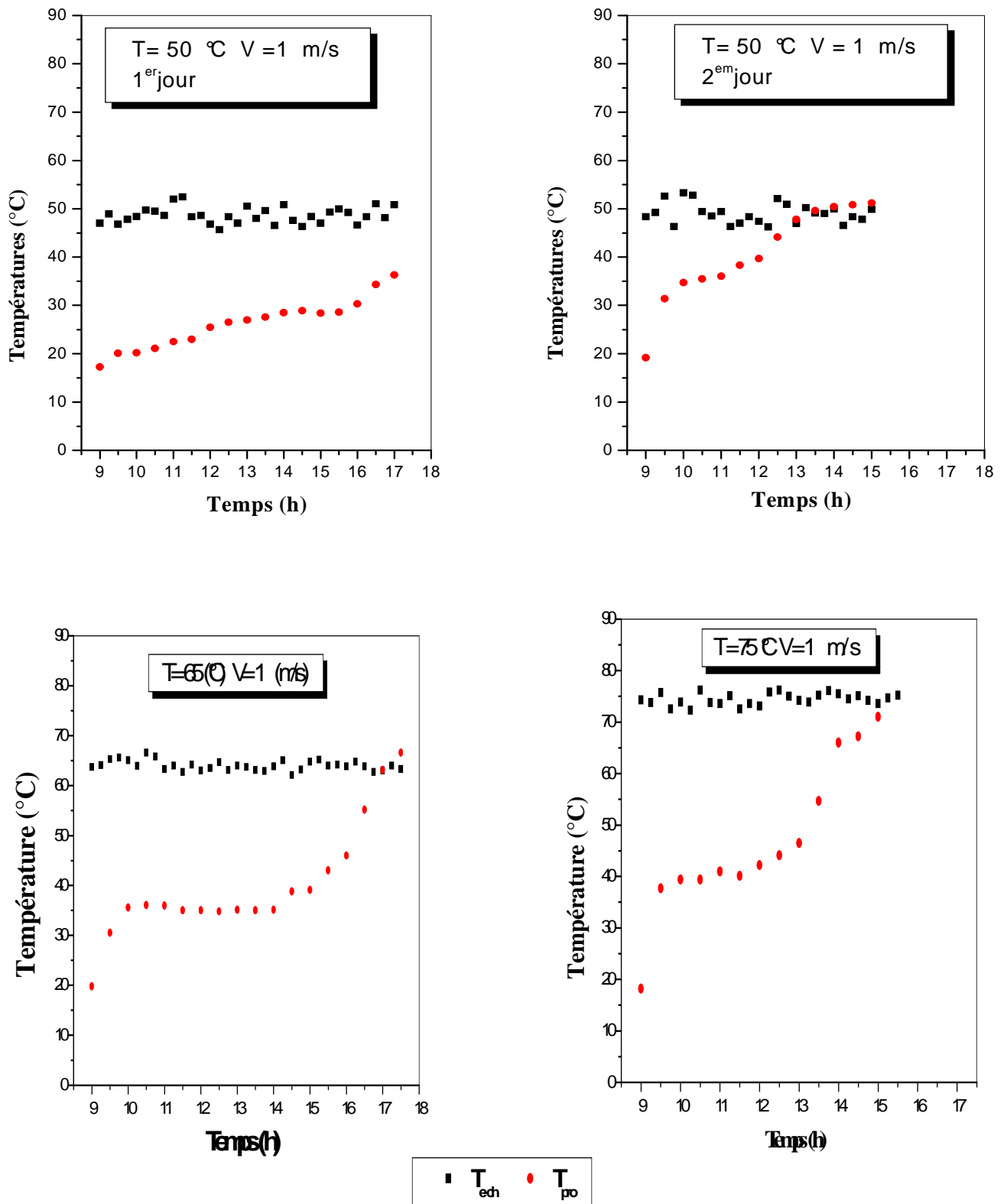


Figure III.3a : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.

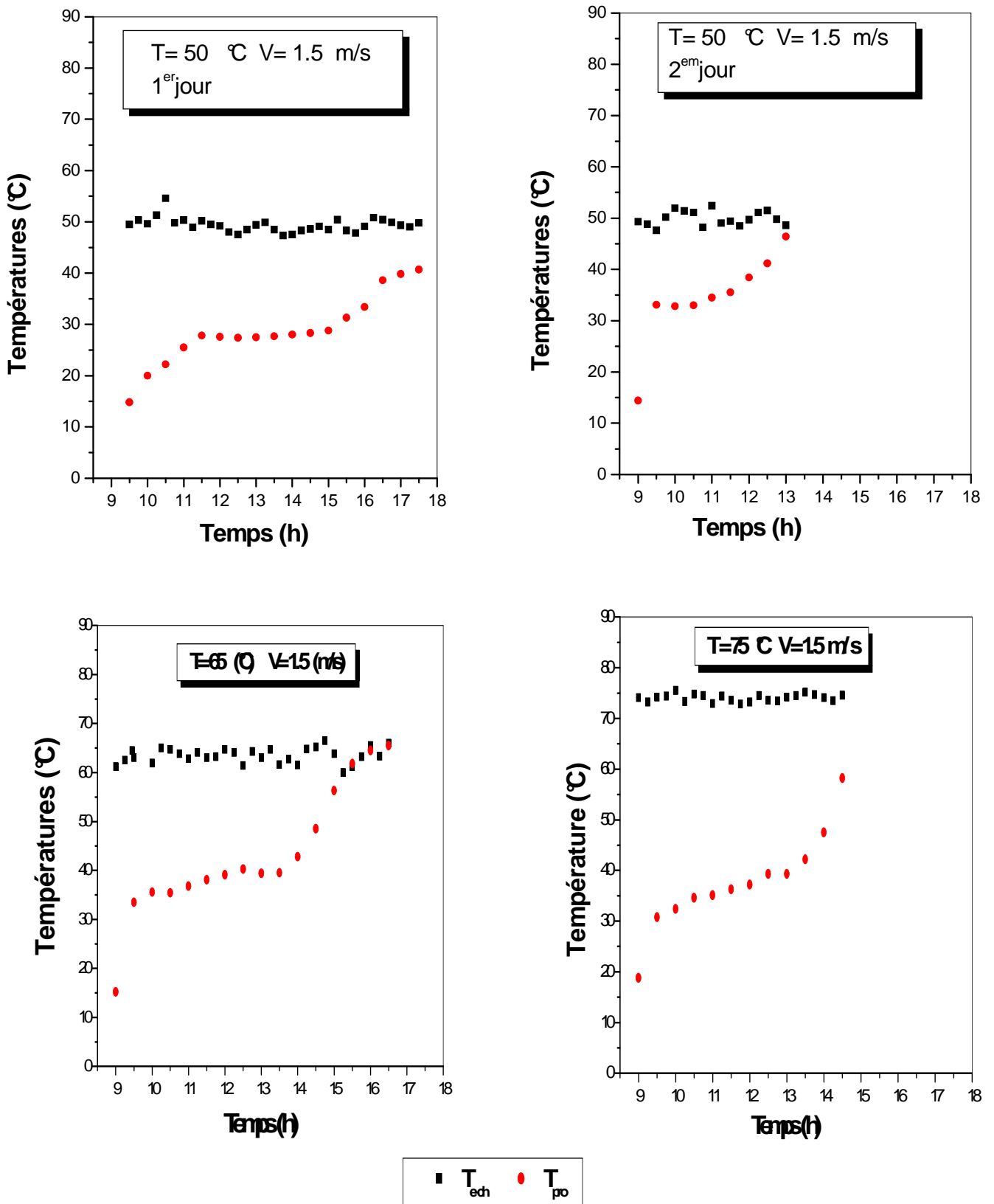


Figure III.3b : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.



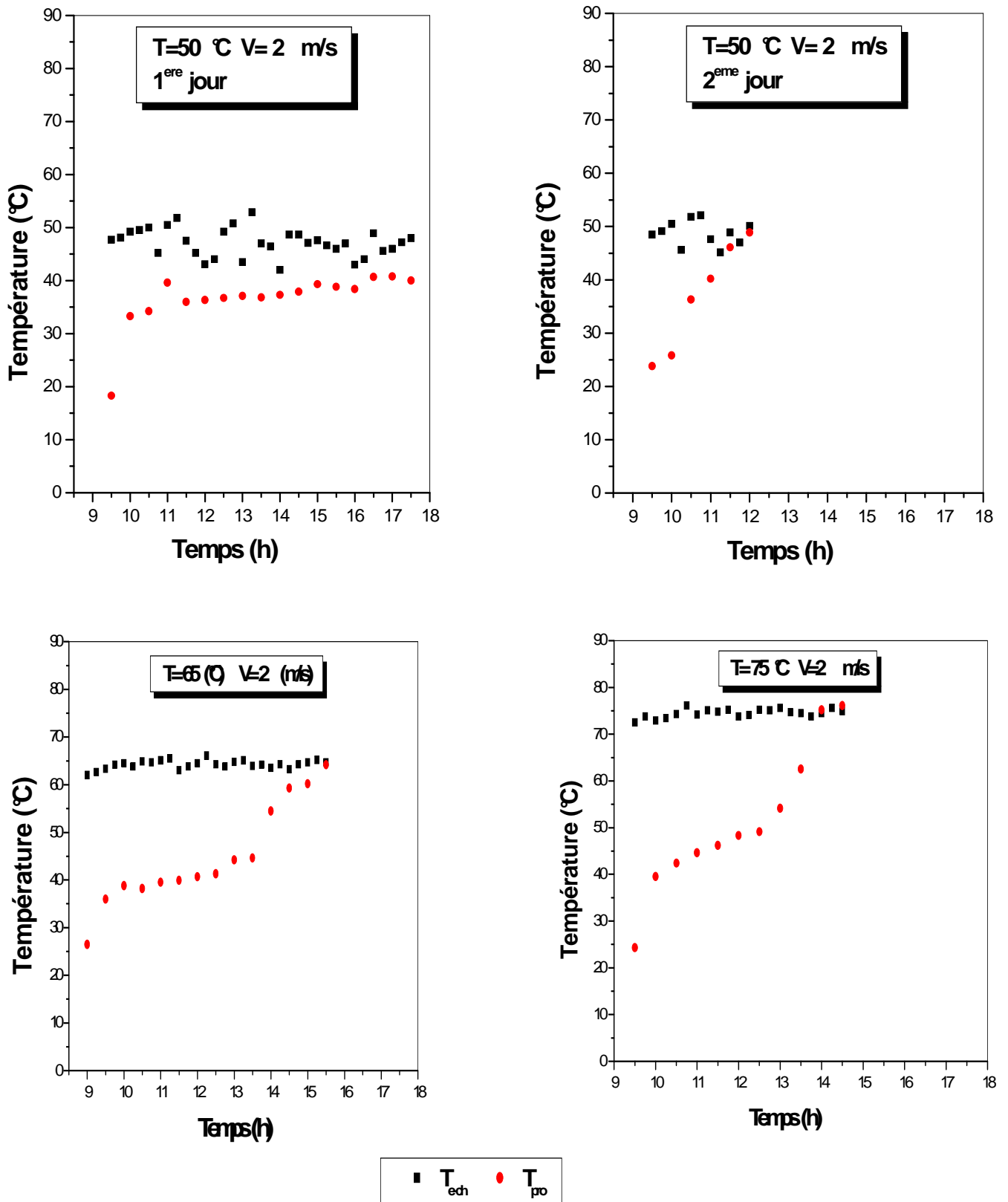


Figure III.3c : Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.

### III.5.3. Effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

#### III.5.3.1. Influence de la température de l'air

Dans les Figure III-4 ci-dessous, la teneur en eau  $X_a$  a été tracée en fonction du temps de séchage pour différentes valeurs de la température d'air : 50, 65 et 75°C et pour les vitesses d'air : 1, 1,5 et 2 m/s.

Les tranches de tomate de teneur en humidité initiale environ 93,24 % (W.b) ont été séchées à la teneur en humidité finale environ de 13 % (W.b).

Il est clair et évident que sur ces figures III.4, la teneur en eau diminue sans interruption avec le temps de séchage. On remarque par exemple pour  $V=1$  m/s, l'augmentation de la température d'air de  $T=50^\circ\text{C}$  à  $T=65^\circ\text{C}$  a engendré une diminution du temps de séchage à environ 35,71 %. Une température de  $75^\circ\text{C}$  a diminué le temps de séchage à environ 53,57% par rapport au temps imparti au séchage avec une température de  $50^\circ\text{C}$ . On remarque aussi au niveau des autres vitesses que la température influe d'une façon considérable sur le temps de séchage ; ceci est conforme aux résultats présentés par A. Vega-Galvez et al. Pour le séchage de paprika rouge [32], M. Kouhila, A. Belghit et al. pour le séchage de la menthe [33], A. Belghit, M. Belahmidi et al. [34], S. Kooli, A. Fadhel et al. pour le séchage de poivron rouge [35], A. R. Celma, S. Rojas et al. [36]. Ceci est du à une augmentation du transfert thermique entre l'air et le produit à sécher. L'air chauffe le produit, en augmentant sa pression de vapeur, ce qui engendre un écart de pression partielle de vapeur d'eau entre l'air et le produit amenant à une accélération de la migration d'humidité dans le produit, ce qui favorise l'évaporation de l'eau du produit.

---

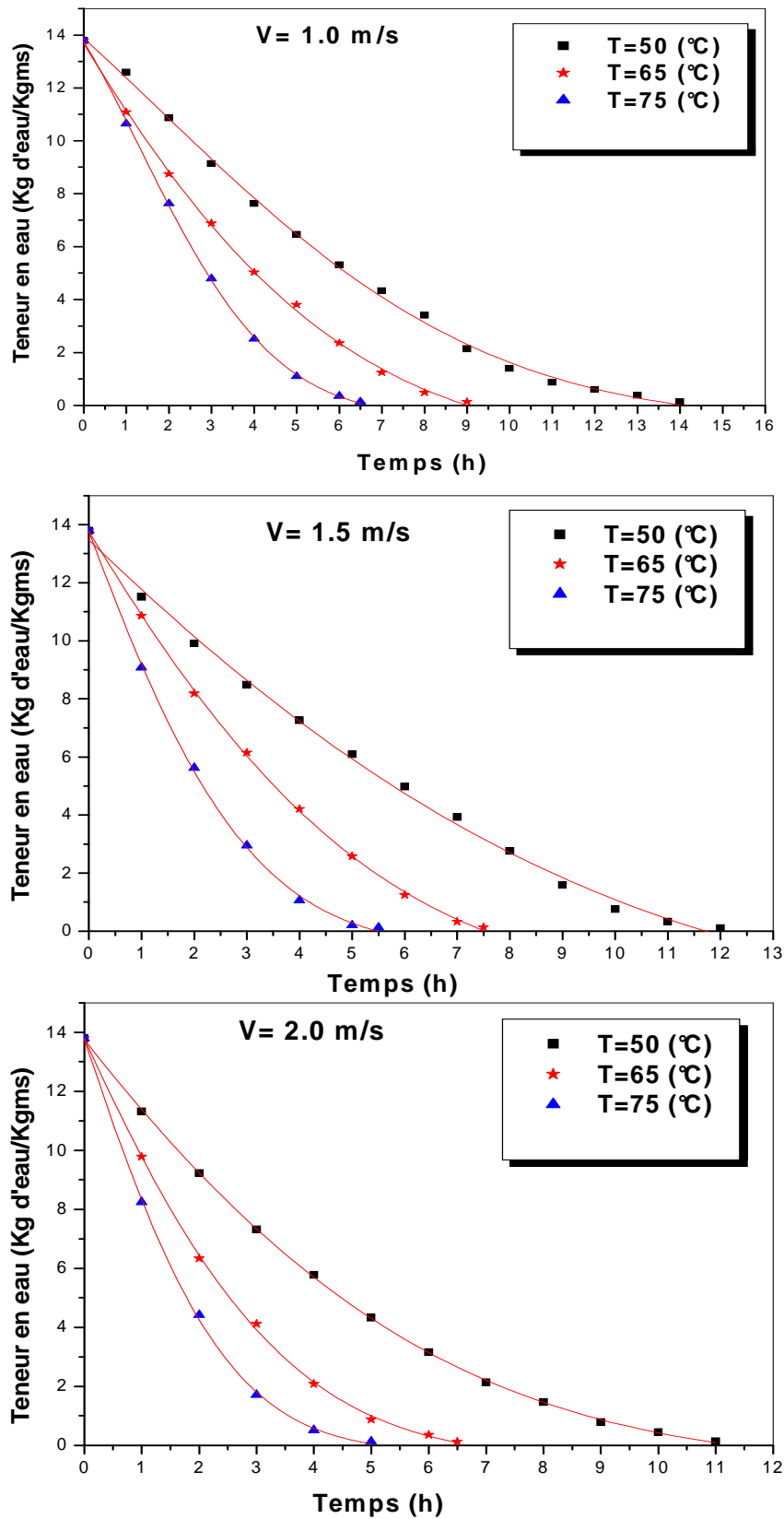


Figure III-4 : Influence de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.

### III.5.3.2. Influence de la vitesse de l'air

D'après les figures ci-dessous (III.5) on remarque que l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant influe négativement sur le temps de séchage. Comme c'est illustré dans la figure III.5b, la vitesse variant de 1 m/s à 1,5 m/s a engendré une baisse en temps de séchage de 8,5 h à 7,5 h (une diminution de 11,76%). De même, un accroissement en vitesse de  $V=2$  m/s a diminué le temps de séchage d'environ 6,5 h. Cette diminution est de 23,53% et 13,33% respectivement à  $V=1$  m/s et  $V=1,5$  m/s. Le même phénomène de variation est remarqué pour les autres températures : figure III.5a et figure III.5c

L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température de l'air. Cela est dû à la baisse de température du produit (refroidissement) causé par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant d'où une diminution de la pression de la vapeur d'eau ce qui engendre une diminution de l'évaporation de l'eau (Madamba et al., 1996 [37], S. Lahsasni, M. Kouhila, et al 2004, [38], S. J. Babalis, V. G. Belessiotis 2004, [39], A. Kaya, O. Aydin et al 2007, [40], A. Maskan, S. Kaya , M. Maskan 2002, [41]).

---

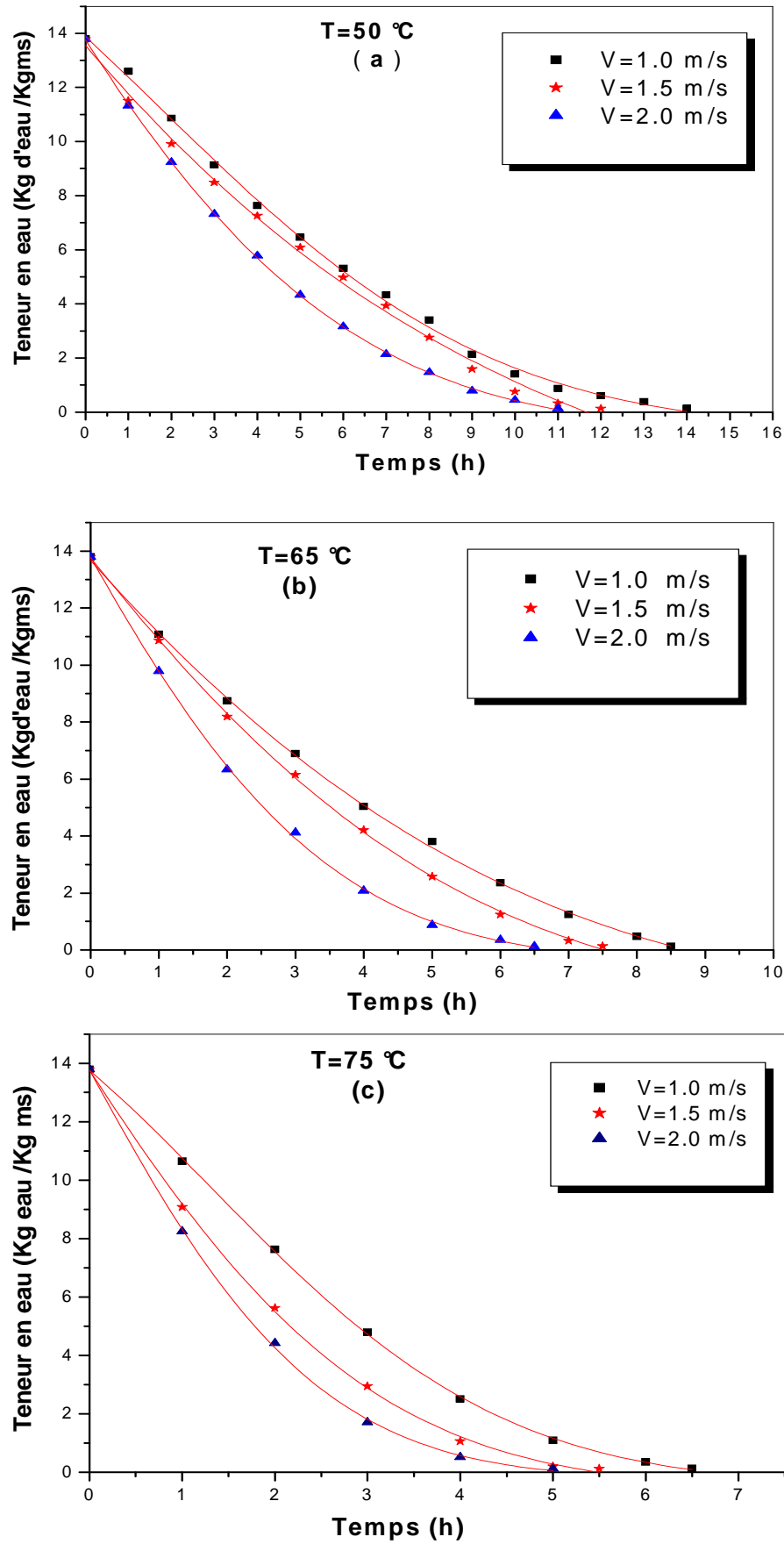


Figure III.5 : Influence de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du durée de séchage.

#### III.5.4. Cinétique de séchage

Les variations de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage et en fonction de la teneur en eau du produit sont illustrées par les figures. III.6 et III.7 pour les différentes températures et vitesses.

Lors de l'opération de séchage, on observe la présence d'une seule phase de séchage celle de la phase à allure décroissante, l'absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à allure constante.

Ce résultat indique probablement que le mécanisme de diffusion est le mécanisme physique le plus susceptible qui régit le mouvement d'humidité dans ces échantillons. Ces résultats sont conformes aux différents travaux réalisés avec les produits agricoles C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, A. Ojo (2006), [42], S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz (2002), [43], I. Doymaz (2005), [44], G. P. Sharma, R. C. Verma, P. B. Pathare (2005), [45], K. Sacilik et al. [31].

De la figure III.6 et III.7, on constate que la vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de la température de l'air asséchant. Aux faibles teneurs en eau du produit, les effets de la température et de la vitesse de l'air de séchage sont presque négligeables. Ceci peut être expliqué par le fait que les faibles valeurs de la teneur en eau du produit représentent de faibles quantités d'eau à l'intérieur du produit. L'augmentation de la différence de température entre l'air de séchage et le produit a pour résultat l'accélération de la migration de l'eau. On a observé donc que le facteur principal influençant l'opération de séchage est la température de l'air asséchant.

---

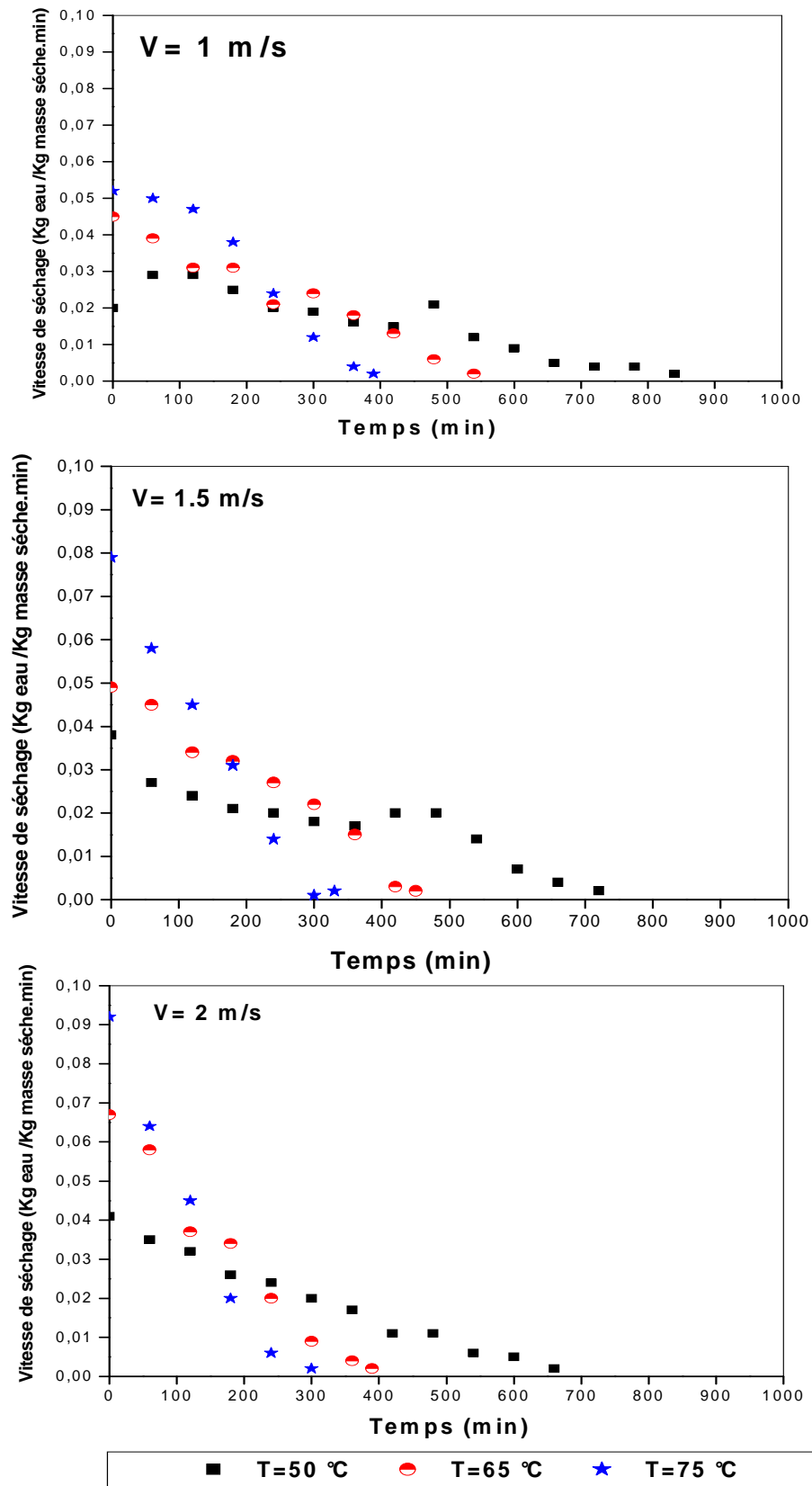


Figure III.6 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du durée de séchage.

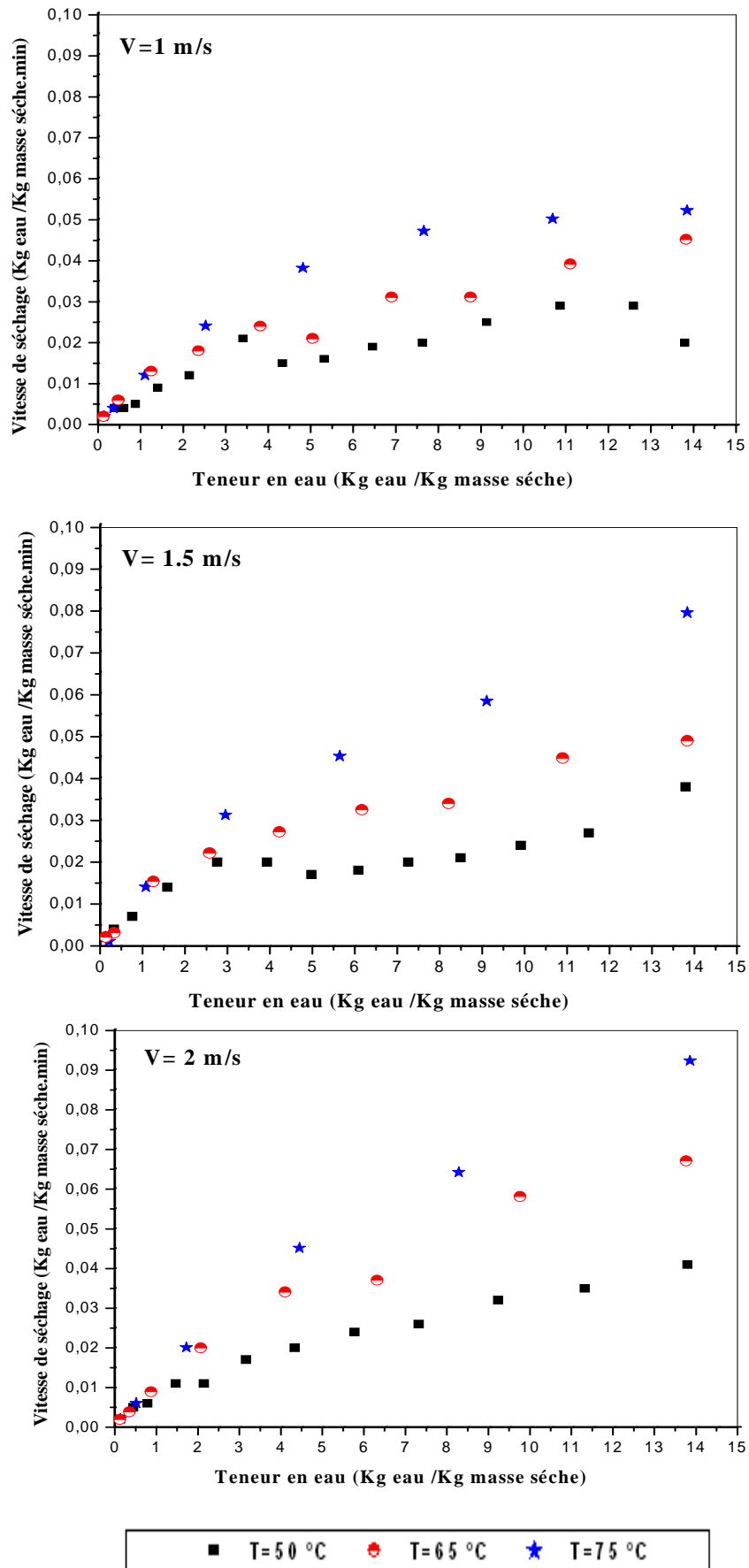


Figure III.7 : Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit



### III.5.5. Calcul de la diffusivité efficace

Durant les processus de séchage du produit il y a un déplacement de l'eau du produit à l'environnement au cours du temps, jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Selon plusieurs auteurs, le produit séchant à l'air a dans la plupart des cas une période courte de séchage à allure constante, suivie d'une longue période de séchage à allure décroissante (Madamba et autres, 1996 [37]). Dans ce cas, la diffusion moléculaire du liquide dans le produit est le mécanisme limitateur (Foust, Wenzel, bloc, Maus, Et Andersen, 1980). Le mécanisme de séchage dans la période à allure décroissante est habituellement analysé par l'équation de la diffusion de Fick [46].

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla [D_{eff} (\nabla X)] \quad (III-1)$$

Avec les conditions initiales et aux limites appropriées suivantes:

- 1- homogénéité de la teneur en eau à l'intérieur des tranches de tomate au début du processus de séchage,
- 2- la quantité d'eau contenue sur la surface du produit  $X(r)$  reste constante avec le temps.
- 3- Existence d'une symétrie par rapport au centre du produit.

La solution analytique, de cette équation développée par Crank (1975) pour calculer la teneur en eau moyenne à l'intérieur du produit en fonction du temps  $t$ , en supposant la distribution d'humidité initiale uniforme, rétrécissement négligeable, coefficient de diffusion et température constants. L'humidité réduite peut être exprimée comme suit:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (III-2)$$

$D_{eff}$  : est la diffusivité efficace ( $m^2/s$ ),

$L$  : est l'épaisseur de la tranche de tomate (m),

$n = 1, 2, 3...$  Le nombre de limites prises en compte.

Pour les longues périodes de séchage, les limites de la série d'addition dans l'équation III-2 correspondant à  $n > 1$  sont petites, l'équation III-2 peut être simplifiée uniquement à la première limite de la série et le rapport d'humidité a été simplifié à  $(X/X_0)$  parce que  $X_e$  était relativement petit comparé à  $X$  et  $X_0$ . Puis, l'équation III-2 peut être écrite en forme logarithmique [47, 48, 49] :

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4} \frac{t}{L^2} \quad (\text{III-3})$$

La diffusivité efficace a été calculée en utilisant la méthode des pentes. Le coefficient de diffusion est déterminé en traçant des données expérimentales de séchage en termes de  $\ln(MR)$  en fonction de  $t/L^2$ , comme montré dans la figure III.8 [6].

La pente de la courbe est une mesure de la diffusivité efficace. On peut voir que la variation est non linéaire, toutes les valeurs expérimentales montrent un comportement semblable. La nature non linéaire de la courbe est peut être due aux changements de la température de l'échantillon, bien que la température de l'air externe est constante, l'équilibre entre le spécimen et l'air n'est pas nécessairement atteint [50].

Dans l'équation III-2, l'épaisseur  $L$  était supposée constante dans tout le processus de séchage. Cependant, dans l'expérience, les échantillons de tomate n'ont pas maintenu cette première épaisseur mais se sont rétrécis pendant qu'ils séchaient. La réduction d'épaisseur était plus apparente que la diminution de diamètre de l'échantillon. C'était évident à partir des observations et des photographies des échantillons de tomate prises à différentes étapes du séchage, où on assiste à une rigidité accrue de l'échantillon dans la direction radiale. Une augmentation de la température de l'échantillon fait augmenter le coefficient de diffusion tandis que le rétrécissement et le durcissement le font diminuer pendant l'expérience. La nature réelle de la courbe dépend de l'importance relative de ces effets d'opposition.

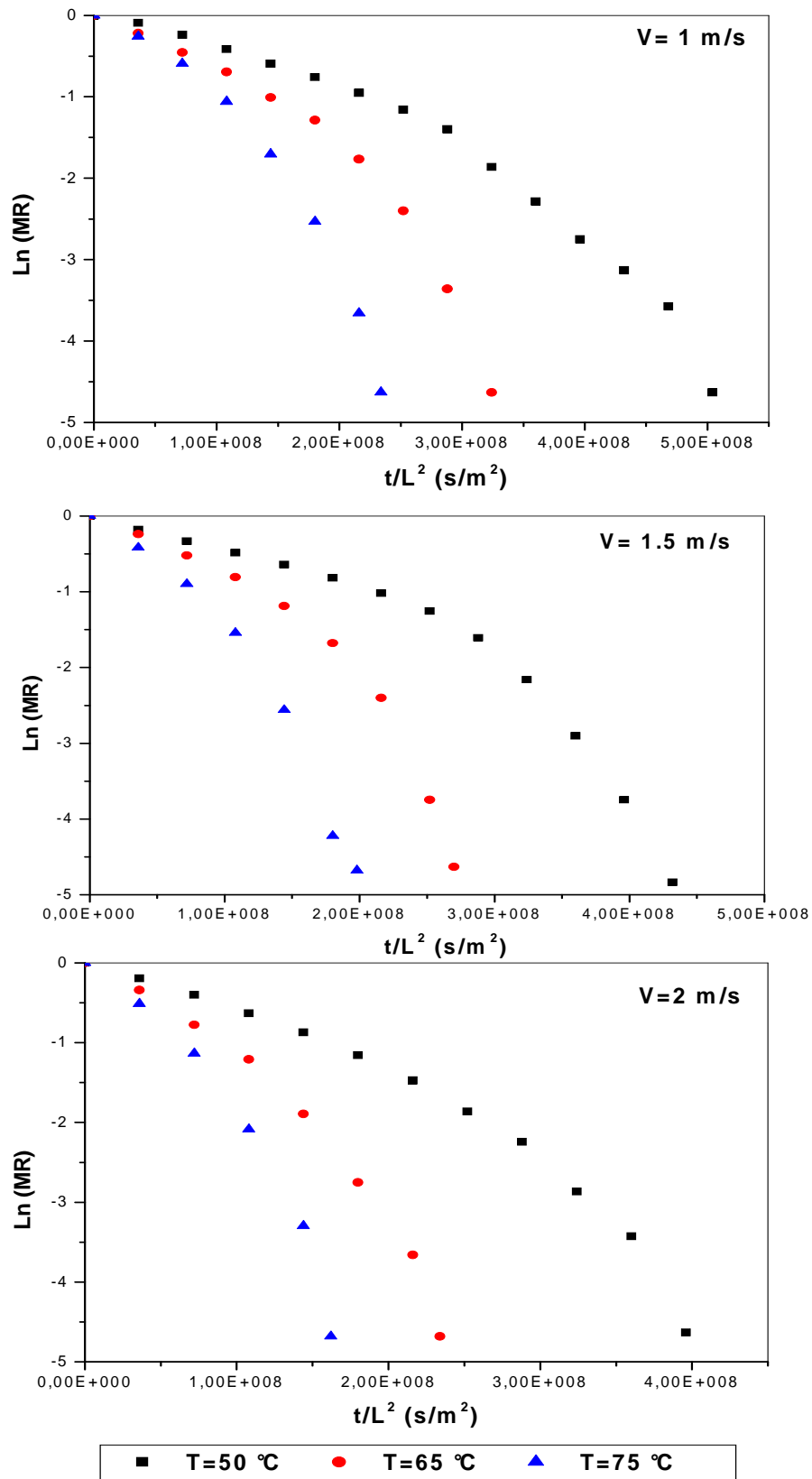


Figure III.8 : Rapport entre  $\ln(MR)$  et  $t/L^2$  pour la tomate.

G. Giovanelli et al, [47], Hawlader, Uddin, Ho, et Teng (1991), [50] ont trouvé un comportement semblable, en étudiant la cinétique de séchage des tomates coupées en tranches à différentes températures et débits d'air. Ceci a été attribué au rétrécissement des échantillons pendant le séchage et, par conséquent, à une réduction d'épaisseur, ayant pour résultat un enlèvement plus rapide de l'eau. Hawlader et autres (1991) ont proposé que  $L$  dans l'équation (III-2) devrait être remplacé par une épaisseur modifiée  $L'$  liée au contenu d'humidité par l'équation suivante :

$$\frac{L'}{L} = \left( \frac{m_t}{m_0} \right)^n \quad (\text{III-4})$$

Où

$L$  : est l'épaisseur du produit (m).

$m_0$  et  $m_t$  (kg) : sont les masses de l'échantillon au temps zéro et au temps de séchage  $t$  respectivement ;

$n$  est un index optimisé pour obtenir une ligne droite pour les données expérimentales de  $\ln(\text{MR})$  en fonction de  $t / L^2$ .

Dans ce cas l'équation III-3 devient :

$$\ln \left( \frac{X}{X_0} \right) = \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4} \cdot \frac{t}{L'^2} \quad (\text{III-5})$$

On a trouvé une valeur de  $n = 0,14$  qui a eu comme conséquence presque une ligne droite pour les conditions expérimentales quand le  $\ln(\text{MR})$  a été tracé en fonction de  $t/L^2$ , comme c'est indiqué dans la figure III.9. L'index  $n = 0,14$  [50] représente probablement les effets combinés de la température et du rétrécissement de l'échantillon. L'importance de l'index dépendrait des caractéristiques de la substance. Une valeur de  $n = 0$  n'impliquerait aucun rétrécissement tandis qu'une valeur de  $n = 1$  indiquerait que le rétrécissement de volume est égal au volume de l'eau perdue.

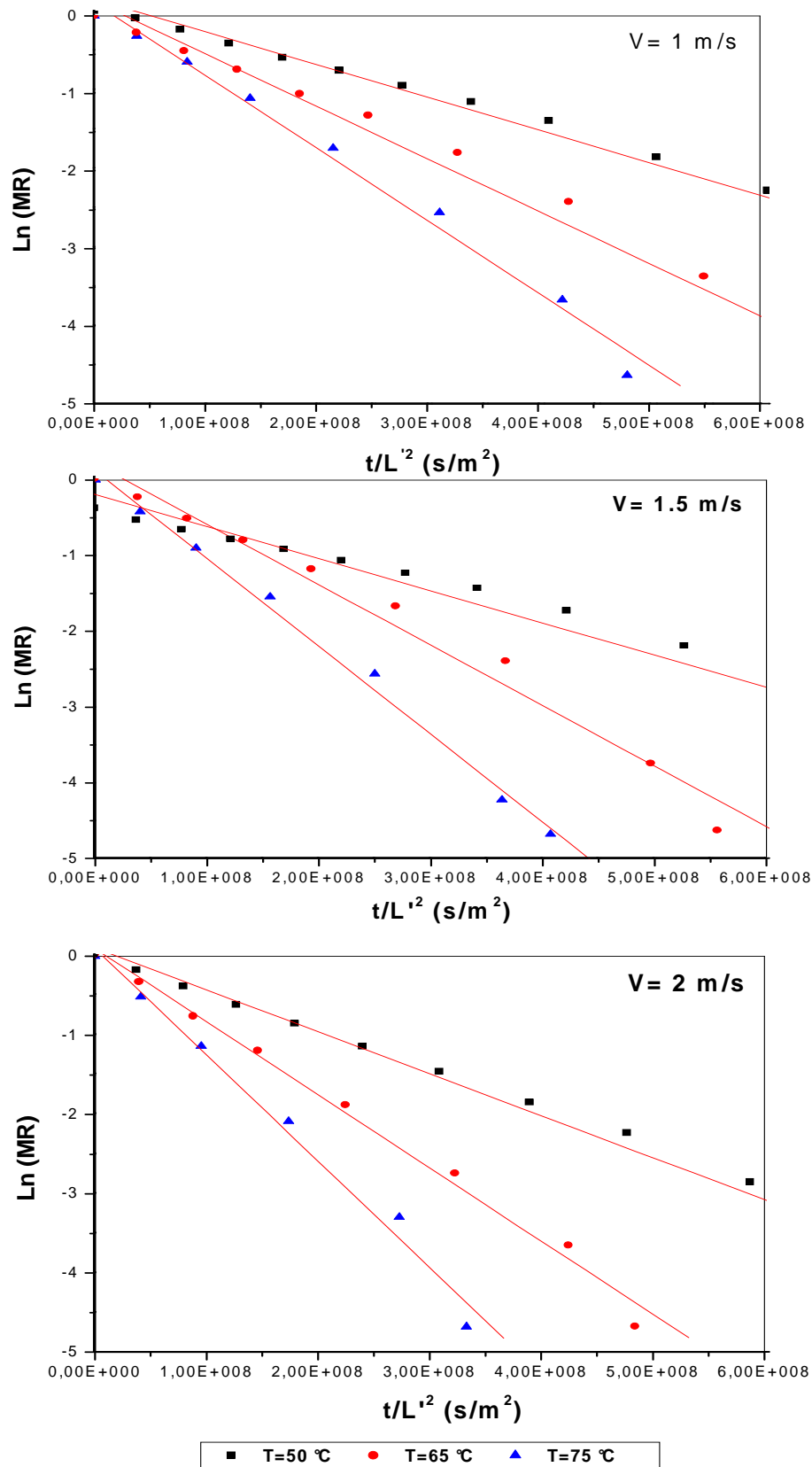
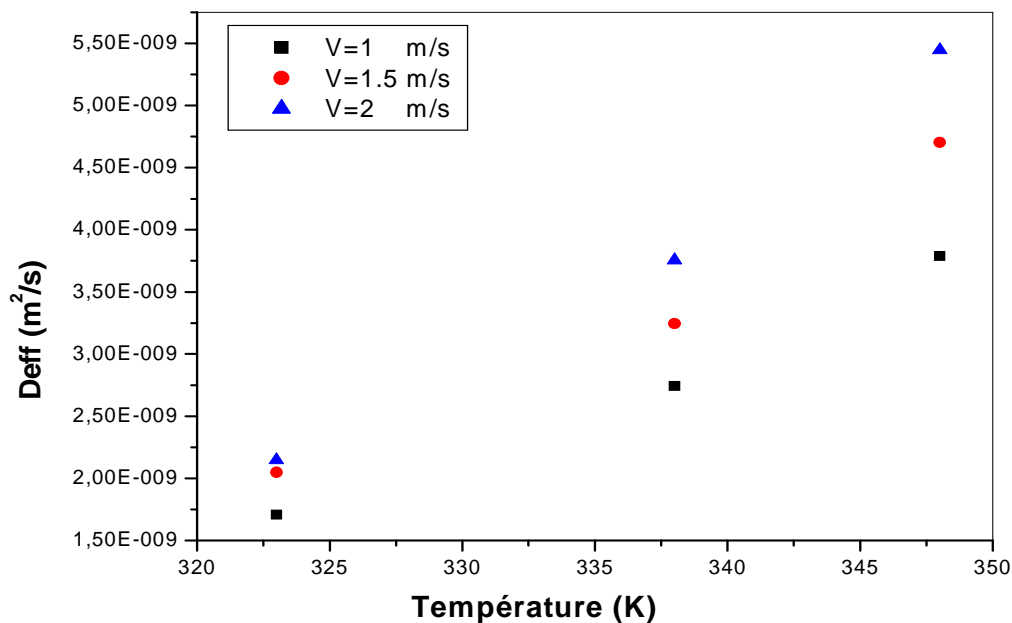


Figure III.9 : Rapport entre  $\ln(MR)$  et  $t/L^2$  pour la tomate (Rétrécissement corrigé).

Les valeurs déterminées de  $D_{\text{eff}}$  pour les différentes températures et vitesses d'air sont indiquées dans le tableau III.1. Les diffusivités efficaces des échantillons à 50, 65 et 75 °C pour 1, 1,5 et 2 m/s changent dans la gamme de:  $1,708.10^{-9}$  à  $5,445.10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs varient en général de  $10^{-11}$  à  $10^{-9}$  [3] m<sup>2</sup>/s pour la nourriture et les produits agricoles.

Les valeurs de  $D_{\text{eff}}$  pour des tomates sont semblables à ceux estimées par différents auteurs pour des tomates et d'autres légumes:  $2,3 - 9,1.10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour des tomates séchées de 60 à 110 °C (Giovanelli, Zanoni, Lavelli, et Nani, 2002, [47]).  $3,72 - 12,27 .10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour des tomates séchées de 45 à 75 °C (Akanbi et autres, 2006, [42]);  $3,91 - 6,65.10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s pour des tomates séchées de 55 à 70 °C (Ibrahim Doymaz, 2007, [6]).  $1,225 - 3,278.10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour la pomme de terre séchée de 60 à 80 °C (E. Akpinar, A. Midilli b, Y. Bicer, 2003, [49]) . Les petites différences des valeurs de la diffusivité sont dues aux différences dans les variétés du produit, le type de matériel de séchage utilisé, les conditions opératoires et d'autres paramètres non contrôlés.

On peut voir de la figure III.10 que la diffusivité efficace pour les tranches de tomate a augmenté avec l'augmentation de la température et la vitesse de l'air, due au mouvement rapide de l'eau à température élevée (I. Doymaz pour le séchage de tomate [6], K. Sacilik et al pour le séchage de prune [1], I. Doymaz pour le séchage de potiron [3], A.R.Celma et al [36]).



**Figure III.10 : Influence de la température et de la vitesses de l'air asséchant sur la diffusivité efficace de l'eau.**

T (°C)	V=1m/s $D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	V=1,5m/s $D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	V=2m/s $D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)
50	1,708.10 <sup>-9</sup>	2,049.10 <sup>-9</sup>	2,146.10 <sup>-9</sup>
65	2,743.10 <sup>-9</sup>	3,243.10 <sup>-9</sup>	3,755.10 <sup>-9</sup>
75	3,788.10 <sup>-9</sup>	4,701.10 <sup>-9</sup>	5,445.10 <sup>-9</sup>

**Tableau III.1 : Valeurs des coefficients de diffusion efficaces pour la tomate.**

### III.5.6. Energie d'activation

La corrélation entre les conditions de séchage et les valeurs déterminées de la diffusivité efficace peut être exprimée en employant une équation de type d'Arrhenius (Madamba et al, 1996 [37]; S. J. Babalis, 2004 [39]) comme :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{III-6})$$

Où :

T est la température absolue de l'air (K) ,

R est la constante de gaz parfaits (8,314 J/mol K),

$D_0$  est le paramètre de diffusion d'Arrhenius (m<sup>2</sup>/s),

$E_a$  est l'énergie d'activation (KJ/mol)

L'équation III-6 peut être linéarisée en employant le logarithme comme suit :

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (\text{III-7})$$

L'énergie d'activation ( $E_a$ ) a été calculée à partir de la pente du graphe  $\ln(D_{eff})$  en fonction de  $1/(T + 273)$  (voir figure. (III.11)). Le graphe représente une droite dans la gamme de température, indiquant la dépendance d'Arrhenius. Les valeurs calculées de l'énergie d'activation ont été rapportées dans le tableau (III.2). Les valeurs obtenues changent d'un minimum de 29,672 KJ/mol à un maximum de 34,713 KJ/mol.

Tandis que dans ce tableau, on peut observer les élévations d'énergie d'activation avec la vitesse de séchage croissante (S. J. Babalis, V. G. Belessiotis [39]). Ce fait doit être pris en considération pour concevoir les dispositifs de séchage et pour calculer les besoins de l'énergie d'extraction de l'eau du produit.

Les valeurs comparatives de  $E_a$  avec d'autres produits agricoles disponibles dans la littérature sont indiquées dans le tableau III.2. L'énergie d'activation pour les tranches de tomate est inférieure à l'énergie d'activation de persil et des haricots verts ; et supérieure à l'énergie d'activation de la carotte et des olives.

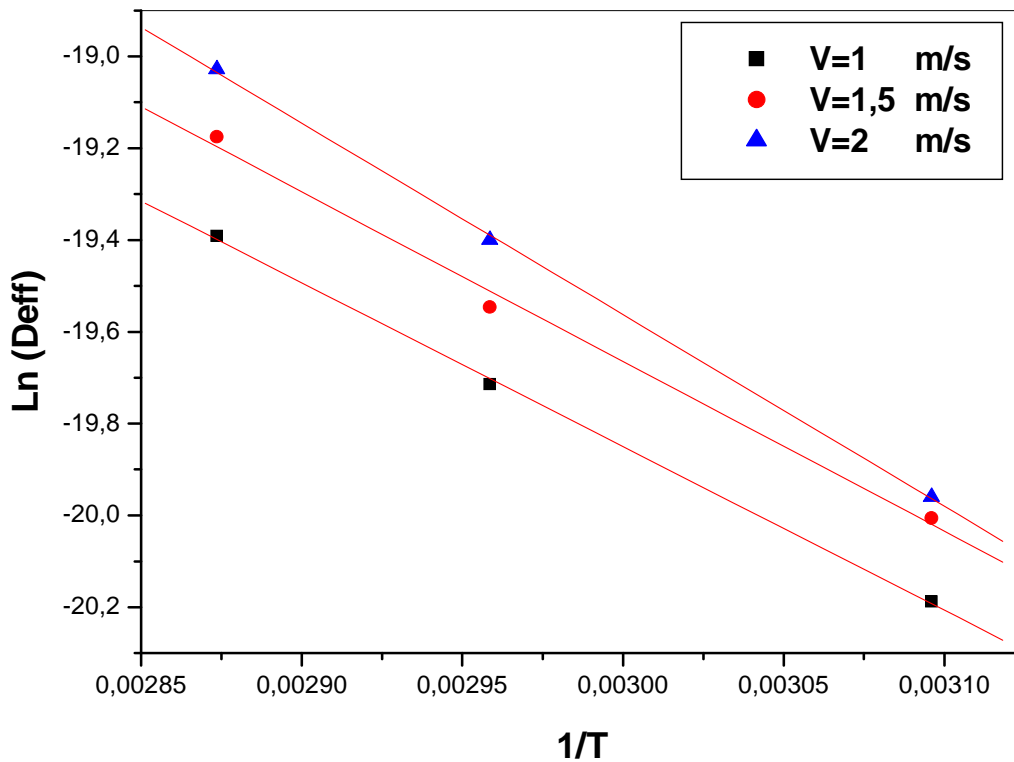


Figure III.11 : Influence de la température de l'air sur la diffusivité efficace à vitesse constante



Produit	$E_a$ (KJ/mol)	Références
olive	15,77	A.R.Celma (2007), [36]
Carotte	28,36	I.Doymaz (2004), [51]
Persil	43,92	I.Doymaz (2006), [52]
Haricots verts	35,43	I.Doymaz (2005), [53]
Tomate	29,672	Actuel travail
	30,741	
	34,713	

**Tableau III.2 : Énergie d'activation pour le séchage de divers produits**

D'après les résultats expérimentaux, on peut choisir des conditions de séchage optimales qui sont : des tomates coupées en tranches séchées à une température de 65 °C, et une vitesse de l'air de 1,5 m/s.

Ce choix est basé sur plusieurs critères qui sont :

- 1- Le choix d'une vitesse de 1,5 m/s parce que la différence de temps correspondant à 1,5 - 2 m/s) est petite (approximativement 1 h).
- 2- L'énergie d'activation à la vitesse 1,5 m/s est petite par rapport à l'énergie d'activation à la vitesse de 2 m/s.
- 3- L'inexistence d'une grande différence entre la diffusivité efficace à la vitesse 1,5 et 2 m/s :  $3,243 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour 1,5 m/s et  $3,755 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour 2 m/s.
- 4- L'observation visuelle des différents échantillons de tomates séchées montre que les tomates séchées à 75 °C sont sombres alors que celles séchées à 65 °C sont rouges.
- 5- Les tranches de tomate séchées à 65°C ont une texture douce avec un rétrécissement plus ou moins apparent, celles séchées à 75°C sont croquantes.
- 6- Les tomates sont une source riche d'acide ascorbique, cependant, on a rapporté que le traitement des tomates a un effet très néfaste sur leur contenu d'acide ascorbique. La température à laquelle les tomates sont séchées en présence de l'air est le facteur le plus important affectant le taux de destruction d'acide ascorbique [54]. Des études utilisant des températures plus élevées pour le séchage des tomates, ont indiqué une perte significative d'acide ascorbique. Par exemple, Lavelli et autres (1999), [55] ont observé

une perte de 88% en acide ascorbique quand des tomates ont été déshydratées à 80 °C à un contenu d'humidité de 10%. Zaroni et autres (1999), [56] ont prouvé que la perte d'acide ascorbique dépend en grande partie de la température. Des pertes significatives rapportées d'acide ascorbique de 40 et 80% aux températures de 80 et 110 °C, respectivement correspondant à une humidité de 80%.

### **III.5.7. Influence de l'épaisseur du produit sur la cinétique de séchage**

Les tranches des tomates ont été séchées avec les épaisseurs : 1, 1,5 et 2 cm, à la température de l'air de séchage 65°C et à la vitesse 1,5 m/s. De la figure III-12, on peut voir que la teneur en eau diminue continuellement avec le temps de séchage. Comme prévu pour ces courbes de séchage, l'épaisseur a eu beaucoup plus d'effet sur la teneur en humidité des tranches de tomate. En d'autres termes, la diminution de l'épaisseur de tranche a eu comme conséquence une diminution de temps de séchage. Les temps de séchage, pour atteindre le contenu d'humidité finale, étaient de 7,5, 9 et 15 h pour une épaisseur de tomate respectivement égale à 1, 1,5 et 2 cm. L'effet de durcissement de la surface a lieu pour les tranches minces plus rapidement que pour les tranches épaisses, en raison d'un taux initial plus rapide d'évaporation de l'humidité de la surface. Des résultats semblables ont été trouvés par A. El-Beltagy et al [57], M. H. Nguyen, W. E. Price [58], K. Sacilik, A. K. Elicin [48].

Les figures III-13 et III-14 montrent la variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau et du temps de séchage pour les différentes épaisseurs des tranches de tomate. Lors de l'opération de séchage, on observe la présence d'une seule phase de séchage, celle de la phase à allure décroissante.

En plus, on remarque la diminution de la vitesse de séchage en fonction de la diminution de l'humidité et en fonction du temps de séchage. De même on constate que la vitesse de séchage diminue en augmentant l'épaisseur du produit.

---

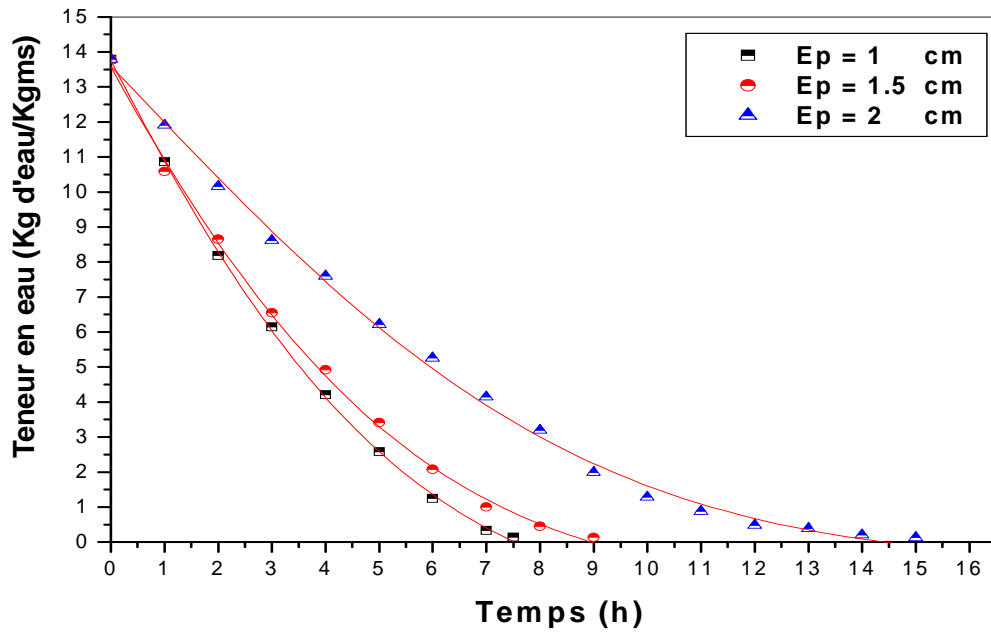


Figure III-12 Variation de la teneur en eau d produit en fonction du temps de séchage

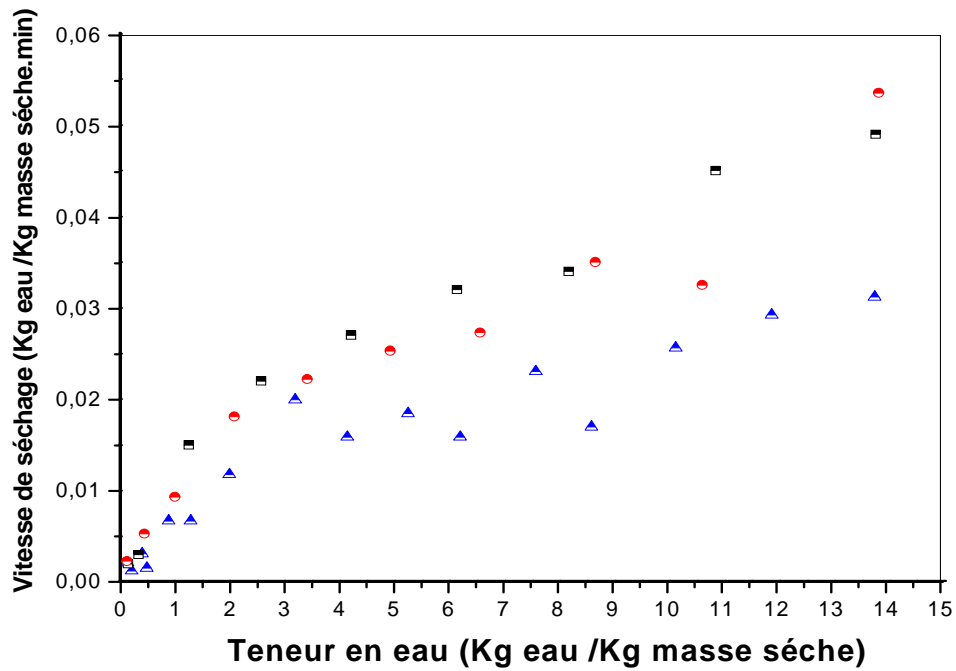
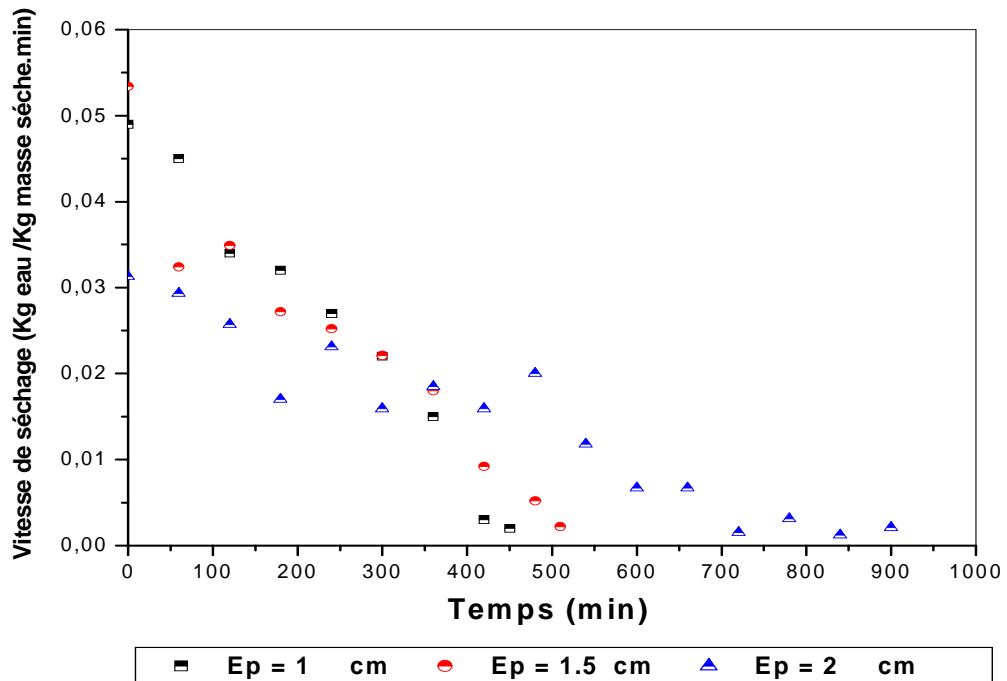


Figure III.13 : Variation de la vitesse de séchage avec la teneur en eau du produit pour les différentes épaisseurs.

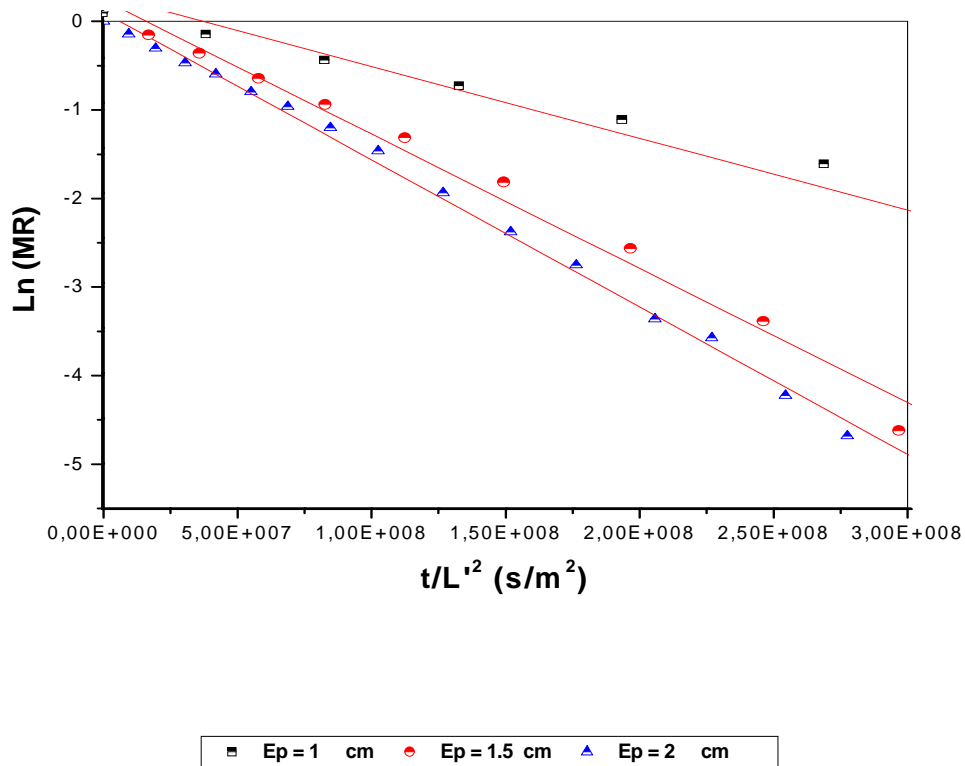


**Figure III.14 : Variation de la vitesse de séchage avec le temps pour les différentes épaisseurs**

### III.5.7.1. Détermination de la diffusivité efficace

Les coefficients de diffusion sont typiquement calculés en traçant les données expérimentales de séchage en termes de  $\ln(MR)$  en fonction de  $t/L^2$ . À partir de la figure III-15, la courbe de  $\ln(MR)$  contre  $t/L^2$  donne une ligne droite avec une pente de :  $B = \pi^2 \cdot D_{\text{eff}} / 4$

Les valeurs de la diffusivité efficace pour 1, 1,5 et 2 cm sont  $3,243 \cdot 10^{-9}$ ,  $6,04 \cdot 10^{-9}$ ,  $6,737 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ , respectivement. Les valeurs de  $D_{\text{eff}}$  pour 1,5 et 2 cm étaient presque deux fois plus grandes que celles pour 1 cm. Ce résultat est prévisible, parce que le modèle de diffusion a supposé que la diffusion a eu lieu uniquement dans une seule direction de l'intérieur à la surface des tranches. Cette prétention était valide pour les tranches minces, dans lesquelles l'effet de bord (diffusion latérale) était négligeable. Dans les tranches épaisses, la diffusion latérale pourrait se produire. Tenant compte de cet effet, le déplacement de l'humidité dans les tranches épaisses pourrait être augmenté. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs M. H. Nguyen, W. E. Price [58], Ibrahim Doymaz [51], A. Maskan, S. Kaya, M. Maskan [41].



**Figure III.15 : Rapport entre  $\ln (MR)$  et  $t/L^2$  pour les différentes épaisseurs de la tomate**

### III.5.8. Influence du traitement sur la cinétique de séchage

Un prétraitement tel que la déshydratation osmotique (comprenant l'immersion du fruit dans un soluté menant à la perte de l'eau par les membranes de la paroi des cellules du fruit) peut être utilisée pour réduire la teneur en eau initiale du produit et par conséquent d'avoir besoin de moins de temps de séchage. Sans compter que réduire le temps de séchage global, la déshydratation osmotique empêche également l'activité enzymatique, maintient la couleur normale du produit et le pousse à maintenir les arômes pendant le séchage [8, 59].

D'après les études qui ont été faites par Josilma S. Souza, Maria F. D. Medeiros et al [59], ils sont arrivés aux conclusions suivantes :

Dans un processus osmotique de déshydratation, plus la perte d'eau est importante plus le processus de déshydratation est meilleur. Les meilleures conditions de pré-traitements sont employées avec une solution osmotique composée de 35% en sucre et 5% en sel.

### III.5.8.1. Préparation des échantillons

D'abord, les tomates ont été lavées avec l'eau et puis coupées en tranches d'épaisseur 1cm, puis plongées dans une solution ternaire de 35 % sucre + 5 % sel de catégorie comestible avec l'eau distillée à la température ambiante pendant une période de 3 h. L'expérience a été également entreprise avec l'addition de 2 % de lactate de calcium.

On a rajouté du calcium à la solution pour plusieurs causes :

Du calcium est souvent employé dans l'industrie alimentaire pour améliorer les propriétés rhéologiques d'un produit aussi bien que pour des raisons techniques. Le calcium préserve la structure des parois dans les fruits et les légumes en agissant l'un sur l'autre avec de l'acide pectique dans les parois pour former le pectate de calcium, qui maintient la fermeté du produit après différents traitements. Le calcium a non seulement un effet principal sur l'intégrité de structure de la membrane, mais joue également un rôle de normalisation dans divers processus qui affectent la fonction de cellules [8].

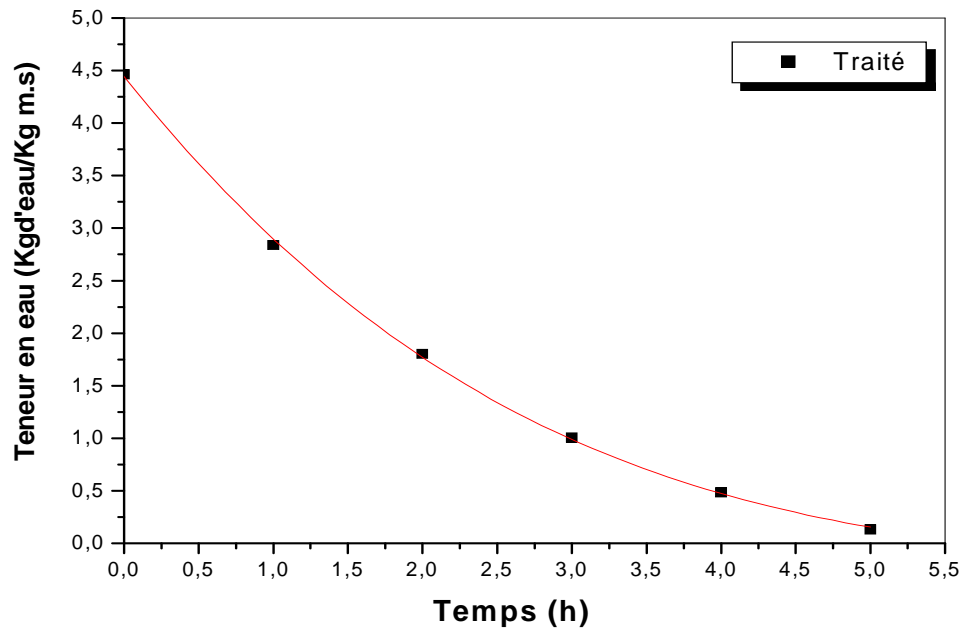
### III.5.8.2. La cinétique de séchage des échantillons traité

L'effet du prétraitement sur la teneur en eau et la cinétique de séchage des tranches de tomate sont montrés sur les figures III-16, III-17 et III-18.

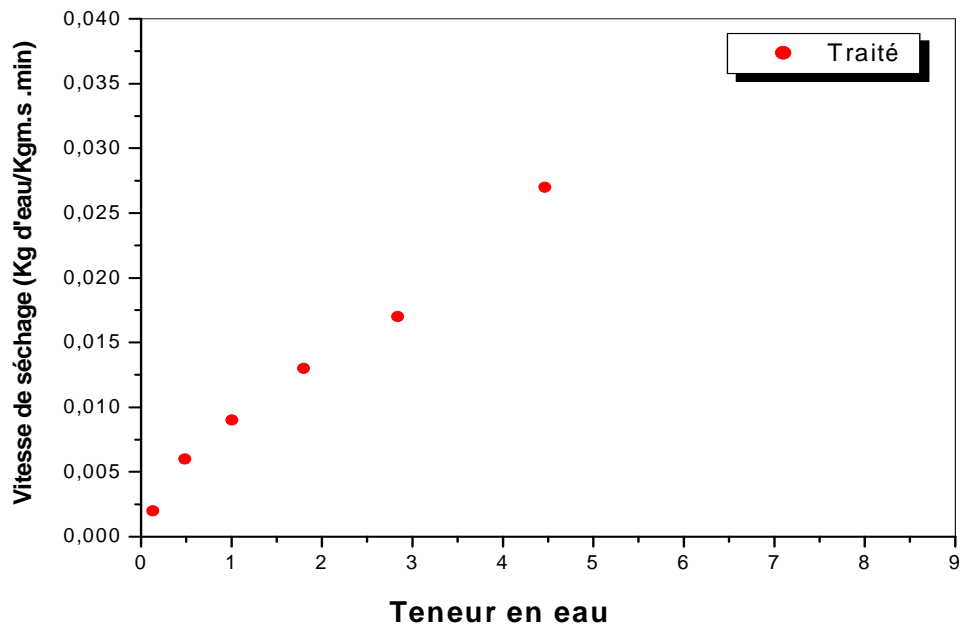
De ces figures, le prétraitement est un facteur très important pendant l'opération de séchage des tomates parce qu'elle affecte le temps de séchage. Le processus de séchage ne demande que 300 min à 65 °C et 1,5 m/s avec les tomates traitées. Le traitement augmente la perméabilité des parois des cellules, de ce fait il favorise une migration plus rapide de l'eau à la surface du produit et réduit le temps de séchage. Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs (I. Doymaz (2004), [60], P. P. Lewicki et al [61], Ibrahim Doymaz [62])

Les échantillons traités avec la solution ternaire ont montré un taux de séchage plus rapide. Il est évident que la vitesse de séchage diminue sans interruption avec le temps de séchage. D'après les figures III-17 et III-18, on remarque l'existence seulement de la phase décroissante. (P. Pani et al [63], T. Mahmutoglu et al [64], E. L. Schultz, M. M. Mazzuco et al [65]).

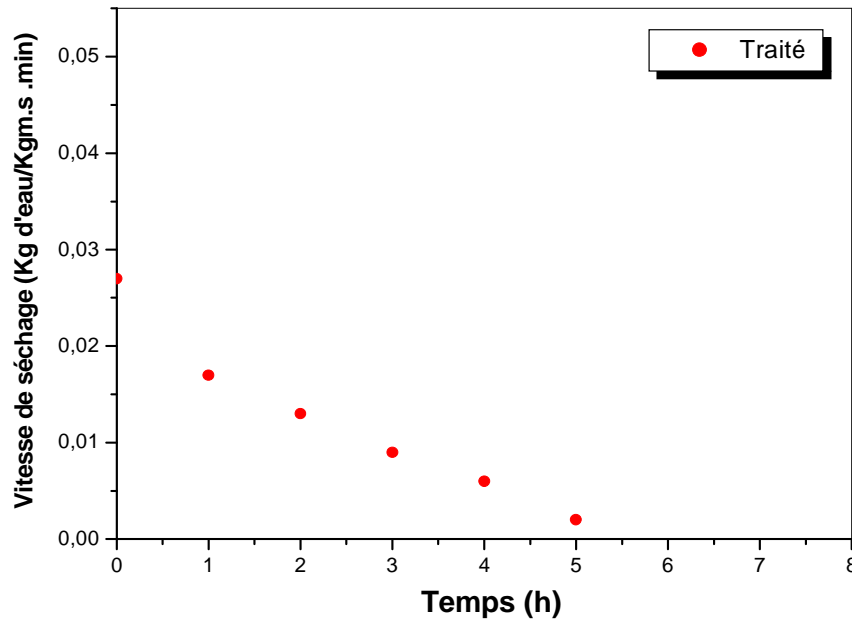
---



**Figure III.16 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour les tranches de tomate traitées.**



**Figure III.17 : Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau pour les tranches de tomate traitées.**



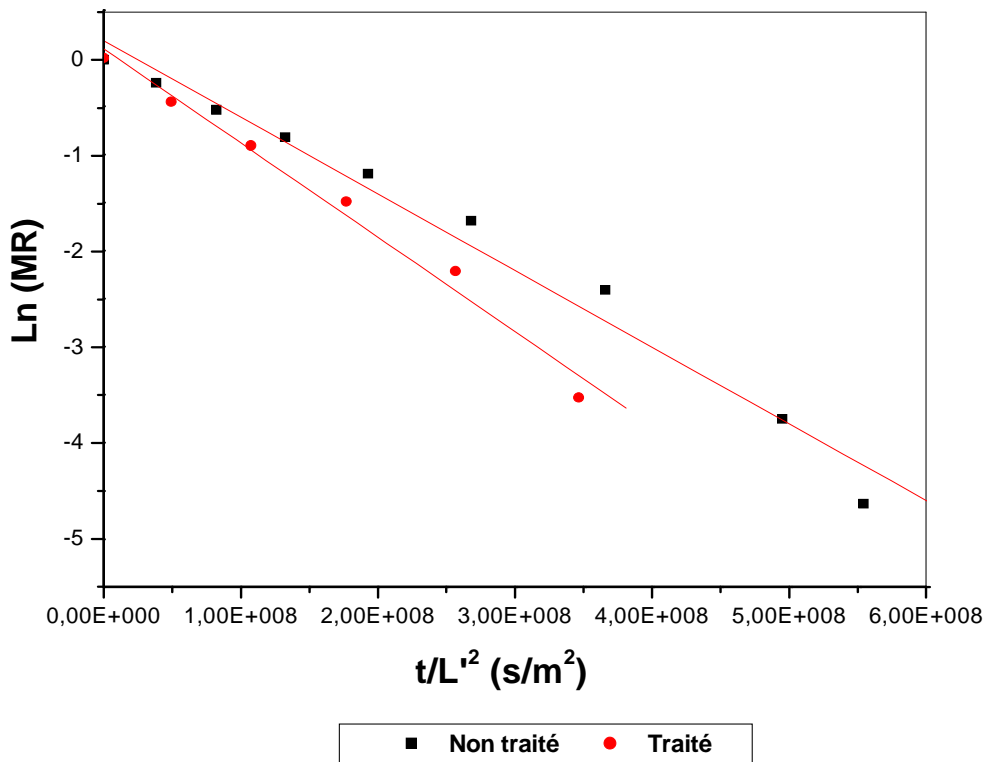
**Figure III.18 : Variation de la vitesse de séchage avec le temps de séchage pour les tranches de tomate traitées.**

### III.5.8.3. Détermination de la diffusivité efficace

Les coefficients de diffusion sont typiquement calculés en traçant les données expérimentales de séchage en termes de  $\ln(MR)$  en fonction de  $t/L^2$  (figure (III.19)).

Les valeurs de la diffusivité efficace pour les tranches non traitées et les tranches traitées sont respectivement  $3,243 \cdot 10^{-9}$  et  $3,985 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .





**Figure III.19 : Rapport entre  $\ln(MR)$  et  $t/L^2$  pour les tranches de tomate traitées et non traitées.**

### III.5.9. Modèle mathématique des courbes de séchage [3, 46]

Des résultats expérimentaux du rapport d'humidité avec le temps de séchage ont été adaptés aux modèles théoriques les plus importants, largement répandus dans le processus de séchage.

Le rapport d'humidité (MR) et la vitesse de séchage de tranches de tomate pendant les expériences de séchage ont été calculés en utilisant les équations suivantes :

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (\text{III-8})$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (\text{III-9})$$

Où :  $X_0$ ,  $X_e$ ,  $X_t$ , et  $X_{t+dt}$  (Kg d'eau / Kg masse sèche) sont la teneur en eau initiale, teneur en eau d'équilibre, teneur en eau à l'instant  $t$  et teneur en eau à l'instant  $t+dt$ , respectivement.

$t$ : est le temps de séchage (min).

Cependant,  $MR$  est simplifié à  $M/M_0$  dû à  $X_e$  qui est très petit devant  $X$  et  $X_0$ .

Les modèles mathématiques choisis sont identifiés dans la table III - 3. La régression non linéaire au sens des moindres carrés a été employée pour évaluer les paramètres du modèle choisi avec le procédé de Levenberg-Marquardt en utilisant le programme Origine. La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant les paramètres statistiques, ( $R^2$ ,  $\chi^2$ ). Ces paramètres peuvent être décrits dans les équations :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - n}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre},i} - \overline{MR_{\text{pre},i}})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - \overline{MR_{\text{exp},i}})^2}$$

No	Le nom modèle	Modèle	References
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961); Park et al. (2002).
3	Page	$MR = e \exp(-kt^n)$	Doymaz (2005a); Kashaninejad and Tabil (2004)
4	Modified Page	$MR = e \exp(-kt^n)$	Overhults et al. (1973)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
6	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Henderson (1974)
7	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
8	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Yaldiz and Ertekin (2001)
9	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Doymaz (2005b); Verma et al. (1985)
10	Midilli et al	$MR = a \exp(-Kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)

**Table III- 3 : Différents modèles mathématiques de séchage.**

Les données de la teneur en humidité du produit, obtenues à différentes températures de l'air de séchage, pour les différentes épaisseurs du produit et pour les échantillons traités ont été converties en rapport d'humidité (MR) et puis adaptées aux dix modèles mathématiques de séchage. Les tableaux III- 4, III- 5, III- 6, III- 7, III- 8 montrent les coefficients des modèles de séchage et les critères de comparaison employés pour évaluer la qualité de l'ajustement, notamment  $R^2$  et  $\chi^2$ . Dans tous les cas, les valeurs de  $R^2$ , et de  $\chi^2$  des modèles varient entre 0,96378 et 0,99985 ; 0,00003 et 0,00723 respectivement.

On observe que la valeur la plus élevée de  $R^2$  et la valeur la plus basse de  $\chi^2$  ont été obtenues à partir du modèle de Midilli. En conséquence, le modèle Midilli a été choisi en tant que modèle approprié pour représenter le comportement du séchage de la tomate.

Comme on voit sur les figures (III-20), (III-21) et (III-22), le modèle proposé a fourni une bonne conformité entre les rapports expérimentaux et le calcul d'humidité. Ceci indique la convenance du modèle de Midilli en décrivant le comportement de séchage de la tomate.

Nom du modèle	Température	Constant du model	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Lewis	T=50	K=0,17535	0,96378	0,00408
	T=65	K=0,271	0,97594	0,00277
	T=75	K=0,38105	0,96507	0,00479
Henderson and Pabis	T=50	a=1,08757, K=0,19013	0,97339	0,00323
	T=65	a=1,04595, k=0,28302	0,97904	0,00271
	T=75	a=1,05944, K=0,40085	0,9699	0,00482
Page	T=50	K=0,0803, n=1,41787	0,99598	0,00049
	T=65	K=0,1755, n=1,29944	0,99354	0,00084
	T=75	K=0,21978, n=1,48253	0,99748	0,0004
Modified page	T=50	K=0,16883, n=1,42015	0,99598	0,00049
	T=65	K=0,26204, n=1,30104	0,99354	0,00084
	T=75	K=0,35985, n=1,4837	0,99748	0,0004
Logarithmic	T=50	a=1,3363, K=0,11206, c=-0,30156	0,99601	0,00052
	T=65	a=1,29862, K=0,1677, c=-0,29548	0,99911	0,00013
	T=75	a=1,33561, K=0,23102, c=-0,31467	0,99532	0,0009
Two-term-exponential	T=50	a=1,93622, K=0,26442	0,99324	0,00082
	T=65	a=1,81685, K=0,3831	0,99211	0,00102
	T=75	a=1,9857, K=0,58054	0,99403	0,00096
Approximation of diffusion	T=50	a=258,26117, K=0,0589, b=0,99502	0,9952	0,00063
	T=65	a=227,67603, K=0,09984, b=0,99503	0,99924	0,00011
	T=75	a=249,98005, K=0,12862, b=0,99502	0,99534	0,00089
Verma et al.	T=50	a=258,63824, K=0,0589, g=0,005861	0,9952	0,00063
	T=65	a=227,7458, K=0,09984, g=0,09935	0,99924	0,00011
	T=75	a=250,68922, K=0,12862, g=0,12798	0,99534	0,00089
Two-term	T=50	a=0,54379, K <sub>0</sub> =0,19013, b=0,54379, K <sub>1</sub> =0,19013	0,97339	0,00381
	T=65	a=0,52297, K <sub>0</sub> =0,28302, b=0,52297, K <sub>1</sub> =0,28302	0,97904	0,00362
	T=75	a=0,52969, K <sub>0</sub> =0,40079, b=0,52969, K <sub>1</sub> =0,40079	0,9699	0,00723
Midilli et al	T=50	a=0,999, K=0,09033, n=1,28576, b=-0,00516	0,99843	0,00022
	T=65	a=0,99715, K=0,19001, n=1,08149, b=-0,01494	0,99913	0,00015
	T=75	a=0,99526, K=0,22489, n=1,36621, b=-0,0081	0,99923	0,00019

**Table III- 4 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures de l'air et à la vitesse de 1 m/s**

Nom du modèle	Température	Constant du model	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Lewis	T=50	K=0,19181	0,96474	0,00372
	T=65	K=0,31533	0,97041	0,00366
	T=75	K=0,5113	0,98217	0,0025
Henderson and Pabis	T=50	a=1,04567, K=0,20056	0,96781	0,0037
	T=65	a=1,05147, k=0,33032	0,97421	0,00365
	T=75	a=1,03141, K=0,52476	0,98356	0,00277
Page	T=50	K=0,11127, n=1,30564	0,98428	0,00181
	T=65	K=0,19489, n=1,36423	0,99356	0,00091
	T=75	K=0,38206, n=1,32314	0,99689	0,00052
Modified page	T=50	K=0,18599, n=1,309	0,98429	0,00181
	T=65	K=0,30155, n=1,36595	0,99356	0,00091
	T=75	K=0,48326, n=1,32377	0,99689	0,00052
Logarithmic	T=50	a=1,48169, K=0,09415, c=-0,49668	0,99741	0,00033
	T=65	a=1,36741, K=0,17951, c=-0,36155	0,99931	0,00011
	T=75	a=1,17726, K=0,36612, c=-0,17004	0,99816	0,00039
Two-term-exponential	T=50	a=1,80071, K=0,26949	0,98236	0,00203
	T=65	a=1,87511, K=0,45712	0,99109	0,00126
	T=75	a=1,85711, K=0,72516	0,99555	0,00075
Approximation of diffusion	T=50	a=1,34029, K=0,10659, b=-0,1041	0,99712	0,00036
	T=65	a=261,69236, K=0,10365, b=0,99503	0,99942	0,0001
	T=75	a=168,35622, K=0,22599, b=0,99503	0,99856	0,0003
Verma et al	T=50	a=1,34114, K=0,10654, g=-0,01099	0,99712	0,00036
	T=65	a=261,72002, K=0,10365, g=0,10314	0,99942	0,0001
	T=75	a=168,35573, K=0,22599, g=0,22487	0,99856	0,0003
Two-term	T=50	a=0,52282, K <sub>0</sub> =0,20055, b=0,52282, K <sub>1</sub> =0,20055	0,96781	0,00452
	T=65	a=0,52572, K <sub>0</sub> =0,33032, b=0,52572, K <sub>1</sub> =0,33032	0,97421	0,00511
	T=75	a=0,5157, K <sub>0</sub> =0,52477, b=0,51571, K <sub>1</sub> =0,52478	0,98356	0,00461
Midilli et al	T=50	a=0,99355, K=0,13237, n=0,94233, b=-0,02289	0,9974	0,00037
	T=65	a=0,99832, K=0,20853, n=1,11438, b=-0,0188	0,9995	0,0001
	T=75	a=0,99803, K=0,3862, n=1,18398, b=-0,0106	0,99907	0,00026

**Table III- 5 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures de l'air et à la vitesse de 1,5 m/s**

Nom du modèle	Température	Constant du model	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Lewis	T=50	K=0,24176	0,98308	0,00184
	T=65	K=0,43175	0,98452	0,00201
	T=75	K=0,60917	0,98805	0,00179
Henderson and Pabis	T=50	a=1,04582, K=0,25239	0,98593	0,00168
	T=65	a=1,03546, K=0,4451	0,98625	0,00208
	T=75	a=1,02218, K=0,62036	0,98879	0,0021
Page	T=50	K=0,16088, n=1,25769	0,99694	0,00037
	T=65	K=0,31913, n=1,28771	0,99785	0,00033
	T=75	K=0,49267, n=1,29605	0,99865	0,00025
Modified page	T=50	K=0,23389, n=1,25858	0,99694	0,00037
	T=65	K=0,41189, n=1,28769	0,99785	0,00033
	T=75	K=0,57912, n=1,29641	0,99865	0,00025
Logarithmic	T=50	a=1,18971, K=0,17485, c= -0,1802	0,99912	0,00012
	T=65	a=1,15844, K=0,32291, c=-0,14812	0,99834	0,00003
	T=75	a=1,12245, K=0,48049, c=-0,11473	0,99914	0,00026
Two-term-exponential	T=50	a=1,78643, K=0,33549	0,99625	0,00045
	T=65	a=1,82705, K=0,60628	0,99698	0,00046
	T=75	a=1,84684, K=0,86161	0,99797	0,00038
Approximation of diffusion	T=50	a=173,46588, K=0,10697, b=0,99502	0,99935	0,00009
	T=65	a=157,13745, K=0,20078, b=0,99503	0,99866	0,00024
	T=75	a=138,33039, K=0,30676, b=0,99503	0,99818	0,00045
Verma et al	T=50	a=173,67576, K=0,10697, g=0,10644	0,99935	0,00009
	T=65	a=-157,11699, K=0,20078, g=0,19978	0,99866	0,00024
	T=75	a=137,81513, K=0,30676, g=0,30523	0,99818	0,00045
Two-term	T=50	a=0,52292, K <sub>0</sub> =0,2524, b=0,52292, K <sub>1</sub> =0,2524	0,98593	0,00211
	T=65	a=0,51776, K <sub>0</sub> =0,44516, b=0,51776, K <sub>1</sub> =0,44517	0,98625	0,00312
	T=75	a=0,51109, K <sub>0</sub> =0,62037, b=0,51109, K <sub>1</sub> =0,62037	0,98879	0,00421
Midilli et al	T=50	a=0,99546, K=0,1723, n=1,13087, b=-0,00665	0,99958	0,00006
	T=65	a=0,99891, K=0,3268, n=1,17631, b=-0,00746	0,9994	0,00014
	T=75	a=0,9987, K=0,49177, n=1,225, b=-0,00563	0,99928	0,00027

**Table III- 6 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures de l'air et à la vitesse de 2 m/s**

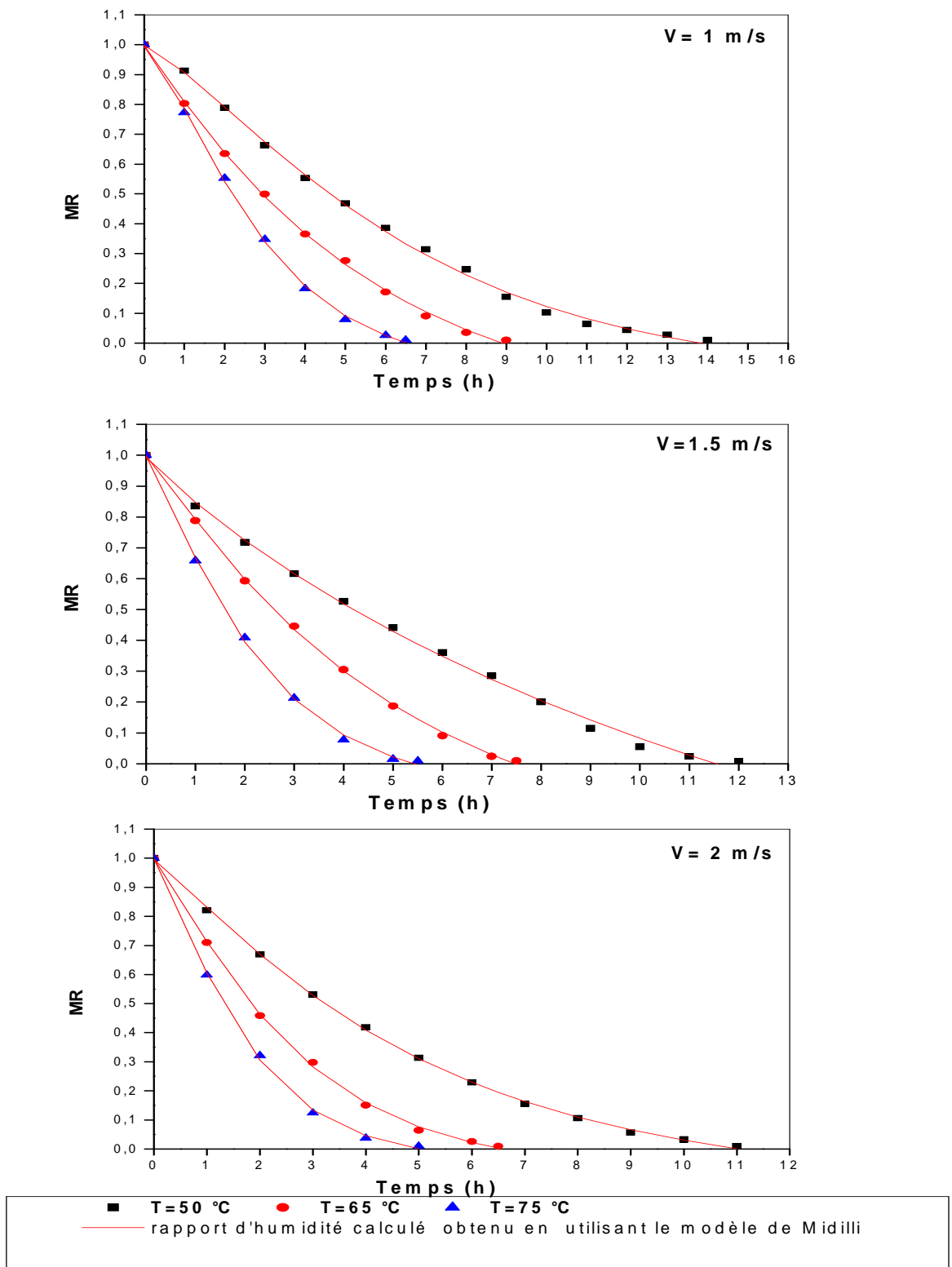
Nom du modèle	Epaisseur	Constante du modèle	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Lewis	Ep=1	K=0,31533	0,97041	0,00366
	Ep=1,5	K=0,28464	0,97858	0,00244
	Ep=2	K=0,1843	0,97265	0,00292
Henderson and Pabis	Ep=1	a=1,05147, k=0,33032	0,97421	0,00365
	Ep=1,5	a=1,03608, K=0,2944	0,98047	0,00251
	Ep=2	a=1,05898, K=0,19451	0,97689	0,00264
Page	Ep=1	K=0,19489, n=1,36423	0,99356	0,00091
	Ep=1,5	K=0,19535, n=1,26427	0,9923	0,00099
	Ep=2	K=0,102, n=1,31613	0,99243	0,00087
Modified page	Ep=1	K=0,30155, n=1,36595	0,99356	0,00091
	Ep=1,5	K=0,27484, n=1,26469	0,9923	0,00099
	Ep=2	K=0,17649, n=1,3172	0,99243	0,00087
Logarithmic	Ep=1	a=1,36741, K=0,17951, c=-0,36155	0,99931	0,00011
	Ep=1,5	a=1,24212, K=0,18527, c=-0,24528	0,99826	0,00025
	Ep=2	a=1,22226, K=0,12748, c=-0,2098	0,99543	0,00056
Two-term-exponential	Ep=1	a=1,87511, K=0,45712	0,99109	0,00126
	Ep=1,5	a=1,77341, K=0,39167	0,99137	0,00111
	Ep=2	a=1,82658, K=0,26	0,99061	0,00107
Approximation of diffusion	Ep=1	a=261,69236, K=0,10365, b=0,99503	0,99942	0,0001
	Ep=1,5	a=199,25084, K=0,11475, b=0,99503	0,99842	0,00023
	Ep=2	a=192,40202, K=0,07578, b=0,99503	0,99593	0,0005
Verma et al	Ep=1	a=261,72002, K=0,10365, g=0,10314	0,99942	0,0001
	Ep=1,5	a=199,2953, K=0,11475, g=0,11418	0,99842	0,00023
	Ep=2	a=192,25809, K=0,07578, g=0,07554	0,99593	0,0005
Two-term	Ep=1	a=0,52572, K <sub>0</sub> =0,3303, b=0,52572, K <sub>1</sub> =0,33032	0,97421	0,00511
	Ep=1,5	a=0,82025, K <sub>0</sub> =0,2943, b=0,21583, K <sub>1</sub> =0,29471	0,98047	0,00334
	Ep=2	a=0,86459, K <sub>0</sub> =0,1945, b=0,19435, K <sub>1</sub> =0,19444	0,97689	0,00308
Midilli et al	Ep=1	a=0,99832, K=0,20853, n=1,11438, b=-0,0188	0,9995	0,0001
	Ep=1,5	a=0,99314, K=0,20931, n=1,05663, b=-0,01414	0,99809	0,00033
	Ep=2	a=0,9834, K=0,10806, n=1,20714, b=-0,00492	0,9964	0,00048

**Table III- 7 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes épaisseurs du produit.**

Nom du modèle	Température	Constante du modèle	R <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup>
Lewis	Non traité	K=0,31533	0,97041	0,00366
	Traité	K=0,49497	0,99157	0,00113
Henderson and Pabis	Non traité	a=1,05147, k=0,33032	0,97421	0,00365
	Traité	a=1,01644, K=0,50253	0,99204	0,00133
Page	Non traité	K=0,19489, n=1,36423	0,99356	0,00091
	Traité	K=0,42246, n=1,18181	0,9972	0,00047
Modified page	Non traité	K=0,30155, n=1,36595	0,99356	0,00091
	Traité	K=0,48231, n=1,18199	0,9972	0,00047
Logarithmic	Non traité	a=1,36741, K=0,17951, c=-0,36155	0,99931	0,00011
	Traité	a=1,14979, K=0,3704, c=-0,15151	0,99985	0,00003
Two-term-exponential	Non traité	a=1,87511, K=0,45712	0,99109	0,00126
	Traité	a=1,69139, K=0,65235	0,99706	0,00049
Approximation of diffusion	Non traité	a=261,69236, K=0,10365, b=0,99503	0,99942	0,0001
	Traité	a=1,08087, K=0,39337, b=-0,21468	0,99985	0,00003
Verma et al	Non traité	a=261,72002, K=0,10365, g=0,10314	0,99942	0,0001
	Traité	a=1,080886, K=0,39337, g=-0,08445	0,99985	0,00003
Two-term	Non traité	a=0,52572, K <sub>0</sub> =0,33032, b=0,52572, K <sub>1</sub> =0,33032	0,97421	0,00511
	Traité	a=0,75975, K <sub>0</sub> =0,50246, b=0,2567, K <sub>1</sub> =0,50274	0,99204	0,00266
Midilli et al	Non traité	a=0,99832, K=0,20853, n=1,11438, b=-0,0188	0,9995	0,0001
	Traité	a=0,99959, K=0,41554, n=0,9917, b=-0,02042	0,99985	0,00005

**Table III- 8 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les tranches de tomate traitées et non traitées**





**Figure III-20 : Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les différentes températures de séchage**

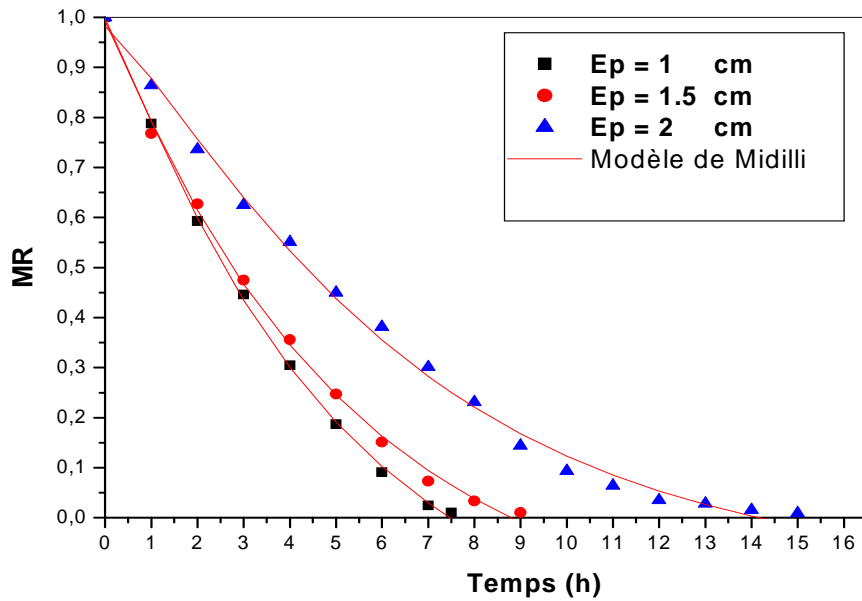


Figure III-21 : Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les différentes épaisseurs du produit.

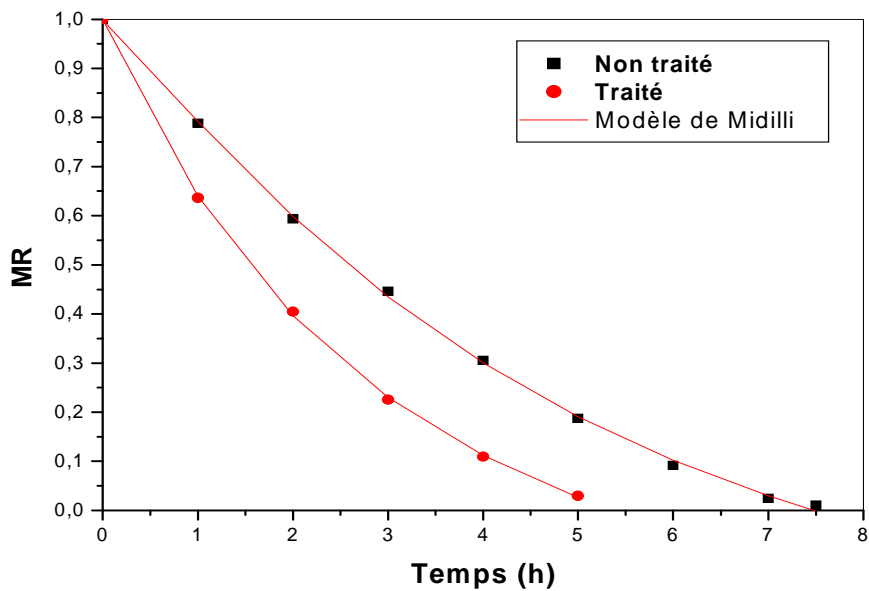


Figure III-22 : Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les tranches de tomate traitées et non traitées.

**III.5.10. Evaluation de la couleur des tomates**

Les photos ci-dessous montrent l'observation visuelle des différents échantillons de tomates pour chaque essai du plan d'expériences.

On observe sur ces photos que :

Les tranches séchées à 50 °C sont rouges, ayant une texture douce et un grand rétrécissement apparent que celles séchées à 65 °C, durcies et moins rétrécies.

Les tranches séchées à 75 °C sont sombres alors que celles séchées à 50 et 65 °C sont rouges.

Les tomates séchées à 65 °C coupées en 1 cm sont rouges, moins rétrécies et durcies que celles séchées à la même température et coupées en 1,5 et 2 cm, qui sont sombres, douces et avec un grand rétrécissement apparent.

Les tranches traitées avec du sucre, du sel et du  $\text{CaCl}_2$  et séchées à 65 °C sont plus rouges, avec moins de rétrécissement aussi par rapport autres échantillons.

---



**T=50 °C, V=1 m/s début de l'opération de séchage**



**T=50 °C, V=1 m/s fin de l'opération de séchage**



**T=50 °C, V=1,5 m/s début de l'opération de séchage**



**T=50 °C, V=1,5 m/s fin de l'opération de séchage**



**T=50 °C, V=2 m/s début de l'opération de séchage**



**T=50 °C, V=2 m/s fin de l'opération de séchage**

---



**T=65 °C, V=1 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=65 °C, V=1 m/s fin de l'opération  
de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s fin de l'opération  
de séchage**



**T=65 °C, V=2 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=65 °C, V=2 m/s fin de l'opération  
de séchage**

---



**T=75 °C, V=1 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=75 °C, V=1 m/s fin de l'opération  
de séchage**



**T=75 °C, V=1,5 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=75 °C, V=1,5 m/s fin de l'opération  
de séchage**



**T=75 °C, V=2 m/s début de l'opération  
de séchage**



**T=75 °C, V=2 m/s fin de l'opération  
de séchage**

---



**T=65 °C, V=1,5 m/s et Ep=1.5 cm début de l'opération de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s et Ep=1,5 cm fin de l'opération de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s et Ep=2 cm début de l'opération de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s et Ep=2 cm fin de l'opération de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s, tranche traité début de l'opération de séchage**



**T=65 °C, V=1,5 m/s, tranche traité fin de l'opération de séchage**

### Conclusions

D'après l'étude réalisée et les résultats obtenus on peut dire que le séchage dans les séchoirs solaires permettent d'améliorer les méthodes traditionnelles en protégeant les produits et en gardant leur propriétés. Cette technique est un procédé qui peut être utilisé pour les besoins domestiques et industriels, surtout dans les régions ensoleillées.

A l'issue de notre étude, nous pouvons conclure ce qui suit :

- L'étude de la cinétique de séchage solaire de la tomate montre la présence unique de la phase de ralentissement et l'absence de la phase de mise en température et la phase à allure constante, comme c'est le cas de la majorité des produits agricoles. Ceci est dû à la structure de ces produits.

La teneur en eau et la vitesse de séchage ont été affectées par plusieurs paramètres (la température de l'air, la vitesse d'air, l'épaisseur du produit et le prétraitement).

- L'augmentation de la température de l'air de séchage et la diminution de l'épaisseur des tranches font diminuer le temps de séchage et font augmenter la vitesse de séchage.
- L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température, ceci est dû à la baisse de température du produit (refroidissement) causée par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant.
- La tomate prétraitée avec la solution (sucre, sel et calcium) réduit le temps de séchage par rapport aux échantillons non traités (Le processus de séchage prend 450 min pour les tomates non prétraitées et 300min avec les tomates prétraitées).
- La diffusivité efficace augmente en fonction de l'augmentation de la température, en fonction de la vitesse de l'air et en fonction de l'épaisseur du produit. Ceci est due d'une part au mouvement rapide de l'eau à température élevée, d'autre part parce que le modèle de diffusion a supposé que la diffusion a eu lieu seulement dans une seule direction (l'effet de bord était négligeable).



- Les valeurs de l'énergie d'activation pour les tranches de tomate sont de 29,67 ; 30,74 et 34,71 kJ/mol pour des vitesses respectivement de 1 ; 1,5 et 2 m/s.
- L'énergie d'activation augmente avec l'augmentation de la vitesse de l'air.
- Pour expliquer le comportement de séchage, dix modèles mathématiques ont été appliqués. Parmi ces modèles, le modèle de Midilli qui ajuste très bien les résultats expérimentaux par rapport aux autres modèles.
- Ces résultats expérimentaux nous ont permis de choisir des conditions de séchage optimales qui sont : des tranches de tomate traitées et séchées à une température de 65 °C et à une vitesse de l'air de 1,5 m/s.

Pour améliorer l'opération de séchage solaire, nous proposons :

Au niveau du séchoir :

- Un système de régulation d'humidité.
- Un réarrangement de la source électrique auxiliaire.
- Pour l'économie de l'énergie, établir les connecte de la source d'alimentation électrique aux panneaux photovoltaïques pour faire fonctionner les résistances et le ventilateur.
- Les produits utilisés doivent parvenir d'une même source, car on doit avoir le même échantillonnage pour l'expérimentation.

---

---

## ***LISTE DES FIGURES***

<b>Figure N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1</b>	le spectre solaire	5
<b>Figure I.2</b>	la masse d'air	6
<b>Figure I.3</b>	Bilan du rayonnement solaire au niveau du sol	7
<b>Figure I.4</b>	Isothermes d'adsorption désorption.	14
<b>Figure I.5</b>	Représentation schématique des phénomènes de transfert de chaleur et de masse lors du séchage du produit par convection forcée.	16
<b>Figure I.6</b>	Cinétique de séchage.	19
<b>Figure I.7</b>	Le séchoir solaire tente en polyéthylène.	21
<b>Figure I.8</b>	Séchoir solaire indirect.	22
<b>Figure I.9</b>	Séchoir solaire mixte à circulation forcée.	23
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	Phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission.	36
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Schéma descriptif du système de séchage.	40
<b>Figure III.2a</b>	Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.	45
<b>Figure III.2b</b>	Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.	46
<b>Figure III.2c</b>	Variation des températures et de rayonnement solaire en fonction du temps.	47
<b>Figure III.2d</b>	Variation des températures et de rayonnement solaire en fonction du temps.	48
<b>Figure III.2e</b>	Variation des températures et de rayonnement solaire en fonction du temps.	49

---

---

<b>Figure III.3a</b>	Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.	51
<b>Figure III.3b</b>	Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.	52
<b>Figure III.3c</b>	Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.	53
<b>Figure III.4</b>	Influence de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.	55
<b>Figure III.5</b>	Influence de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.	57
<b>Figure III.6</b>	Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage.	59
<b>Figure III.7</b>	Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit.	60
<b>Figure III.8</b>	Rapport entre $\ln(MR)$ et $t/L^2$ pour la tomate.	63
<b>Figure III.9</b>	Rapport entre $\ln(MR)$ et $t/L'^2$ pour la tomate (Rétrécissement corrigé).	65
<b>Figure III.10</b>	Influence de la température de l'air asséchant sur la diffusivité efficace de l'eau pour les vitesses constantes.	66
<b>Figure III.11</b>	Influence de la température de l'air sur la diffusivité efficace à vitesse constante.	68
<b>Figure III.12</b>	Variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.	71
<b>Figure III.13</b>	Variation de la vitesse de séchage avec la teneur en eau du produit pour les différentes épaisseurs.	71
<b>Figure III.14</b>	Variation de la vitesse de séchage avec le temps pour les différentes épaisseurs.	72
<b>Figure III.15</b>	Rapport entre $\ln(MR)$ et $t/L'^2$ pour les différentes épaisseurs de la tomate.	73
<b>Figure III.16</b>	Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour les tranches de tomate traitées.	75
<b>Figure III.17</b>	Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau pour les tranches de tomate traitées.	75
<b>Figure III.18</b>	Variation de la vitesse de séchage avec le temps de séchage pour les tranches de tomate traitées.	76
<b>Figure III.19</b>	Rapport entre $\ln(MR)$ et $t/L'^2$ pour les tranches de tomate traitées et non traitées.	77
<b>Figure III.20</b>	Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les différentes températures de séchage.	85

---

---

<b>Figure III.21</b>	Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les différentes épaisseurs du produit.	86
<b>Figure III.22</b>	Rapport d'humidité expérimental et calculé obtenu en utilisant le modèle de Midilli pour les tranches de tomate traitées et non traitées.	86

---

---

NOTATIONS

1. Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
a	Diffusivité thermique du fluide	m <sup>2</sup> /s
C <sub>pa</sub>	Chaleur massique de l'air sec	J / kg .K
C <sub>pv</sub>	Chaleur massique de la vapeur d'eau	J/ kg .K
Deff	Diffusivité efficace	(m <sup>2</sup> /s)
E <sub>a</sub>	Energie d'activation	kJ/mol
G <sub>r</sub>	Nombre de GRASHOF	$G_r = \frac{g \beta \rho^2 \delta^3 \Delta T}{\mu^2}$
h	Constante de PLANCK	J.s
H <sub>a</sub>	Humidité absolue	kg d'eau/kg air.s
H <sub>r</sub>	Humidité relative	%
h <sub>∞</sub>	Coefficient d'échange thermique par convection	W/m <sup>2</sup> .K
K	Coefficient de perméabilité	m / s
k	Constante de BOLTZMANN	J/K
L	Epaisseur du produit	m
L <sub>o</sub>	Chaleur latente	kJ/kg
L <sub>x</sub>	Luminance énergétique dans la direction x	W / Sr.m <sup>2</sup>
M	Emittance	W / m <sup>2</sup>
m <sub>a</sub>	Masse d'air sec	kg
m <sub>t</sub>	Masse des échantillons au temps de séchage t	kg
m <sub>v</sub>	Masse de vapeur d'eau	kg
m <sub>0</sub>	Masse des échantillons au temps zéro	kg
$\dot{m}$	Débit massique	kg / s
N <sub>u</sub>	Nombre sans dimension de NUSSELT	$N_u = \frac{h \Delta T}{\lambda \Delta T / \delta} = \frac{h \delta}{\lambda}$
P <sub>a</sub>	Pressions partielles de l'air sec	atm.
P <sub>r</sub>	Nombre de Prandtl	$P_r = \frac{v}{a}$
P <sub>s</sub>	Pression partielle de saturation	atm.
P <sub>v</sub>	Pressions partielles de vapeur d'eau	atm.
Φ	Flux thermique	W
$\vec{\varphi}_m$	Densité de flux	kg/m <sup>2</sup> .s
q <sub>v</sub>	Génération de puissance thermique	W/m <sup>3</sup>

## NOTATIONS

R	Constante des gaz parfaits	J/mol K
R <sub>a</sub>	Nombre de RAYLEIGH	$R_a = G_r \cdot P_r$
R <sub>e</sub>	Nombre de REYNOLDS	$R_e = \frac{\rho \cdot D_h \cdot v}{\mu}$

S	Surface d'échange	m <sup>2</sup>
S <sub>C</sub>	Nombre de SCHMIDT	$Sc = \frac{v}{D_c}$
S <sub>h</sub>	Nombre de CHERWOOD	$Sh = \frac{h_{cc} \cdot L}{D_c}$
T <sub>p</sub>	Température du produit	K
T <sub>r</sub>	Température de rosée	K
T <sub>s</sub>	Température de bulbe sec	K
T <sub>∞</sub>	Température du fluide loin de la paroi	K
t	Temps de séchage	h
V	Vitesse de l'air de séchage	m/s
X <sub>0</sub>	Teneur en eau initiale	kg d'eau / kg m.s
X <sub>a</sub>	Humidité absolue d'un solide	kg d'eau / kg m.s
X <sub>e</sub>	Teneur en eau d'équilibre	kg d'eau / kg m.s
X <sub>r</sub>	Humidité relative d'un solide	kg d'eau / kg m.h
X <sub>t</sub>	Teneur en eau à l'instant t	kg d'eau / kg m.s
X <sub>t+dt</sub>	Teneur en eau à l'instant t+dt	kg d'eau / kg m.s

### 2. Lettres grecques

Symboles	Désignations	Unités
λ	Conductivité thermique du matériau	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
δ	Longueur caractéristique	m
ν	Viscosité cinématique du fluide	m <sup>2</sup> /s
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>0</sub>	Masse volumique de l'air sec	kg/m <sup>3</sup>
μ	Viscosité dynamique du fluide	kg / m.s
σ	Constante de STEFAN-BOLTZMANN	W/ m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>

**3. Indice**

<b>Indice</b>	<b>Désignations</b>	
amb	Air ambiant	
e-c	Entrée du capteur	
e-ch	Entrée de la chambre de séchage	
e-s	Sortie capteur	
pro	Produit	
Ray	Rayonnement solaire	

---

---

## Références bibliographiques

- [1] K. Sacilik, A. Konuralp, G. Unal. Drying Kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76, 2006, 362-368.
- [2] H. Ridene, S. Azzouz, D. Ghorbel, L. Ayed, M. Ben Slema, A. Belghit, Séchage des tomates par l'air chaud : Cinétique et qualité. 1<sup>er</sup> Séminaire Maghrébin sur les Sciences et Technologies de séchage, 2006, 17-18-19.
- [3] I. Doymaz. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, 243-248.
- [4] احمد عبد المنعم حسن. الطماطم تكنولوجيا الانتاج, و الفسيولوجى و الممارسات الزراعية, و الحصاد و التخزين. الدار العربية للنشر و التوزيع. 1997.
- [5] J. Shi, M. Le Maguer, Y. Kakuda, A. Liptaym, F. Niekamp, Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration, *Food Research International*, 32, 1999, 15-21
- [6] I. Doymaz, Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, 78 2007, 1291-1297.
- [7] Annuaire Statistique de l'Algérie : Résultats, 2002-2004.
- [8] A. Heredia, C. Barreram Andres, Drying of cherry tomato by combination of different dehydration techniques, *Journal of Food Engineering*, 80, 2007, 111-118.
- [9] A. Labouret, M. Viloz. Energie solaire photovoltaïque, Le manuel du professionnel. Dunod, France, 2003.
- [10] A. Djafour, Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne. Mémoire de magistère. Université de Ouargla. 2000.
- [11] M. Duminil, Air Humide, Techniques de l'ingénieur. B 2 230, 1993
- [12] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie, 2001.
- [13] J. P. Nadeau, J. R. Puiggali. Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France 1995
- [14] C. H. Danquigny, Etude expérimentale du transfert de masse en milieu poreux hétérogène, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2003.
- [15] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla. 2006.
- [16] M. Daguinet, Les séchoirs solaires : théorie et pratique, Publications de l'UNESCO. Paris, France. (1985).
-



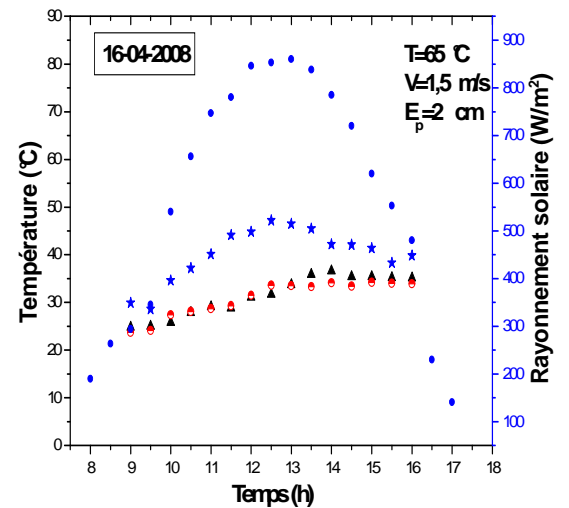
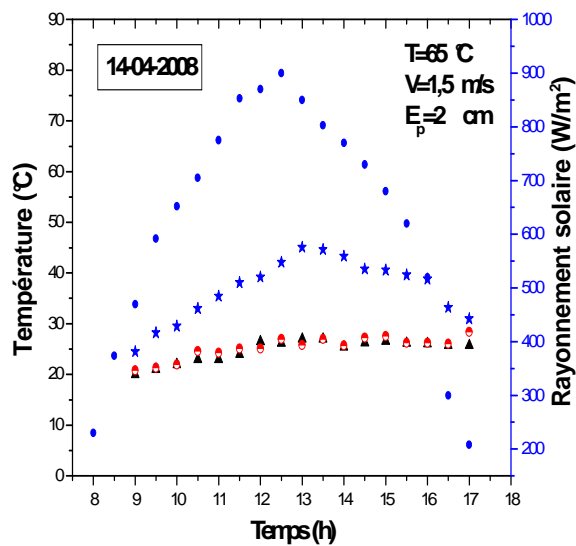
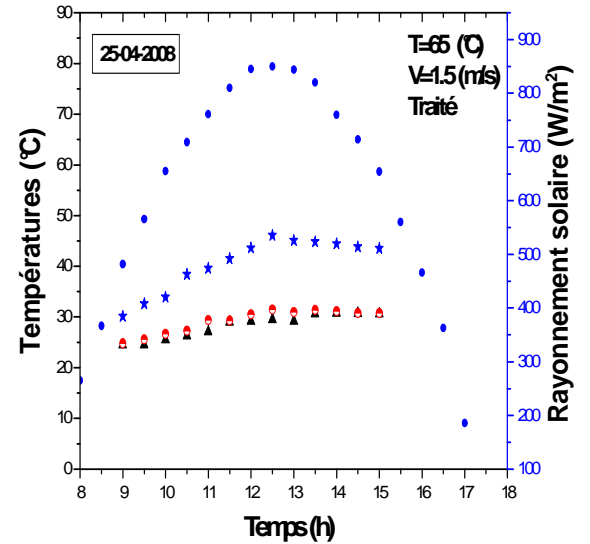
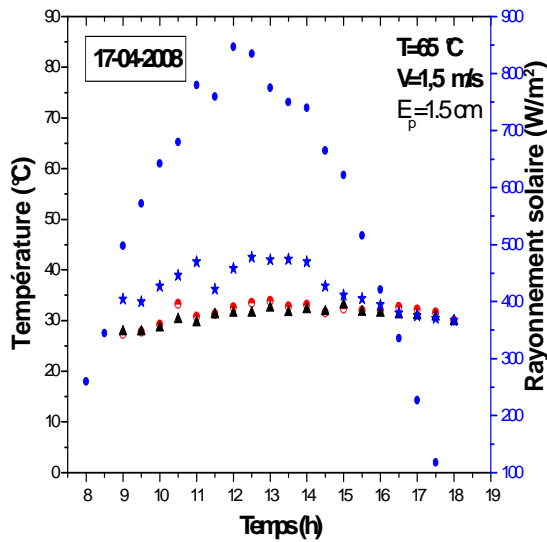
- 
- [17] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz et M. Fliyou, Moisture adsorption - desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures, *Energy Conversion and Management*, 44, 2001, 923 - 936.
- [18] A. Ferradji, A. Malek. Isothermes d'adsorption des abricots secs à 25°C et 45°C. *Rev. Eng. Ren*, CDER Alger, 8, 2005, 39 - 48.
- [19] Y. Jannot, Isothermes de sorption : modèles et détermination, LEPT-ENSAM, 2003.
- [20] M. Kouhila, A. Belghit, et M. Daguenet, Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte, *Entropie*, 233, 2001. 20-31.
- [21] J. J. Bimbenet, Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires, CPCIA, 1978.
- [22] H. Amadou, Modélisation du séchage solaire sous serre des boues des stations d'épuration urbaines, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2007.
- [23] A. Mouafki, Modélisation- Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de magistère, Université de Ouargla, 2004.
- [24] P. Dudez. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés, Edition du Greth. France (1999).
- [25] 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.
- [26] K. Benamrane, Utilisation des capteurs solaires sous vide pour le fonctionnement du système de climatisation (Région de Ouargla), Mémoire de magistère, Université de Ouargla, 2004.
- [27] A. Bouvenot, Transferts de chaleur, Masson, Paris, 1981.
- [28] B. Eyglunet. Manuel de thermique : Théorie et pratique, Hermes Sciences Publications, France, 2000.
- [29] J. F. Sacadura, Initiation aux Transferts Thermiques, Technique et Documentation, 1978.
- [30] R. E. Treybai, Mass-Transfer Operations, McGraw-Hill International Edition, 1981.
- [31] K. Sacilik, R. Keskin and A. K. Elicin, Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato, *Journal of Food Engineering*, 73, 2006, 231 - 238.
- [32] A. Vega-Galvez, R. Lemus-Mondaca, C. Bilbao-Sainz, P. Fito, A. Andres, Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (Var. Lamuyo), *Journal of Food Engineering*, 85, 2008, 42-50.
- [33] M. Kouhila, A. Belghit, M. Kaoua et M. Daguenet, Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire, *Rev. Energ. Ren. CDER* (1998).
-

- 
- [33] A. Belghit, M. Belahamid, A. Bennis, and B. Boutaleb, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, *Ren. Gen. Ther*, 36, 1997, 837 - 850.
- [35] S. Kooli, A. Fadhel, A. Farhat, A. Belghith, Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions mathematical modeling and experimental validation, *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, 1094-1103.
- [36] A. R. Celma, S. Rojas, F. Lopez, I. Montero, T. Miranda, Thin-Layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction, *Journal of Food Engineering*, 80, 2007, 1261-1271.
- [37] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, K. A. Buckle, The thin-Layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of Food Engineering*, 29, 1996, 75-97.
- [38] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel. *Energy*. 29. 2004. 211 - 244.
- [39] S. J. Babalis, V. G. Belessiotis, Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs, *Journal of Food Engineering*, 65, 2004, 449-458.
- [40] A. Kaya, O. Aydin, C. Demirtas, M. Akgun, An experimental study on the drying kinetics of quince, *Desalination*, 212, 2007, 328-343.
- [41] A. Maskan, S. Kaya, M. Maskan, Hot air and sun drying of grape leather (pestil), *Journal of Food Engineering*, 54, 2002, 81– 88.
- [42] C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, A. Ojo, Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices, *Journal of Food Engineering*, 73, 2006, 157-163.
- [43] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, Etude expérimentale de la cinétique de séchage de la cladode d'opuntia ficus indica, *FIER*, Maroc, 2002.
- [44] I. Doymaz, Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering*, 71, 2005, 403 - 407.
- [45] G. P. Sharma, R. C. Verma, P. B. Pathare, Thin-Layer infrared radiation drying of onion slices, *Journal of Food Engineering*, 67, 2005, 361-366.
- [46] I. N. Ramos, T. R. S. Brandao, C. L. M. Silva, Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes, *Journal of Food Engineering*, 67, 2005, 195-203.
- [47] G. Giovanelli, B. Zanoni, V. Lavelli, R. Nani, Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products, *Journal of Food Engineering*. 52. 2002. 135-141.
- [48] K. Sacilik, A. K. Elicin. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*. 73. 2006. 281 - 289.
- [49] E. Akpınar, A. Midilli b, Y. Bicer. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. *Energy Conversion and Management*. 44. 2003. 1689–1705.
-

- 
- [50] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, J. C. Ho, A. B. W. Teng, Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 14, 1991, 259-268.
- [51] Ibrahim Doymaz, Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering*, 61, 2004, 359–364.
- [52] I. Doymaz , N. Tugrul, M. Pala, Drying characteristics of dill and parsley leaves, *Journal of Food Engineering*, 77, 2006, 559–565.
- [53] Ibrahim Doymaz, Drying behaviour of green beans, *Journal of Food Engineering*, 69, 2005, 161–165.
- [54] R. K. Toor, G. P. Savage, Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes, *Food Chemistry*, 94, 2006, 90-97.
- [55] V. Lavelli, S. Hippeli, C. Peri, E. F. Elstner, Evaluation of radical scavenging activity of fresh and air-dried tomatoes by three model reactions, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 1999, 3826-3831.
- [56] B. Zanoni, C. Peri, R. Nani, V. Lavelli, Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying, *Food Research International*, 31, 1999, 395- 401.
- [57] A. El-Beltagy, G. R. Gamea, A. H. Amer Essa, Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78, 2007, 456-464.
- [58] M. H. Nguyen, W. E. Price. Air-drying of banana : Influence of experimental parametersm slab thickness, banana maturity and harvesting season, *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, 200-207.
- [59] J. S. Souza, M. F. D. Medeiros, M. M. A. Magalhaes, S. Rodrigues, F. A. N. Fernandes, Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying, *Journal of Food Engineering*, 83, 2007, 501-509.
- [60] I. Doymaz, Pretreatment effect on sun drying of mulberry fruits (*Morus alba* L.), *Journal of Food Engineering*, 65, 2004, 205-209.
- [61] P. P. Lewicki, Hoa Vu Le, W. Pomaranska-Lazuka, Effect of pre-treatment on convection drying of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, 54, 2002, 141-146.
- [62] Ibrahim Doymaz, Effect of dipping treatment on air drying of plums, *Journal of Food Engineering*, 64, 2004, 465–470.
- [63] P. Pani, A. Avitabile Leva, M. Riva, A. Maestrelli, D. Torreggiani, Influence of an osmotic pre-treatment on structure- property relationships of air-dehydrated tomato slices, *Journal of Food Engineering*, 86, 2008, 105-112.
- [64] T. Mahmutoglu, Y. B. Saygi, M. Borcakli and G. Ozay, Effects of pretreatment drying method combinations on the drying rates, quality and storage stability of apricots, *Lebensm Wissu Technol*, 29, 1996, 418 – 424.
-

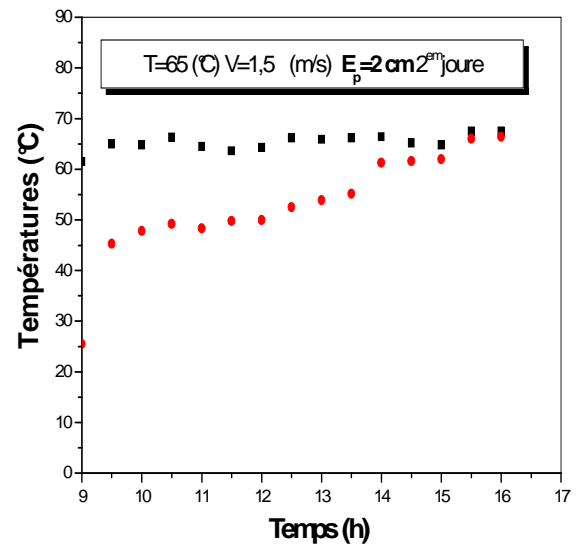
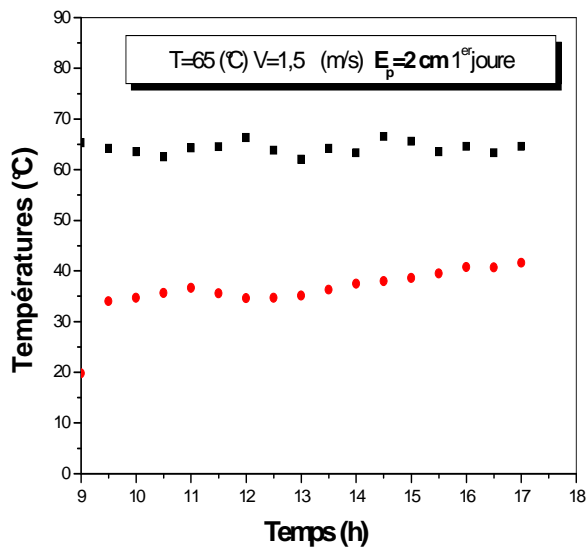
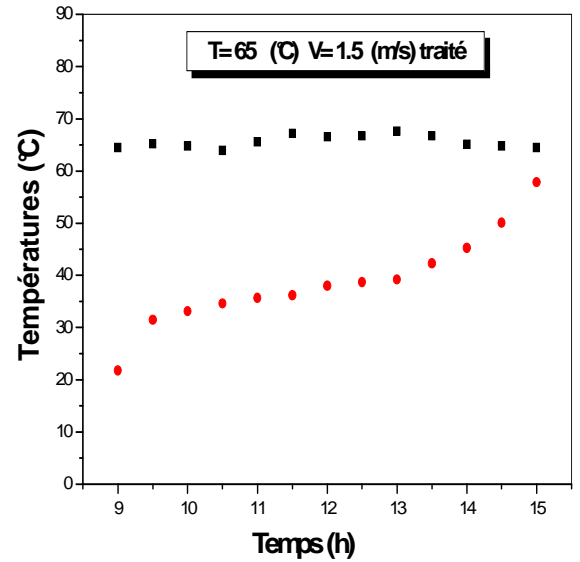
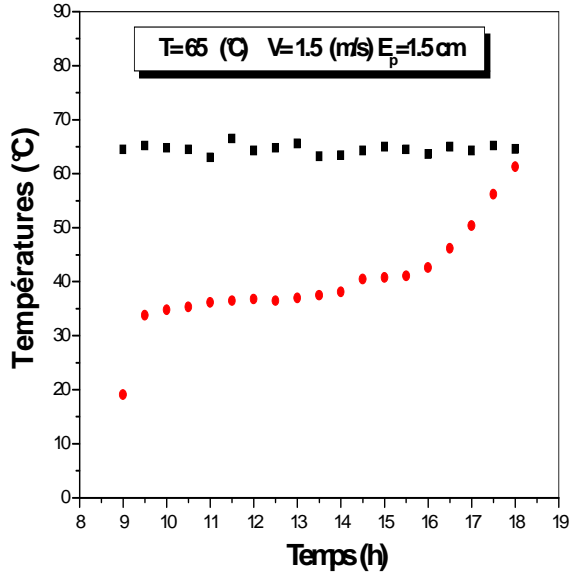
- [65] E. L. Schultz, M. M. Mazzuco, R. A. F. Machado, A. Bolzan, M. B. Quadri, M. G. N. Quadri, Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices, *Journal of Food Engineering*, 78, 2007, 1103-1110.

## I. Conditions de séchage pour le travail expérimental (influence de l'épaisseur du produit, et influence du traitement)



Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

## II. Profil des températures pour les expériences (influence de l'épaisseur du produit et influence du traitement)



■ Tech    ● Tpro

Profil des températures du produit et de l'air asséchant à l'entrée de la chambre de séchage.

## 1. Le dispositif expérimental



**Le séchoir solaire**



**Les claies de la chambre de séchage**

---

---

## 2. Les instruments de mesures



**Analyseur d'humidité**



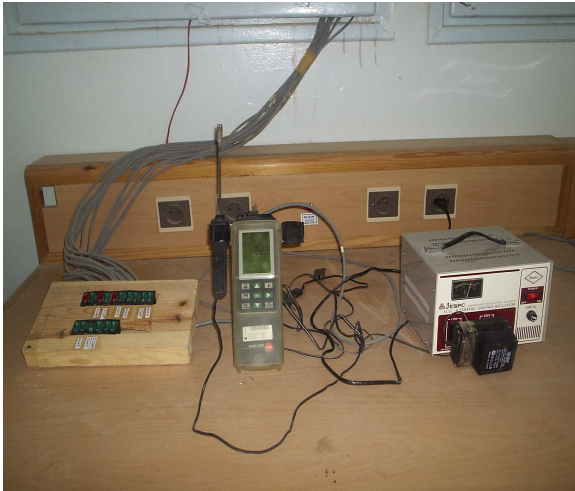
**Balance électrique**



**Solarimeter (de type DS 120)**

---





**Appareil testo 445**



**Appareil testo 945**



**Appareil KIMO de type LV 110**

---

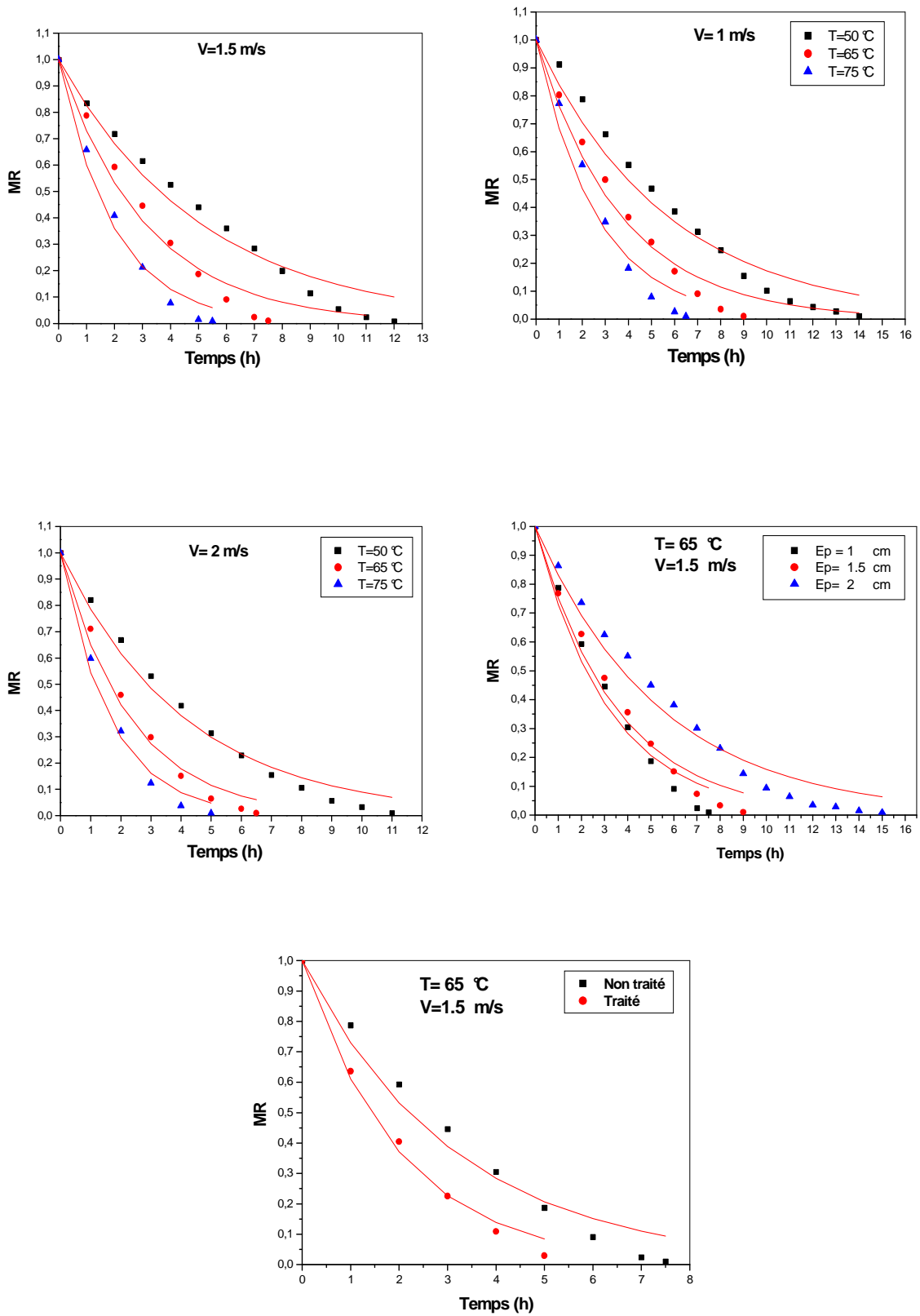


Figure C-1 : Modèle de Lewis

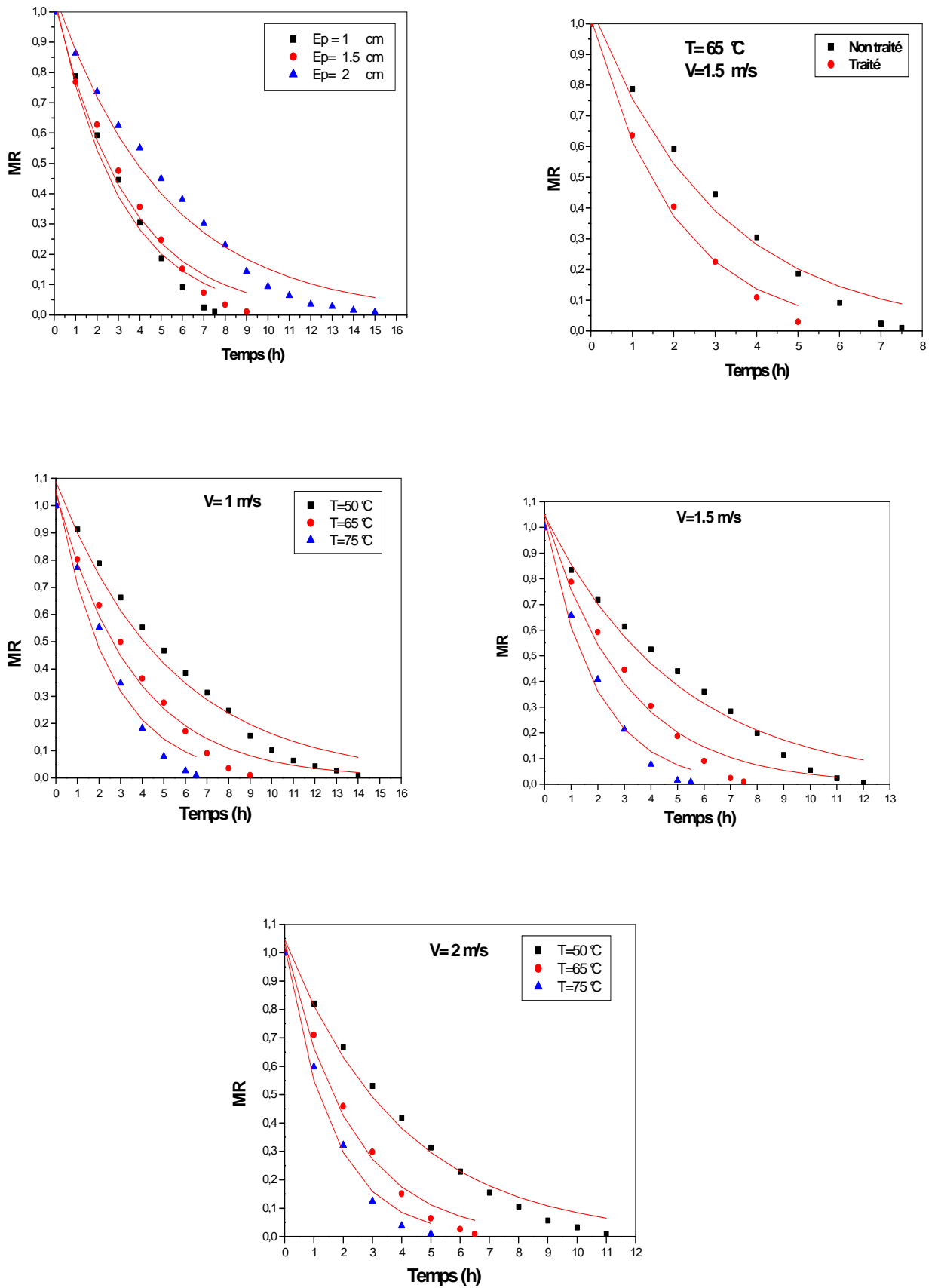


Figure C-1 : Modèle Henderson et Pabis