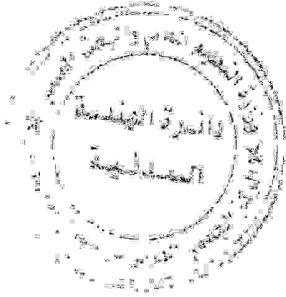


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE LARBI BEN M'HIDI - OUM EL BOUAGHI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



MÉMOIRE

Présenté par :

Mr RÉDA KHAMA
Ingénieur d'État En Génie Climatique

Pour l'obtention du diplôme de
Magister

Domaine: Génie Civil.

Filière: Installations Civiles et Industrielles.

Option : Thermique du bâtiment.

THÈME

**ÉTUDE DU SÉCHAGE
DE PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES
DÉPOSÉS EN COUCHES ÉPAISSES**

Soutenu le : Lundi 26 Novembre 2007.

Devant le Jury :

Président:	A. KAABI	<i>Prof.</i>	Univ. Mentouri Constantine.
Rapporteur:	A. BELHAMRI	<i>Prof.</i>	Univ. Mentouri Constantine.
Examineurs:	Y. KHETIB	<i>M.C</i>	Univ. Mentouri Constantine.
	Y. REZGUI	<i>M.C</i>	Centre Univ. Oum El Bouaghi.
	L. BENNAMOUN	<i>Dr C.C</i>	Centre Univ. Oum El Bouaghi.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَصَلَّى اللَّهُ عَلَى الْأَمِينِ

وَالْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

ثُمَّ بَعْدَ

DÉDICACES

Á nos très chères NANNA et MAMASSISSA.

Á nos très chers parents.

**Á nos bien aimés sœurs et frères, à leurs époux
et épouses.. à leurs enfants.**

Á nos tendres tantes et oncles.

Á nos chers cousines et cousins.

Á tous nos amis.

Á nos adorables DIA et ABIR.

NOUS dédions ce modeste MÉMOIRE

Réda et Farah

REMERCIEMENTS

Comme c'est juste de dire **MERCI** à celui qui le mérite !

Comme c'est beau d'être l'ami du devoir et du vouloir !

MERCI à tous ceux qui m'ont aidé

MERCI à tous ceux qui n'ont pas pu m'aider...

Réda



SOMMAIRE

SOMMAIRE

NOMENCLATURE	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	4
I- NOTIONS PRINCIPALES	6
I-1. LE SÉCHAGE	6
I-1-1. DÉFINITION DU SÉCHAGE	6
I-1-2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU SÉCHAGE	6
I-1-3. DIFFÉRENTES MÉTHODES DE SÉCHAGE	7
I-1-4. MODES DE SÉCHAGE	7
I-1-5. SÉCHAGE DANS L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE	8
I-1-6. SÉCHAGE EN COUCHES ÉPAISSES	11
I-1-7. SÉCHAGE EN COUCHES MINCES	11
I-1-8. DESCRIPTION PHYSIQUE DU SÉCHAGE	11
I-2. LES MILIEUX POREUX	15
I-2-1. DÉFINITION D'UN MILIEU POREUX	15
I-2-2. CLASSIFICATION DES MILIEUX POREUX	15
I-2-3. CARACTÉRISATION DES MILIEUX POREUX	18
I-2-4. ÉTUDE DES MILIEUX POREUX PENDANT LE SÉCHAGE	21
II- DÉVELOPPEMENT DE LA PRÉSENTE ÉTUDE	23
II-1. INTRODUCTION	23
II-2. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME	25
II-2-1. ÉQUATIONS DE BASE	25
II-2-2. CONDITIONS AUX LIMITES ET INITIALES	28
II-3. RÉOLUTION NUMÉRIQUE	29
II-3-1. INTRODUCTION	29
II-3-2. FORMULATION DU PROBLÈME EN DIFFÉRENCES FINIES	29
II-3-3. DISCRÉTISATIONS	32
II-3-4. CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR	37
II-3-5. TECHNIQUE DE RÉOLUTION – ORGANIGRAMME	38
III- CINÉTIQUE DE SÉCHAGE	43
III-1. INTRODUCTION	43
III-2. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE	43
III-2-1. MODÈLES MATHÉMATIQUES DES COURBES DE SÉCHAGE	45
III-2-1-1. MODÈLES SEMI-THÉORIQUES	45
III-2-1-2. MODÈLES EMPÉRIQUES	47
III-3. ÉTUDES ANTÉRIEURES	47
III-3-1. ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LES FRUITS ET LÉGUMES	47
III-3-2. ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LES FIGUES	54

III-4. APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE DES FIGURES (PRÉSENTE ÉTUDE)	58
III-4-1. CALCULS DES CONSTANTES DE SÉCHAGE	58
III-4-2. CALCUL DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT	59
III-4-3. VALEURS CHOISIES POUR LA PRÉSENTE ÉTUDE	61
III-4-4. COURBES DE SÉCHAGE	61
III-4-5. EFFET DU RÉTRÉCISSEMENT SUR LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE	73
III-4-6. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE	77
III-4-6-1.EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ASSÉCHANT	77
III-4-6-2.EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT	83
III-4-6-3.EFFET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR ASSÉCHANT	88
III-4-6-4.CONCLUSION	91
IV - ÉTUDE DU SÉCHAGE DE LA COUCHE ÉPAISSE	92
IV-1. PARAMÈTRES DE L'AIR ET CEUX DU PRODUIT	92
IV-2. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE	106
IV-2-1. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ASSÉCHANT	106
IV-2-2. EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT	115
IV-2-3. EFFET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR ASSÉCHANT	122
IV-2-4. CONCLUSION	128
CONCLUSION GÉNÉRALE	129
ANNEXES	131
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	142
LISTE DES FIGURES PRINCIPALES	151
RÉSUMÉS	159



NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

PRINCIPALES NOTATIONS:

AI :	Taux de surface de contact (ou surface spécifique ou encore superficie par unité de volume)	[m ² / m ³]
a_w :	Activité de l'eau	[/]
C :	Fraction massique	[/]
CP :	Chaleur massique	[J / Kg. K]
d :	Diamètre	[m]
Ea :	Énergie d'activation	[KJ / mol]
H :	Chaleur latente de vaporisation	[J / Kg]
L :	Longueur	[m]
ℓ :	Largeur	[m]
M :	Teneur en humidité du produit (solide) ou humidité absolue du solide ou taux d'humidité du solide ou teneur (Kg / Kg) en eau base sèche ou encore humidité sur base sèche	[Kg H ₂ O/ Kg de matière sèche]
M' :	Humidité relative du solide ou titre en eau (en pourcentage) ou teneur en eau base humide ou encore humidité sur base humide	[/]
MR :	Taux d'humidité (ou Ratio ou encore Contenu d'humidité)	[/]
M_{eq} :	Contenu d'humidité d'équilibre ou humidité absolue du produit à l'équilibre	[Kg H ₂ O/ Kg de matière sèche]
m :	Masse	[Kg]
OC :	Taux d'occupation	[/]
P :	Pression	[Pa]
R_g :	Constante universelle des gaz (= 8.3143)	[J / mol. K]
S :	Surface	[m ²]

T :	Température	[°C]
T_{abs} :	Température absolue de l'air	[K]
t :	Temps	[h]
V :	Volume	[m ³]
W :	Humidité absolue de l'air	[Kg / Kg d'air sec]

INDICES :

a :	Air
c :	Calculé
cr :	Critique
e :	Eau
eq :	Équilibre
g :	Grain
h :	Humide
moy :	Moyen
o :	Initiale
s :	Solide
sat :	Saturation
sec :	Sec
tot :	Total
v :	Vapeur

LETTRES GRECQUES:

α :	Coefficient d'échange de chaleur par convection	[W/ m ² . K]
Δx :	Pas d'espace	[m]
Δt :	Pas de temps	[s]
δ :	Longueur caractéristique	[m]
ε :	Porosité	[/]

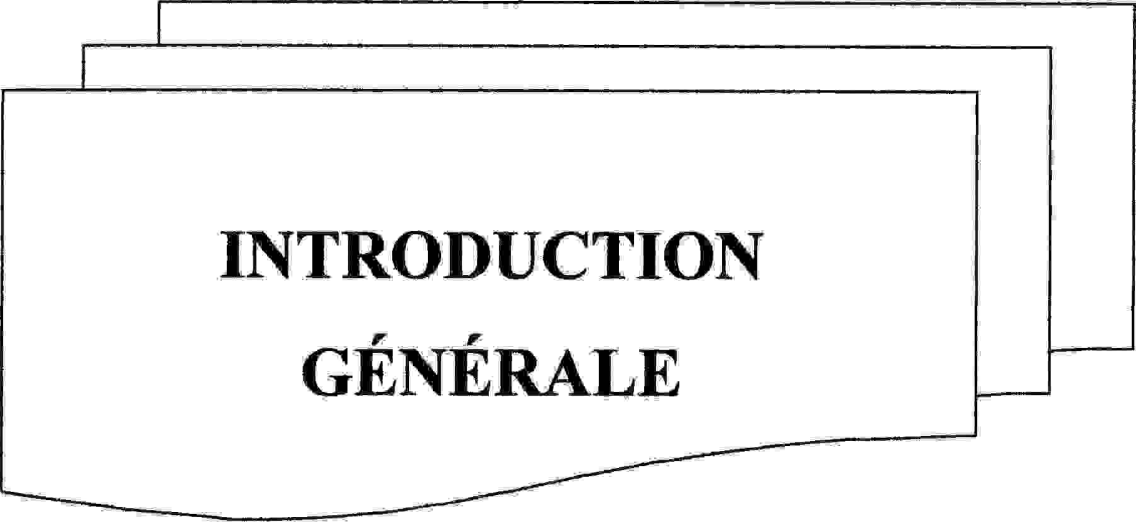
ϕ : Humidité relative de l'air	[%]
Γ : Tortuosité	[/]
λ : Conductivité thermique de l'air	[W / m. K]
μ : Viscosité dynamique	[Kg / m.s]
v : Vitesse de l'air	[m / s]
π : Le nombre grecque (≈ 3.141592654)	[/]
ρ : Masse volumique	[Kg / m ³]
ξ : Facteur de forme	[/]

NOMBRES ADIMENSIONNELS:

Nu : Nombre de Nusselt

Pr : Nombre de Prandtl

Re : Nombre de Reynolds



**INTRODUCTION
GÉNÉRALE**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits **agro-alimentaires**, il s'agit du processus le plus commun employé afin d'abaisser la quantité d'eau présente dans ces produits, pour que les conditions de leur stockage soient les plus favorables. Grâce à ce processus, l'activité de l'eau diminue considérablement pendant le stockage ainsi que l'activité microbologique, les changements physiques et chimiques étant réduits au minimum.

Le séchage est aussi un procédé pratiqué depuis la nuit des temps en exposant, traditionnellement, les produits humides à sécher au vent et au soleil. Sécher des fruits ou des légumes est une opération très délicate ; par exemple : il faut penser à la destruction des vitamines sensibles aux rayons ultra – violets.

La demande des produits agro-alimentaires est devenue, de nos jours, assez considérable en quantité et en qualité durant les douze mois de l'année.

Les développements de la science et de la technologie doivent répondre aux besoins de l'Homme contemporain. Des tonnes et des tonnes de fruits et légumes sont séchées en si peu de temps et avec une qualité optimale du produit et cela par des méthodes diverses de séchage industriel.

L'une de ces méthodes est le séchage des produits humides par l'air en convection forcée en les entreposant dans des silos.

Ce travail s'intéresse au séchage d'un fruit (**les figues**) déposé en couche épaisse et exposé à une convection forcée d'air. Le milieu se comporte comme étant poreux et ce sont, par conséquent, les équations de transferts dans un milieu poreux qui décrivent le transfert de chaleur et de masse.

Une meilleure compréhension de ces phénomènes revêt alors un grand intérêt.

Le phénomène du rétrécissement (**Shrinkage**) est pris en considération au cours du séchage du produit humide. Cette hypothèse n'est pas toujours prise en considération dans la majorité des travaux antérieurs et **son importance n'est perçue que par les spécialistes dans le domaine**. C'est l'une des spécificités de ce travail.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier est consacré à une étude bibliographique donnant les principales définitions et notions concernant le séchage et les milieux poreux dont les grandeurs (ou paramètres) présentées sont indispensables pour notre étude.

Dans le deuxième chapitre, on présente le modèle mathématique de séchage (E.D.P) basé sur les bilans massique et enthalpique de l'air et du produit humides en plus de l'équation de la cinétique.

Le résultat est un système d'équations aux dérivées partielles à quatre équations et quatre inconnues, résolu numériquement par la méthode des différences finies. Un code de calcul en Fortran est ensuite développé pour la résolution du système dont l'organigramme est présenté.

Le troisième chapitre est consacré à la cinétique de séchage avec une certaine étude détaillée et classifiée sur les modèles de séchage utilisés en examinant les résultats de quelques travaux antérieurs sur le séchage des fruits et légumes et particulièrement les **figues**.

Dans ce même chapitre, est présentée la cinétique de séchage en convection forcée des figues mises en couche épaisse et qui n'est en vérité que les premiers résultats de notre étude (comportant l'effet du shrinkage et celui des paramètres de l'air asséchant sur les courbes de séchage).

Dans le **quatrième chapitre**, l'étude du séchage des figues en couche épaisse est présentée en examinant, d'une part, les variations dans le temps et dans l'espace des paramètres de l'air et ceux du produit et, d'autre part, l'effet des paramètres de l'air asséchant (la température, la vitesse et l'humidité relative) sur le séchage.

En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats et les perspectives de ce travail et trois annexes nécessaires clôturent ce mémoire.



CHAPITRE I

I- NOTIONS PRINCIPALES:

I-1. LE SÉCHAGE :

I-1-1. DÉFINITION DU SÉCHAGE: [1 - 12]

Le **séchage** est une opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un corps solide, liquide ou pâteux.

Le terme **humidité** est toujours employé dans ce concept en désignant le liquide contenu dans le corps et devant être éliminé au cours du séchage.

Le terme **déshydratation** a un sens plus restrictif, en effet il ne concerne que l'élimination de l'eau.

À la fin du séchage, le corps obtenu est un corps sec (ou séché) et non anhydre ; la différence est dans le taux d'humidité qui est nul pour le deuxième cas alors qu'il ne l'est pas forcément pour le premier cas.

I-1-2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU SÉCHAGE : [13]

Le séchage est trouvé dans de nombreux secteurs industriels.

De très nombreuses fabrications industrielles passent en effet par une ou plusieurs étapes de séchage (appelé aussi séchage thermique), qui est le premier mode de transfert de matière dans les industries de procédés.

Les principaux secteurs industriels concernés sont:

- L'industrie agro-alimentaire: (céréales, lait, fruits, légumes ...)
- L'industrie des matériaux de construction (tuiles et briques, céramiques...)
- L'industrie papetière
- Boues résiduelles,
- Textiles et cuir,
- L'industrie chimique,
- L'industrie des peintures et vernis,
- L'industrie plastique,
- L'industrie pharmaceutique,...

I-1-3. DIFFÉRENTES MÉTHODES DE SÉCHAGE : [13]

Généralement, il y a trois méthodes de séchage:

- séchage mécanique ;
- séchage chimique ;
- séchage thermique.

I-1-3-1. MÉTHODES MÉCANIQUES:

L'eau est éliminée par des forces purement mécaniques.

(Exemple : pressage, centrifugation, filtration,...)

I-1-3-2. MÉTHODES CHIMIQUES:

Des interactions physiques ou physico-chimiques sont appliquées.

(Exemple: extraction d'eau par solvant, adsorption chimique...)

I-1-3-3. MÉTHODES THERMIQUES:

L'énergie thermique est transmise au produit par:

- conduction ;
- ou convection ;
- ou rayonnement ;
- ou par deux, ou trois modes de transfert de chaleur à la fois.

I-1-4. MODES DE SÉCHAGE : [9,10]

Il y a essentiellement deux modes de séchage du fait qu'il y a deux mécanismes observés pour l'évaporation de l'eau d'un produit, à savoir : l'ébullition et l'entraînement.

I-1-4-1. SÉCHAGE PAR ÉBULLITION:

Dans ce mode, la pression de vapeur du solvant est égale à la pression régnant dans le séchoir. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition

(par exemple 100 °C pour l'eau à 1.013×10^5 Pa)

I-1-4-2. SÉCHAGE PAR ENTRAÎNEMENT:

Dans ce mode, le produit à sécher est mis en contact avec un gaz en mouvement, ce gaz est en général conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit et la pression de vapeur du solvant inférieure à la pression dans l'enceinte de séchage.

I-1-5. SÉCHAGE DANS L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE (IAA):

I-1-5-1. LES DEUX OBJECTIFS : [9]

Dans le cas des produits alimentaires :

** Le premier objectif est de diminuer la disponibilité de l'eau dans l'aliment à un niveau tel qu'il n'y ait pas de développement de micro organismes

** Le deuxième objectif est que la teneur en eau soit telle que la vitesse des réactions chimiques ou biochimiques soit minimale et que la distribution ainsi que le stockage soient facilités.

I-1-5-2. LES BUTS DE L'UTILISATION DU SÉCHAGE DANS LES IAA :

L'utilisation du séchage dans les IAA a plusieurs buts ; les plus importants sont:

- L'accroissement de la durée de conservation des produits (viandes, poissons, **fruits**, graines, pâtes, épices, thé, champignons,...) ;
- la stabilisation des produits agricoles (maïs, riz, lait,...) et l'amortissement du caractère saisonnier de certaines activités ;
- la transformation des produits par des réactions biochimiques ou biologiques ;
- la stabilisation des co-produits industriels pour l'alimentation animale ;
- la production des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés **Produits Alimentaires Intermédiaires (PAI)**, Ce sont par exemple des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, **des fruits** pour la pâtisserie, des épaississants, des arômes, des colorants,...
- Le séchage permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui facilite leurs : transport, stockage et manutention.
- Il sert aussi à donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (café instantané, flocons de purée de pomme de terre, ...)

À ce titre, l'opération de séchage peut-être considérée comme une opération de formulation ou de texturation, qui, lorsqu'elle est convenablement conduite, est capable de fournir des produits nouveaux, faciles d'emploi.

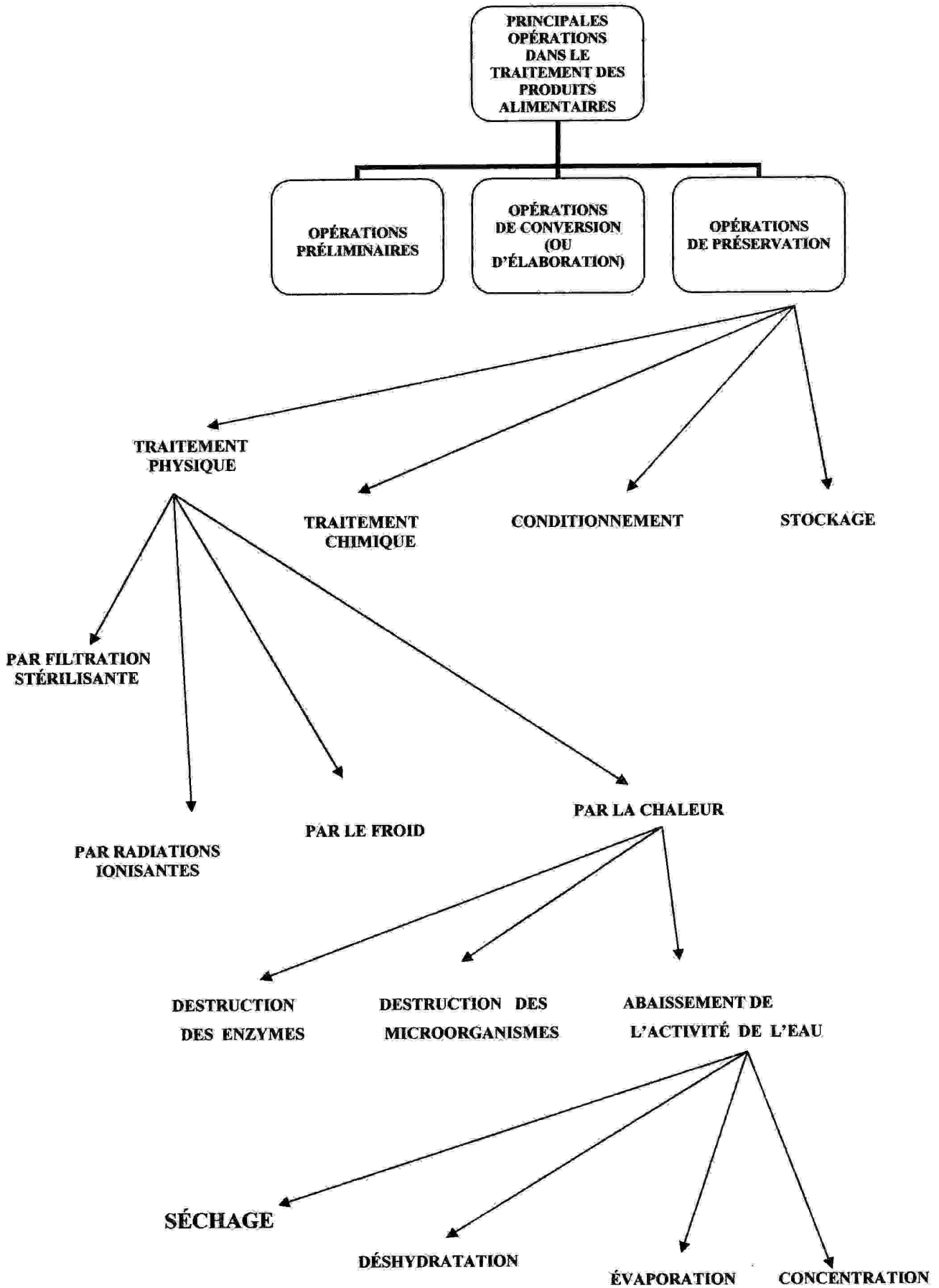
De nombreux produits alimentaires et biologiques subissent un séchage au cours de leur transformation et /ou de leur conservation. C'est souvent une opération qui intervient en fin de fabrication, avant l'étape de commercialisation et qui contrôle en grande partie la qualité et les propriétés d'usage du produit.

-- Le séchage peut également se produire à titre accessoire au cours de nombreuses opérations (cuissons, torréfaction, refroidissement, congélation, stockage à température ordinaire ou en entrepôts frigorifiques, broyage,...).

I-1-5-3. PRINCIPALES OPÉRATIONS : [13]

L'importance du séchage thermique est remarquée par l'examen des principales opérations au cours du traitement des produits alimentaires.

Le schéma suivant est explicatif :



I-1-6. SÉCHAGE EN COUCHES ÉPAISSES:

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages et les produits en grains, comme les céréales, le café ,etc. L'air est soufflé dans un amas de produits reposant sur une grille perforée, il y a:

****** Le séchage discontinu :

Où le front de séchage progresse au cours du temps puisque l'air s'humidifie et se refroidit au contact des produits.

****** Le séchage continu :

Dans ce procédé, l'air et le produit circulent simultanément, soit dans le même sens (cas co-courant), soit en sens inverse (cas contre-courant), de façon à ce que les grains situés près de la face d'entrée du silo ne sèchent pas plus vite que ceux situés près de la face de sortie.

I-1-7. SÉCHAGE EN COUCHES MINCES:

L'air chauffé, est soufflé à travers des claies contenant des produits (légumes, fruits, poissons,...) se disposant en couches minces. Une méthode simple pour modéliser un tel séchoir consiste à le découper dans le sens de l'écoulement de l'air en tranches fictives d'épaisseur Δx dans lesquelles les températures et les humidités sont supposées constantes ; ainsi, ces grandeurs varient **pas par pas** d'une tranche à l'autre. Pour chaque tranche, on écrit les bilans thermique et massique dans les différents milieux en présence (air, produits, parois...) en notant que, dans chacune, les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la tranche précédente.

I-1-8. DESCRIPTION PHYSIQUE DU SÉCHAGE : [9,10]

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

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

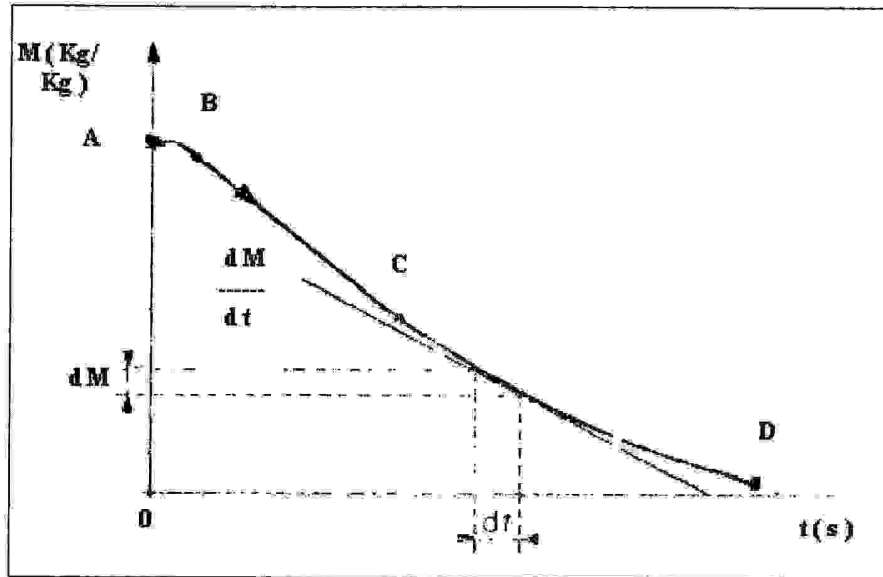


Figure (I-1): Courbe de séchage $M = f(t)$ [10]

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

En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $M = f(t)$ (donc la vitesse de séchage $\frac{dM}{dt}$) en fonction du temps, une nouvelle courbe est obtenue

(voir Figure (I-2)).

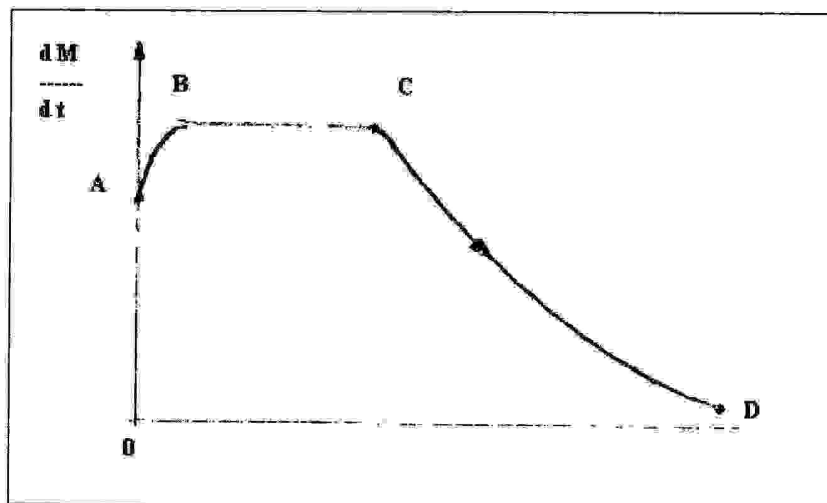


Figure (I-2): Courbe de séchage $\frac{dM}{dt} = f(t)$ [10]

KRISCHER a proposé un autre mode de représentation: la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit humide à sécher (voir **Figure (I-3)**).

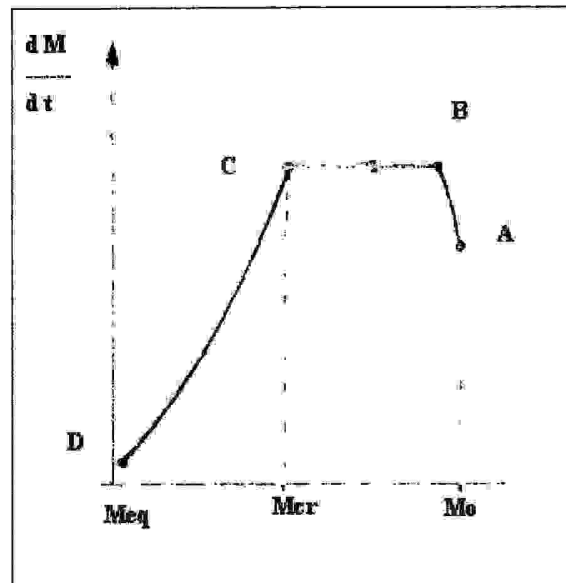


Figure (I-3) Courbe de séchage $\frac{dM}{dt} = f(M)$ (courbe de KRISCHER) [10]

M_{eq} : Taux d'humidité à l'équilibre en fin de séchage;

M_{cr} : Taux d'humidité critique ;

M_o : Taux d'humidité initiale du produit.

Ces trois types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage, toutes ne sont pas systématiquement observables ; dans le cas où elles sont identifiables, il y a :

** La phase transitoire de mise en température du produit à sécher (**AB**),

** La phase à vitesse de séchage constante (**BC**),

** La phase à vitesse de séchage décroissante (**CD**).

(**C** est le point critique du séchage).

La plupart des corps à sécher sont supposés constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière.

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

Phase à vitesse de séchage constante

Durant cette phase (jusqu'au point C) :

- ** La surface du produit est saturée en eau ; il s'y forme une couche limite de gaz ou la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression.
- ** Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide.
- ** La température du solide reste constante et égale à celle dite température humide du fluide de séchage.
- ** La nature du solide n'intervient pas.
- ** La forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage.

Phase à vitesse de séchage décroissante

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

- ** La diffusion (s'appliquant à des produits à structure continue);
- ** La migration capillaire (s'appliquant à des produits poreux ou à des produits granulaires).

I-2. LES MILIEUX POREUX :

I-2-1. DÉFINITION D'UN MILIEU POREUX:

Le **milieu poreux** est un solide de forme compliquée délimitant et englobant des vides appelés pores. Ces vides peuvent communiquer entre eux et contenir une ou plusieurs phases fluides pouvant s'écouler et, éventuellement, échanger entre elles et /ou avec le solide de la matière et/ou de l'énergie. [12]

La partie solide, appelée matrice, peut-être déformable mais doit avoir une certaine cohésion.

De nombreux exemples de milieux poreux sont rencontrés dans la vie courante: textiles , cuirs, papiers, tissus, matériaux de construction, isolants, sols, filtres, revêtement d'échangeurs, fruits et légumes déshydratés, ... etc.

I-2-2. CLASSIFICATION DES MILIEUX POREUX :

I-2-2-1. CLASSIFICATION SELON LA MATRICE SOLIDE : [12]

Une classification des milieux poreux est faite selon la matrice solide qui peut-être :
Soit

-- **non consolidée**: la phase solide est formée de grains ou de fibres non soudés entre eux (graviers, sables, billes de verre et d'acier, matériaux divers...);

Soit

-- **consolidée** : dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou en fibres (roches calcaires, argiles, bois, céramiques, tissus végétaux et animaux ...).

I-2-2-2. CLASSIFICATION SELON LE COMPORTEMENT DURANT LE SÉCHAGE: [5, 14, 15]

Une autre classification des milieux poreux, d'après **VAN BRAKEL (1980)**, est faite selon le comportement durant le séchage :

-- **Milieux capillaires-poreux** : qui présentent des pores bien reconnaissables et renfermant du liquide (de l'eau par exemple) à l'état initial (quand le matériau est à l'état saturé).

Cette eau est évaporée durant le processus de séchage et est remplacée par l'air.

-- **Milieux hygroscopiques-poreux** : qui présentent, également, des pores bien reconnaissables, mais le phénomène du rétrécissement est apparent durant le séchage en ayant un rôle marquant, par exemple le bois, les textiles, l'argile et la plupart des **produits agro-alimentaires**.

La classification de matériaux basée sur leurs courbes caractéristiques de séchage proposé par VAN BRAKEL est représentée sur la **Figure (I-4)**.

En ordonnée, est portée la vitesse de séchage réduite, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse de séchage à un instant donné t (pente de la courbe $M = f(t)$) et la vitesse de séchage pendant la phase à vitesse constante :

$$Y = \frac{\left(\frac{dM}{dt} \right)}{\left(\frac{dM}{dt} \right)_{cte}}$$

En abscisse, est porté le taux d'humidité réduit :

$$X = \frac{M - M_{eq}}{M_{cr} - M_{eq}}$$

VAN BRAKEL a répertorié les différents types de courbes caractéristiques observées dans la littérature. Ces courbes peuvent être classées en quatre principales catégories:

Les produits **hygroscopiques** (courbes I à VIII).

Les produits **colloïdaux** (courbes IX à XII).

Les **céréales** (courbe XIII).

Les **matériaux saturés** de solutions salines présentant des problèmes de croutage (courbes XIV à XVI).

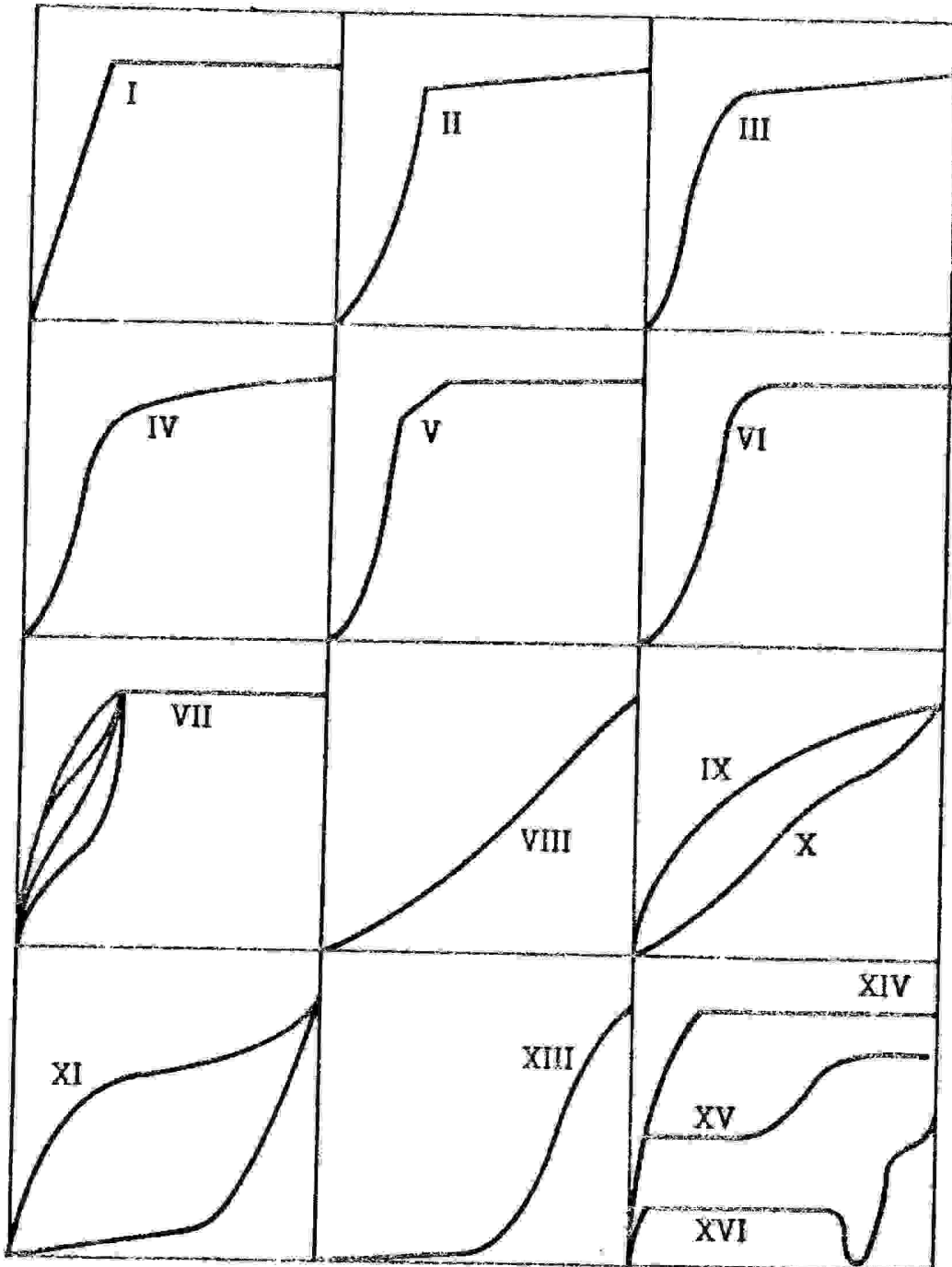


Figure (I-4) : Répertoire des différentes courbes caractéristiques
 (d'après VAN BRAKEL, [10,15])

- I** argile et cuir.
- II** tuiles.
- III** lits de billes imprégnées de liquides organiques.
- IV** polystyrènes.
- V** filet de poisson.
- VI** tamis moléculaires.
- VII** particules de silicate de sodium (conditions externes variables).
- VIII** bois.
- IX** papier et laine.
- X** pomme de terre et tapioca.
- XI** pain de seigle et levure.
- XII** beurre, margarine.
- XIII** grains de blé.
- XIV** castine saturée avec de l'eau (la castine est un fondant calcaire utilisé dans les hauts fourneaux).
- XV et XVI** castine saturée avec différentes solutions de sel.

I-2-3. CARACTÉRISATION DES MILIEUX POREUX :

Les phénomènes qui se déroulent dans les milieux poreux dépendent de la géométrie de la matrice, celle-ci est donc caractérisée par un certain nombre de grandeurs (ou paramètres) moyennes, géométriques ou statistiques. [1, 4, 5,12]

I-2-3-1. LA POROSITÉ :

La porosité ε est, par définition, le rapport adimensionnel du volume des vides c'est-à-dire des pores (occupés par le gaz, généralement l'air) au volume apparent du milieu poreux c'est-à-dire le volume total (gaz et solide).

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent total du matériau}} \quad (\text{I-1})$$

C'est donc la fraction du volume total occupé par le gaz, tandis que $(1 - \varepsilon)$ est celle occupée par le solide.

L'empilement le plus compact qui soit possible de réaliser avec des sphères même diamètre correspond à une porosité de 0.26; le plus lâche correspond à la valeur **0.476** dans le cas d'un empilement distribué de manière quelconque, la valeur de la porosité oscille autour de **0.4**. [1]

La plupart des produits agro-alimentaires présentent un retrait ou un changement du volume apparent (LOZANO et AL., 1983 ; KROKIDA et MAROULIS, 1997 ; MAYOR et SERENO 2004 ; etc....) ainsi que la variation des pores.

I-2-3-2. LE DIAMÈTRE ÉQUIVALENT DES GRAINS :

Le diamètre équivalent d_{eqg} de grains de forme quelconque est celui de la sphère occupant le même volume V_g que le grain :

$$d_{eqg} = \left(\frac{6 \cdot V_g}{\pi} \right)^{1/3} \quad (I-2)$$

I-2-3-3. LE FACTEUR DE FORME :

Le facteur de forme ξ est le rapport de la surface de la sphère ayant même volume que le grain à la surface S_g du grain :

$$\xi = (36 \cdot \pi)^{1/3} \times \frac{V_g^{2/3}}{S_g} \quad (I-3)$$

**** Cas particulier :** (Pour une sphère de diamètre d)

$$S_g = \pi d^2 \quad V_g = \frac{\pi d^3}{6} \quad \xi = 1$$

I-2-3-4. LA LONGUEUR CARACTÉRISTIQUE :

La longueur caractéristique δ est définie par le rapport :

$$\delta = \frac{V_g}{S_g} = \xi \cdot \frac{d_{eqg}}{6} \quad (I-4)$$

I-2-3-5. LA SURFACE D'ÉCHANGE AIR - SOLIDE :

La surface d'échange S_{as} air- solide d'un milieu poreux de volume V et de porosité ε est donné par:

$$S_{as} = N_g \cdot S_g \quad (I-5)$$

où N_g est le nombre de grains tel que :

$$N_g = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{V}{V_g} = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{V}{\delta \cdot S_g} \quad (I-6)$$

Donc:
$$S_{as} = (1 - \varepsilon) \cdot \frac{V}{\delta} \quad (I-7)$$

I-2-3-6. LA SURFACE SPÉCIFIQUE :

La surface spécifique (ou taux de surface de contact) A_1 est, par définition, le rapport de l'aire de la surface totale S_{tot} des interfaces solides-pores au volume V de l'échantillon:

$$A_1 = \frac{S_{tot}}{V} = \frac{1 - \varepsilon}{\delta} \quad (I-8)$$

Cette grandeur, homogène à l'inverse d'une longueur, joue un rôle capital dans les problèmes d'absorption.

Comme pour la porosité, il convient parfois de distinguer :

La surface spécifique accessible et la surface spécifique totale comprenant l'aire des parois des cavités occluses (cas du coke).

**** Cas particulier :** (Pour des sphères de diamètre d)

$$\delta = \frac{d}{6} \quad \text{et} \quad A_1 = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_s} \quad (I-9)$$

I-2-3-7. LA TORTUOSITÉ :

La tortuosité Γ est, généralement, définie par une équation de la forme:

$$\Gamma = \left(\frac{L_{moy}}{L} \right)^2 \quad (I-10)$$

Qui est le rapport de la longueur moyenne réelle L_{moy} des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon à la longueur L de ce dernier. La signification physique de cette grandeur, dont on voit très bien le sens dans le cas d'une modélisation de l'espace des pores par un réseau de capillaires, est cependant beaucoup moins nette dans le cas des milieux poreux réels.

I-2-4. ÉTUDE DES MILIEUX POREUX PENDANT LE SÉCHAGE: [13]

Premièrement, il est à noter que l'on s'intéresse particulièrement aux milieux poreux humides traversés par des courants d'air ;

Ensuite il faut distinguer les deux phases à savoir :

- La phase gazeuse (air humide)
- La phase solide (produit humide)

Les mots clé qui viennent maintenant sont :

Approche microscopique – Approche macroscopique – Transferts de chaleur et de masse - Volume de référence.

En fin il faut dire cela :

En vérité, le séchage est une opération complexe qui met en jeu des transferts couplés de chaleur et de matière (d'eau essentiellement), accompagnés de modifications physico-chimiques et de structure du matériau.

Par conséquent :

Sécher un milieu poreux ramène impérativement à étudier ses échanges, bien sur, afin de bien comprendre le phénomène et pour ce faire les deux considérations suivantes sont à signaler :

**** Première considération :**

Dans ce cas, un volume de référence petit devant le volume d'un grain (dans le cas d'un corps poreux granulaire) est considéré.

Cette considération est dite approche microscopique ou encore échelle microscopique (proposition de WHITAKER (1980), PLUMB et AL. (1992), PRAT (1995), QUINTARD et AL. (1997), LE BRAY et AL. (1999), FIGUS et AL. (1999), QUINTARD et AL. (2000), PRAT (2002), ALTEVOGT et AL. (2003) et de DUVAL et AL. (2004)). L'écriture locale des équations de transferts de chaleur et de masse est sans peine, mais la complexité de la géométrie de la surface de séparation air humide-solide humide rend difficile l'écriture des conditions sur cette dernière, chose indispensable pour les équations de transferts.

**** Deuxième considération :**

Dans cette considération, une approche plus globale est faite en choisissant un volume de référence grand devant celui d'un grain mais petit devant celui du matériau poreux. Dans ce volume de référence macroscopique, les grandeurs physiques, doivent être définies par des valeurs moyennes. De plus il faut introduire des termes sources qui prennent en compte l'évaporation à l'interface air- produit.

Cette considération est dite approche macroscopique ou encore échelle macroscopique (proposition de **ALVAREZ et AL. (2003)** et de **JAMAIALAHMADI et AL. (2005)** où les milieux poreux sont considérés comme des empilements de sphères ; et proposition de **THEVENIN et AL. (1995)**, **THEVENIN (1995)**, **YANG et AL. (1999)** et de **TAKHAR et AL. (2002)** où les milieux poreux sont considérés comme des empilements de cylindres.

En général, on néglige dans l'air, les variations temporelles de la température et de l'humidité, la diffusion et la conduction ; dans le solide, la diffusion.



CHAPITRE II

II- DÉVELOPPEMENT DE LA PRÉSENTE ÉTUDE

II-1. INTRODUCTION:

Un produit (les **figues**) en vrac est entassé dans un séchoir convectif ainsi, le séchoir se comporte comme un milieu poreux (Voir **Figures (II-0) et (II-1)**).

Dans ce travail, l'étude est développée à l'**échelle macroscopique** avec un empilement de sphères : Cette considération macroscopique ou encore échelle macroscopique est, d'après [7], une proposition de **ALVAREZ et AL. (2003)** et de **JAMAIALAHMADI et AL. (2005)** où les milieux poreux sont considérés comme des empilements de sphères (cas du présent travail) et proposition de **THEVENIN et AL. (1995)**, **THEVENIN (1995)**, **YANG et AL. (1999)** et de **TAKHAR et AL. (2002)** où les milieux poreux sont considérés comme des empilements de cylindres.

Comme montre la **Figure (II-1)**, l'air est soufflé dans un amas de produit (figues) mis en couches épaisses de façon à remplir au maximum le séchoir.

C'est un séchage par entraînement : Le produit à sécher est mis en contact avec un gaz en mouvement (l'air humide).

C'est un séchage discontinu : Le produit est immobile ($V_s = 0$).

Et ce sont les équations de transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux qui sont utilisées.

Sécher des matériaux humides est un processus compliqué impliquant les phénomènes simultanés et couplés de transfert de la chaleur et de la masse (**YLBAS, et AL., 2003**).

Beaucoup d'études ont été faites sur les transferts pendant le séchage, comme ceux de **AMIR (1985)**, **AMIR et AL. (1987)** [16], **MASMOUDI et AL. (1991)**, **A. MHIMID et AL. (2000)** [17], **L. BENNAMOUN et A. BELHAMRI (2003)** [18], **L. BENNAMOUN (2006)** [7] et de **L. BENNAMOUN et A. BELHAMRI (2006)** [19].

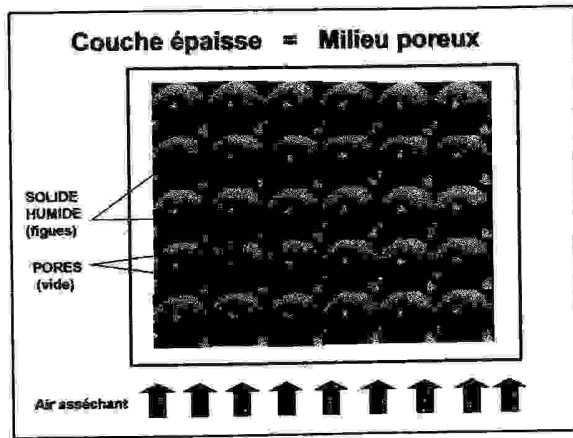


Figure (II-0): Couche épaisse des figues.

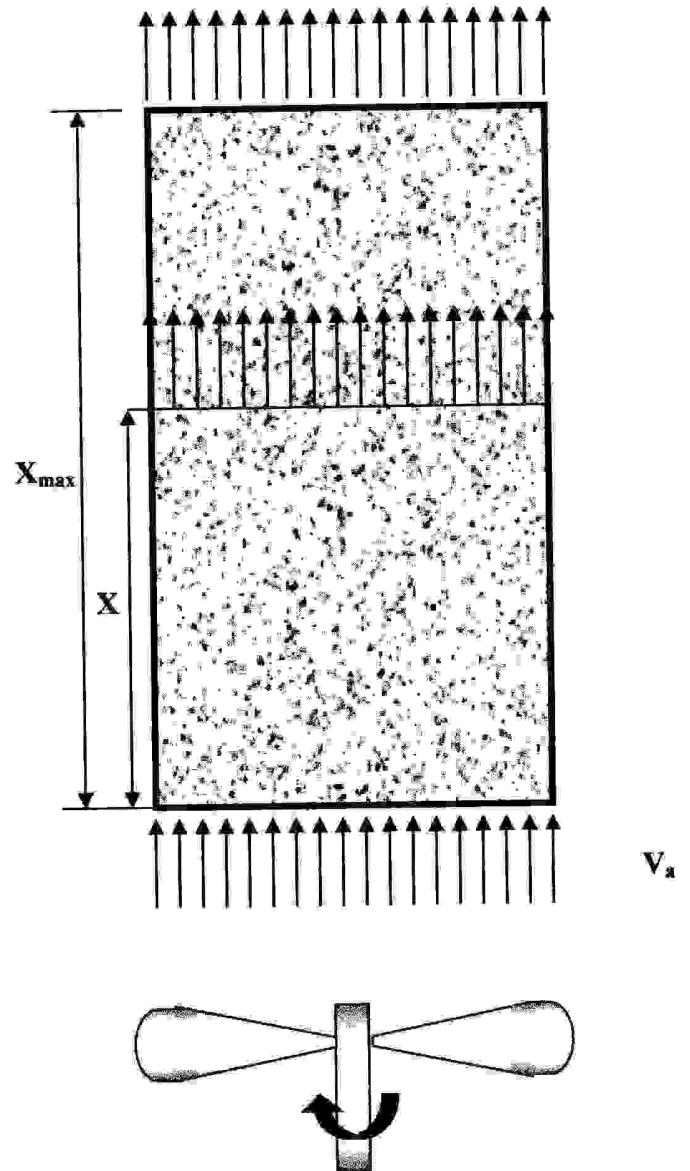


Figure (II-1) : Géométrie de la couche épaisse du produit humide (d'après [20])

II-2. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME:

II-2-1. ÉQUATIONS DE BASE:

Le transfert de chaleur et de masse dans le séchoir peut être décrit par les équations de transferts dans un milieu poreux traversé par un courant d'air chauffé.

Le modèle utilisé est dit **modèle de séchage (E.D.P) (Équations aux Dérivées Partielles)**. [21]

L'analyse théorique du séchage du lit statique mène à un ensemble d'équations aux dérivées partielles.

On considère, d'après [21], les équations suivantes:

Le bilan massique pour le gaz de séchage (air humide):

$$\rho_a \left(\varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} + v \frac{\partial W}{\partial x} \right) + (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-1})$$

Le bilan enthalpique pour le gaz de séchage (air humide):

$$\rho_a (C_{Pa} + W \cdot C_{Pv}) \left(\varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) = A l \cdot \alpha (T_s - T_a) - (1 - \varepsilon) \rho_s \cdot C_{Pv} (T_s - T_a) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (\text{II-2})$$

Le bilan enthalpique pour le solide (figues):

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s (C_{Ps} + M \cdot C_{Pe}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = A l \cdot \alpha (T_a - T_s) + H \cdot \rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

Avec les hypothèses suivantes :

1- Sont fixées

- Les caractéristiques d'entrée de l'air. [1,7]
- Les dimensions du séchoir.

2- Sont négligés:

- Le tassement des couches du produit. [1,7]
- La conduction entre les figues. [7,22]
- Le gradient de température et de concentration entre la surface et le centre de la figue. [1,7]
- Les échanges par conduction et par rayonnement devant ceux par convection. [21,22]
- La diffusion. [22]

3- Le problème étudié est unidimensionnel et ne fait intervenir que l'abscisse mesurée dans le sens de l'écoulement de l'air [1,22]

4- Les parois du séchoir sont adiabatiques et imperméables. [1,7, 22]

5- Dans le lit statique, l'écoulement est unidirectionnel, il n'y a pas de transferts dans les directions transversales et le taux de l'écoulement est constant. [21]

6- Le milieu poreux est décrit par des fonctions macroscopiques biphasées T_a , T_s , W , M . [1,21]

7- Le rétrécissement (Shrinkage) des figues est pris en considération. [21, 22, 23]

On est devant un système EDP à quatre inconnues (les fonctions macroscopiques T_a , T_s , W et M) et deux variables (x et t) ; les équations au nombre de trois sont complétées par une quatrième : celle de la cinétique de séchage [24]

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -K(M - M_{eq}) \quad (\text{II} - 4)$$

Le système différentiel obtenu (après transpositions et factorisations dans les équations (II-1), (II-2) et (II-3)) est:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial W}{\partial t} + \rho_a \cdot v \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + (1-\varepsilon) \rho_s \cdot \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (\text{II-5}) \\ \varepsilon \cdot \rho_a (CP_a + W \cdot CP_v) \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a \cdot v (CP_a + W \cdot CP_v) \frac{\partial T_a}{\partial x} = \\ \quad A1 \cdot \alpha (T_s - T_a) - (1-\varepsilon) \rho_s \cdot CP_v (T_s - T_a) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (\text{II-6}) \\ (1-\varepsilon) \rho_s (CP_s + M \cdot CP_e) \frac{\partial T_s}{\partial t} = A1 \cdot \alpha (T_a - T_s) + H \cdot \rho_s (1-\varepsilon) \frac{\partial M}{\partial t} \\ \frac{\partial M}{\partial t} = -K (M - M_{eq}) \quad (\text{II-7}) \end{array} \right.$$

Le modèle mathématique de séchage est basé sur les équations des bilans massique et énergétique et notamment sur l'utilisation des corrélations proposées pour la constante de séchage K.

S. BORIES et M. PRAT [12], A. W. AREGBA et AL. [20] C. RATTI et A.S. MUJUMDAR [22], A. W. AREGBA et J. P. NADEAU [25] et A. HACHEMI et AL. [26] utilisent les mêmes équations avec quelques modifications.

II-2-2. CONDITIONS AUX LIMITES ET INITIALES:**a) Conditions aux limites :**À $x = 0$

Pour l'air

$$\begin{cases} T_a = T_{ao} \\ W = W_o \end{cases}$$

b) Conditions initiales:À $t = 0$:

Pour l'air

$$\begin{cases} T_a = T_{asat} \\ W = W_o \end{cases}$$

Pour les fibres

$$\begin{cases} T_s = T_{so} \\ M = M_o \end{cases}$$

Hypothèse:

L'hypothèse du **Non Équilibre Thermique Local (N.L.T.E)** est prise en considération, exprimée par les deux équations d'énergie (II-2) et (II-3), en effet c'est une hypothèse qui considère $T_s \neq T_a$; contrairement à l'autre hypothèse dite **hypothèse de l'équilibre thermique local (L.T.E)** exprimée par une seule équation d'énergie en partant du fait que $T_s = T_a$.

L. BENNAMOUN (2006) [7], A. MHIMID et AL. (2000) [17], G. ARNAUD et J. - P. FOHR. (1988) [21] et A. W. AREGBA et AL. (2006) utilisent la (L.T.E) dans leurs travaux. [20]

II-3. RÉOLUTION NUMÉRIQUE:

II-3-1. INTRODUCTION:

[27, 28, 29,30]

La prise en compte des principes fondamentaux de la physique dans l'étude des phénomènes particuliers conduit le plus souvent à l'élaboration de modèles mathématiques de ces phénomènes.

Ces modèles visent, généralement, à prédire dans un domaine déterminé de l'espace et pendant une durée fixée, le comportement de champs caractéristiques du phénomène : vitesse, température, etc. par l'écriture d'un système d'équations que doivent satisfaire les champs considérés.

Les principes physiques applicables aux phénomènes étudiés sont, pour l'essentiel, des principes de conservation (de masse, d'énergie, etc...). Dire qu'une certaine quantité est conservée, c'est-à-dire que sa variation est nulle et c'est cette dernière propriété que traduisent les modèles mathématiques adaptés mathématiquement et qui dit variation dit différentielle.

II-3-2. FORMULATION DU PROBLÈME EN DIFFÉRENCES FINIES:

Résoudre les équations qui décrivent l'évolution des propriétés physico-chimiques du produit dans un séchoir implique des méthodes numériques. La solution analytique ne peut pas être obtenue facilement en utilisant la méthodologie classique qui coupe pratiquement un séchoir en série de lits, donc dans des séries de couches minces (**model 1-D**), mais le problème numérique principal apparaît en passant de cette couche mince vers la couche épaisse. Une méthode simple pour l'intégration d'espace-temps du (**model 1-D**) est décrite et comparée avec des méthodes classiques. Dans la littérature, parmi les genres de méthodes qui existent pour résoudre le modèle de lit profond : **Les méthodes de différences finies** (discrétisation de l'opérateur de dérivée) permettant une décomposition du lit profond dans une série de couches minces.

Le lit profond est considéré comme une série de couches minces, chacun avec une épaisseur de Δx (L'axe **OX** et la trajectoire d'air sont parallèles dans la même direction). (Voir **Figure (II-2)**) [31]

Le système différentiel précédent peut être résolu par une méthode aux différences finies. [1, 18, 19, 31, 32].

La méthode des différences finies a été, historiquement, la première méthode connue pour calculer, sur ordinateur, une solution approchée d'un tel système. [33]

En vérité, on s'est intéressé à la discrétisation des équations aux dérivées partielles du système précédent, dans lesquelles les inconnues sont \mathbf{M} , \mathbf{T}_s , \mathbf{W} et \mathbf{T}_a dépendant de la variable d'espace \mathbf{x} et celle du temps \mathbf{t} .

On a appelé Ω le domaine rectangulaire formé de l'intervalle de l'espace $[0, \mathbf{L}]$ et de celui du temps $[0, \boldsymbol{\tau}]$ où l'on cherche à connaître nos quatre inconnues ; ou encore: $\Omega = [\mathbf{t}_0, \mathbf{t}_f] \times [\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_f]$.

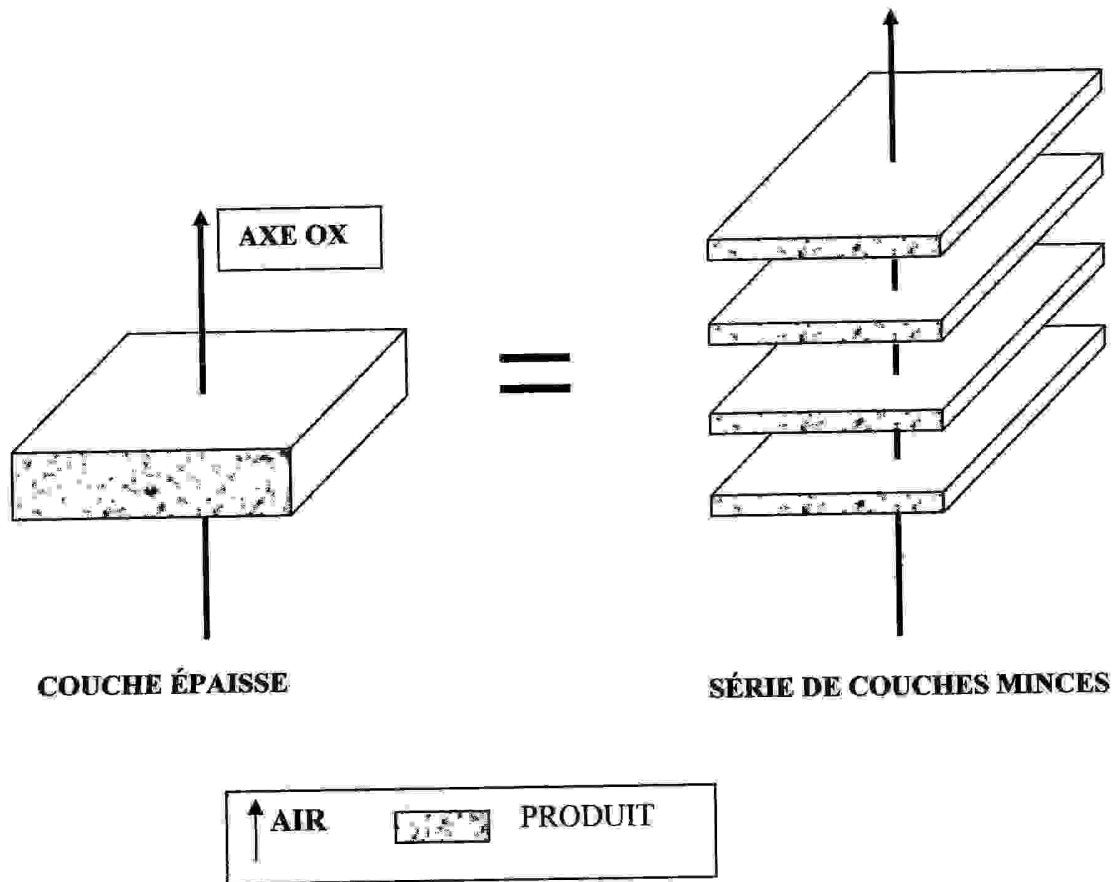


Figure (II-2) : Décomposition virtuelle de la couche épaisse en une série de couches minces. (d'après [31])

II-3-3. DISCRÉTISATIONS:**II-3-3-1. DISCRÉTISATION DU DOMAINE:** [1,33]

Le domaine Ω est découpé en un nombre fini $(m \times n)$ rectangles élémentaires.

(Voir figure (II-3))

On aura:

$$t_0 = t_0 \quad ; \quad t_1 = t_0 + \Delta t \quad ; \quad t_i = t_{i-1} + \Delta t \quad ; \quad t_m = t_f$$

$$x_0 = x_0 \quad ; \quad x_1 = x_0 + \Delta x \quad ; \quad x_j = x_{j-1} + \Delta x \quad ; \quad x_n = x_f$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{t_f - t_0}{m} \\ x = \frac{x_f - x_0}{n} \end{array} \right.$$

Un maillage régulier de Ω est ainsi défini, et dont les points (t_i, x_j) constituent les noeuds ; la recherche de la solution (M, T_s, W, T_a) c'est-à-dire des valeurs de M , T_s , W et T_a en tout point de Ω , va être remplacée par celle des seules valeurs de M , T_s , W et T_a aux noeuds du maillage :

$$M_{ij} = M(t_i, x_j)$$

$$W_{ij} = W(t_i, x_j)$$

$$T_{a ij} = T_a(t_i, x_j)$$

$$T_{s ij} = T_s(t_i, x_j)$$

Le point essentiel est que ces valeurs sont en nombre fini $4(m \times n)$ donc susceptibles d'être solutions d'un système de $4(m \times n)$ équations algébriques (et non plus d'équations fonctionnelles).

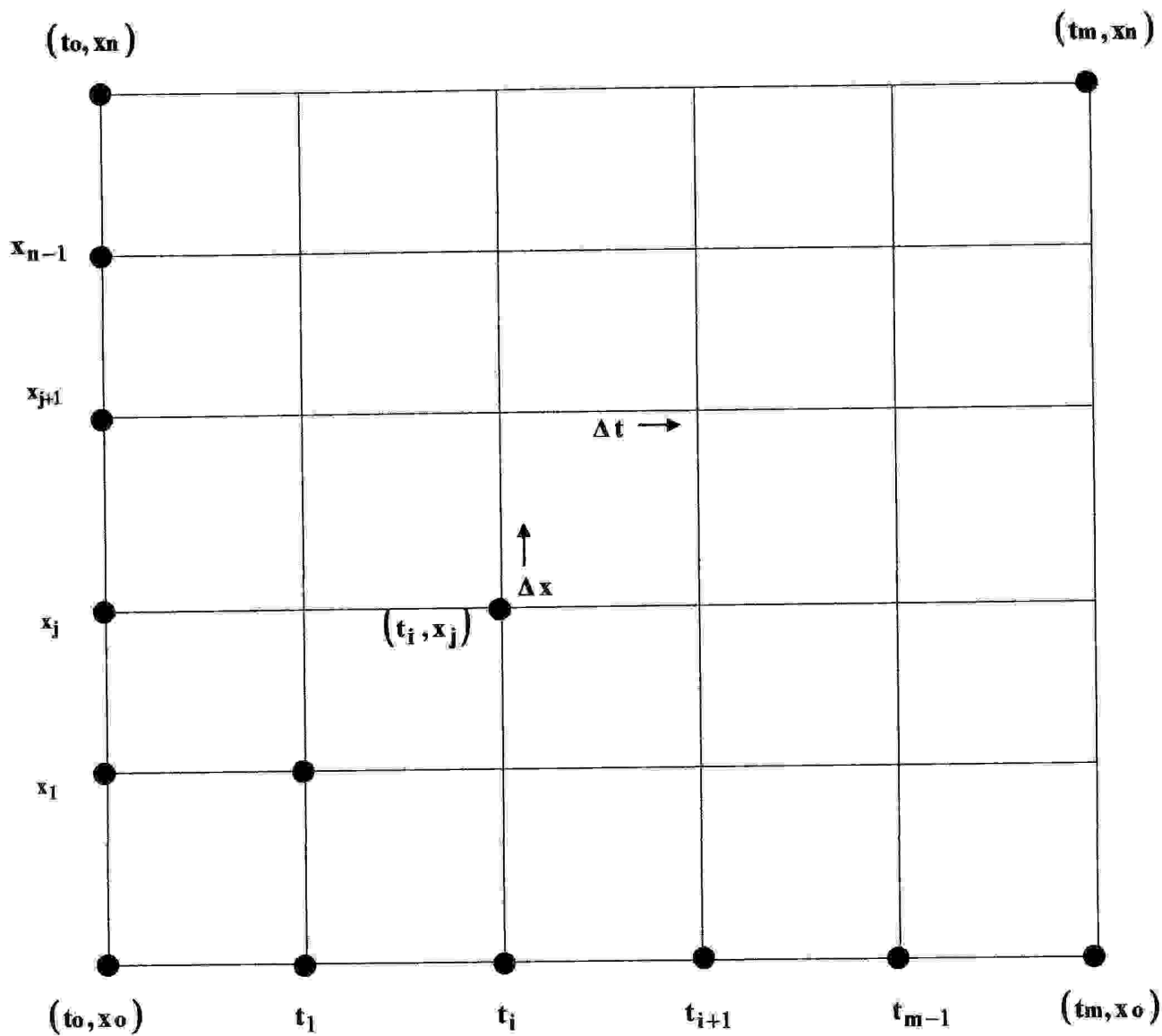


Figure (II-3) : Réseau de mailles pour des différences finies.
 ((DOMAINE Ω) d'après [1, 32,33])

II-3-3-2. DISCRÉTISATION DES ÉQUATIONS DU MODÈLE MATHÉMATIQUE:

Les équations sont écrites localement en (t_i, x_j) , aucun problème ne se pose pour: $M_{i,j} = M(t_i, x_j)$, $W_{i,j} = W(t_i, x_j)$, $T_a_{i,j} = T_a(t_i, x_j)$ et $T_s_{i,j} = T_s(t_i, x_j)$; pour ce qui est des dérivées, d'après [1,11], les approximations suivantes ont été utilisées:

$$\frac{\partial M}{\partial t}(t_i, x_j) \approx \frac{M_{i,j} - M_{i-1,j}}{\Delta t} \quad ; \quad \frac{\partial M}{\partial x}(t_i, x_j) \approx \frac{M_{i,j} - M_{i,j-1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t}(t_i, x_j) \approx \frac{T_{s\ i,j} - T_{s\ i-1,j}}{\Delta t} \quad ;$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}(t_i, x_j) \approx \frac{W_{i,j} - W_{i-1,j}}{\Delta t} \quad ; \quad \frac{\partial W}{\partial x}(t_i, x_j) \approx \frac{W_{i,j} - W_{i,j-1}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t}(t_i, x_j) \approx \frac{T_{a\ i,j} - T_{a\ i-1,j}}{\Delta t} \quad ; \quad \frac{\partial T_a}{\partial x}(t_i, x_j) \approx \frac{T_{a\ i,j} - T_{a\ i,j-1}}{\Delta x}$$

II-3-3-2-1. DISCRÉTISATION DE LA PREMIÈRE ÉQUATION (II - 1):

$$\varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{W_{i,j} - W_{i-1,j}}{\Delta t} + \rho_a \cdot v \cdot \frac{W_{i,j} - W_{i,j-1}}{\Delta x} + (1 - \varepsilon) \rho_s \cdot \frac{M_{i,j} - M_{i-1,j}}{\Delta t} = 0$$

II-3-3-2-2. DISCRÉTISATION DE LA DEUXIÈME ÉQUATION (II - 2):

$$\varepsilon \cdot \rho_a (CP_a + W_{i,j} \cdot CP_v) \frac{T_{a i,j} - T_{a i-1,j}}{\Delta t} + \rho_a \cdot v (CP_a + W_{i,j} \cdot CP_v) \frac{T_{a i,j} - T_{a i,j-1}}{\Delta x} =$$

$$A1 \cdot \alpha (T_{s i,j} - T_{a i,j}) - (1 - \varepsilon) \rho_s \cdot CP_v (T_{s i,j} - T_{a i,j}) \frac{M_{i,j} - M_{i-1,j}}{\Delta t}$$

II-3-3-2-3 DISCRÉTISATION DE LA TROISIÈME ÉQUATION (II - 3):

$$(1 - \varepsilon) \rho_s (CP_s + M_{i,j} \cdot CP_e) \frac{T_{s i,j} - T_{s i-1,j}}{\Delta t} =$$

$$A1 \cdot \alpha (T_{a i,j} - T_{s i,j}) + H \cdot \rho_s (1 - \varepsilon) \frac{M_{i,j} - M_{i-1,j}}{\Delta t}$$

II-3-3-2-4. DISCRÉTISATION DE LA QUATRIÈME ÉQUATION (II - 4):

$$\frac{M_{i,j} - M_{i-1,j}}{\Delta t} = -K (M_{i,j} - M_{eq})$$

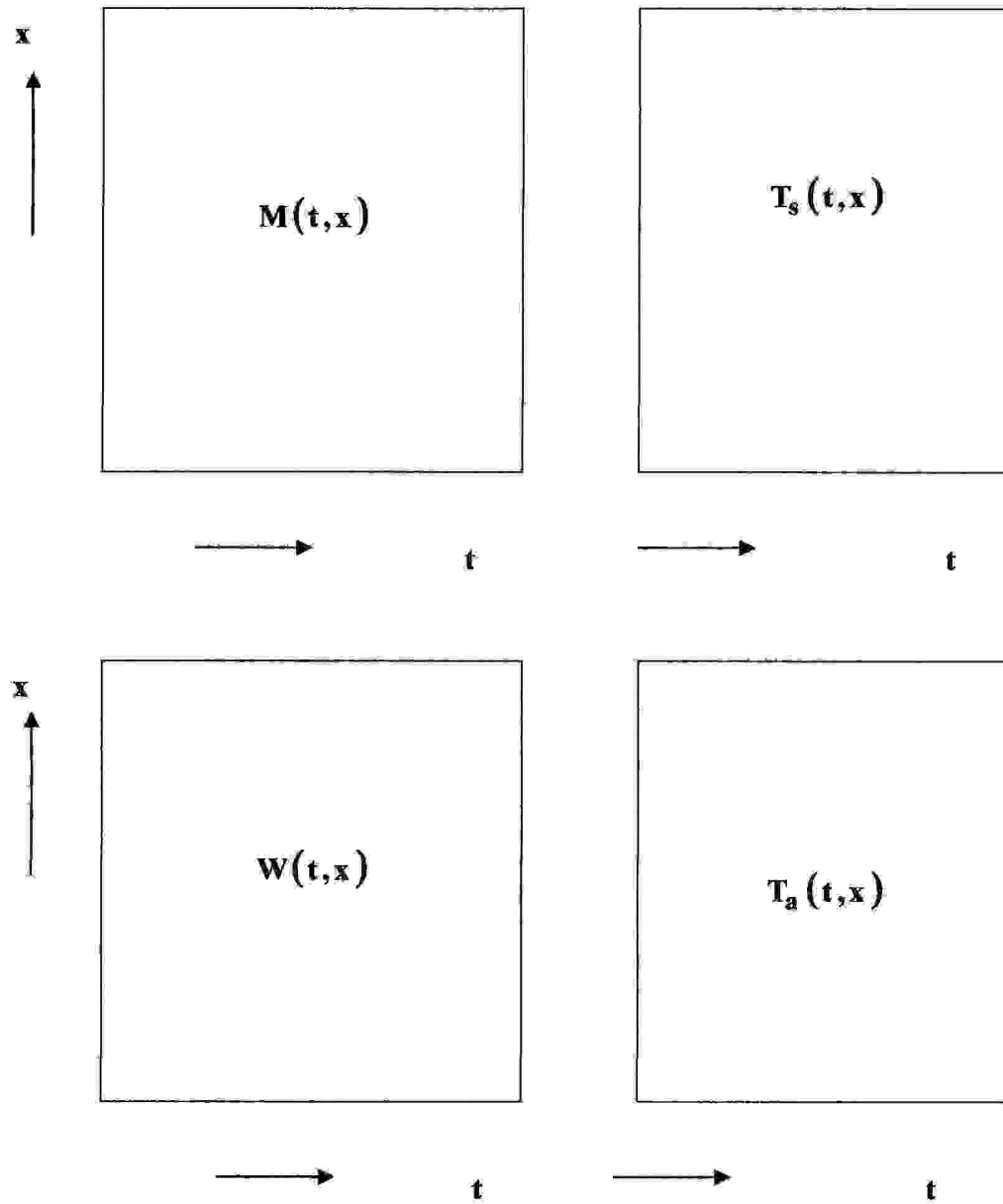


Figure (II-4) : Fonctions macroscopiques à déterminer.

(d'après [32])

À l'instant initial, tous les éléments constituant le séchoir et le produit à sécher (les figues) sont à la température ambiante.

Pour la première hauteur de la tranche à sécher, la température est celle de l'air chauffé à l'entrée du séchoir. Ensuite, pour chaque tranche du séchoir et pour chaque pas de temps, un système d'équations est obtenu.

Les calculs des caractéristiques de l'air (voir ANNEXE A), de sa vitesse autour du produit (voir chapitre III), des caractéristiques du produit (voir ANNEXE B), de la constante du séchage K (voir chapitre III également) et du coefficient de transfert (voir ci-dessous) sont faits pour chaque pas de temps Δt et pour chaque tranche j du séchoir.

II-3-4. CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR:

Il y a beaucoup de situations où la détermination analytique du coefficient α est difficile. Après beaucoup de simplifications, la détermination analytique de α n'est généralement pas un problème mathématique simple. En impliquant des facteurs compliqués tels que: La géométrie, les propriétés variables, l'écoulement turbulent, l'ébullition, la condensation, etc. Le coefficient de transfert thermique est habituellement déterminé expérimentalement. Ceci ne signifie pas le devoir de faire une expérience à chaque fois où il y a un besoin de α pour lequel il n'y a aucune solution analytique; au lieu de cela, les résultats expérimentaux d'autres chercheurs sont utilisés.

Des résultats expérimentaux sont habituellement corrélés et présentés comme équations sans dimensions, il est cependant commode de les utiliser. Ils sont intensivement employés dans la solution des problèmes de transfert thermique. [34]

Pour calculer α , les formules suivantes ont été utilisées:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_s} \quad [1,6]$$

Les calculs de la conductivité thermique de l'air λ et du diamètre des figues d_s sont présentés, respectivement, dans l'annexe A et le chapitre III.

Le nombre de **NUSSELT** a été calculé, selon [1], comme suit:

Pour $Re \leq 350$:

$$Nu = 1.95 \cdot Re^{-0.51} \cdot Re \cdot Pr^{0.33}$$

Pour $Re > 350$:

$$Nu = 1.06 \cdot Re^{-0.41} \cdot Re \cdot Pr^{0.33}$$

Le nombre de **REYNOLDS** est :

$$Re = \frac{v \cdot ds \cdot \rho_{ah}}{\mu_{ah}} \quad [1, 6]$$

Le nombre de **PRANDTL** est:

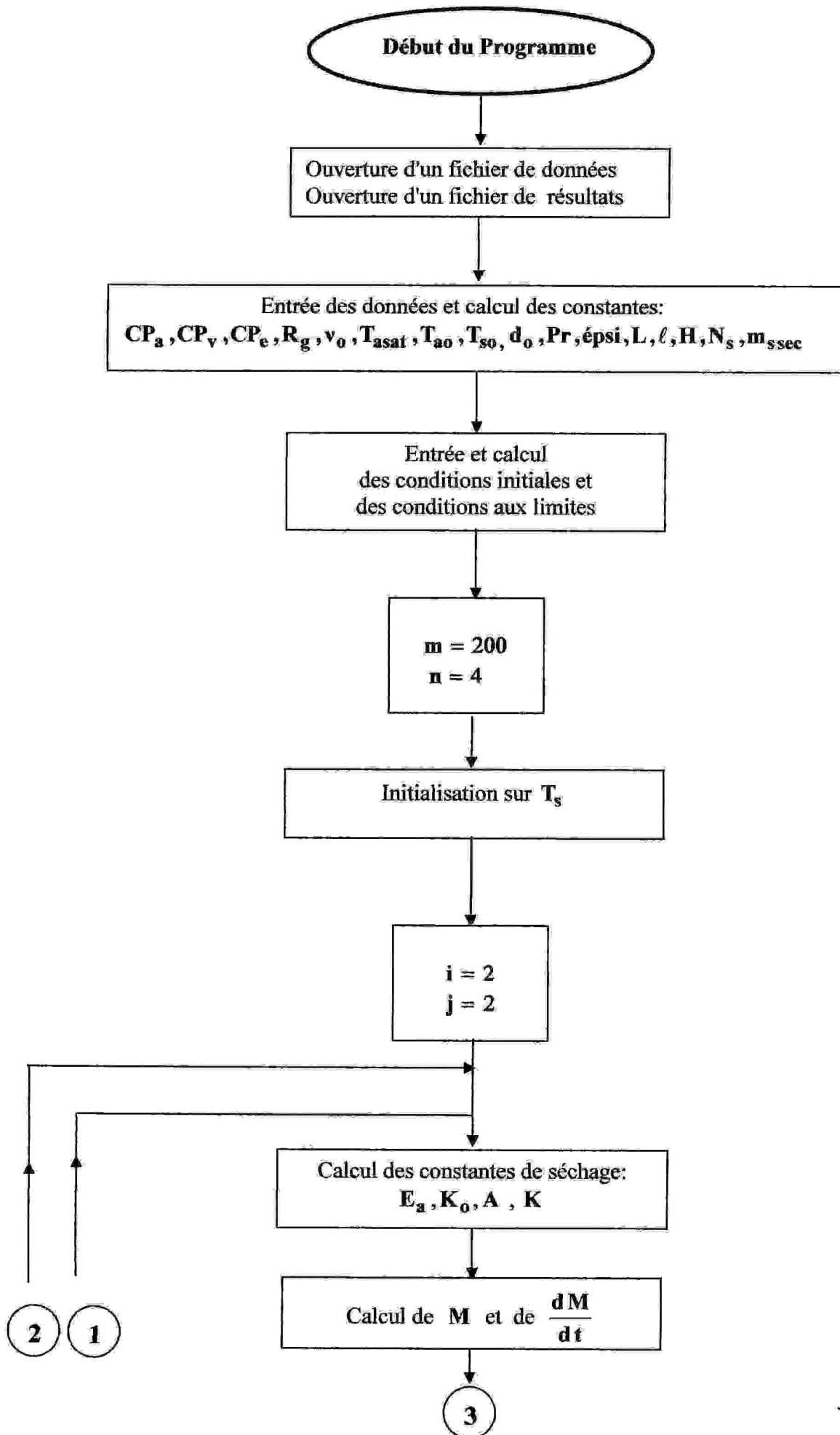
$$Pr = \frac{\mu_a \cdot Cp_a}{\lambda_a} \approx 0.70 \quad [1,3]$$

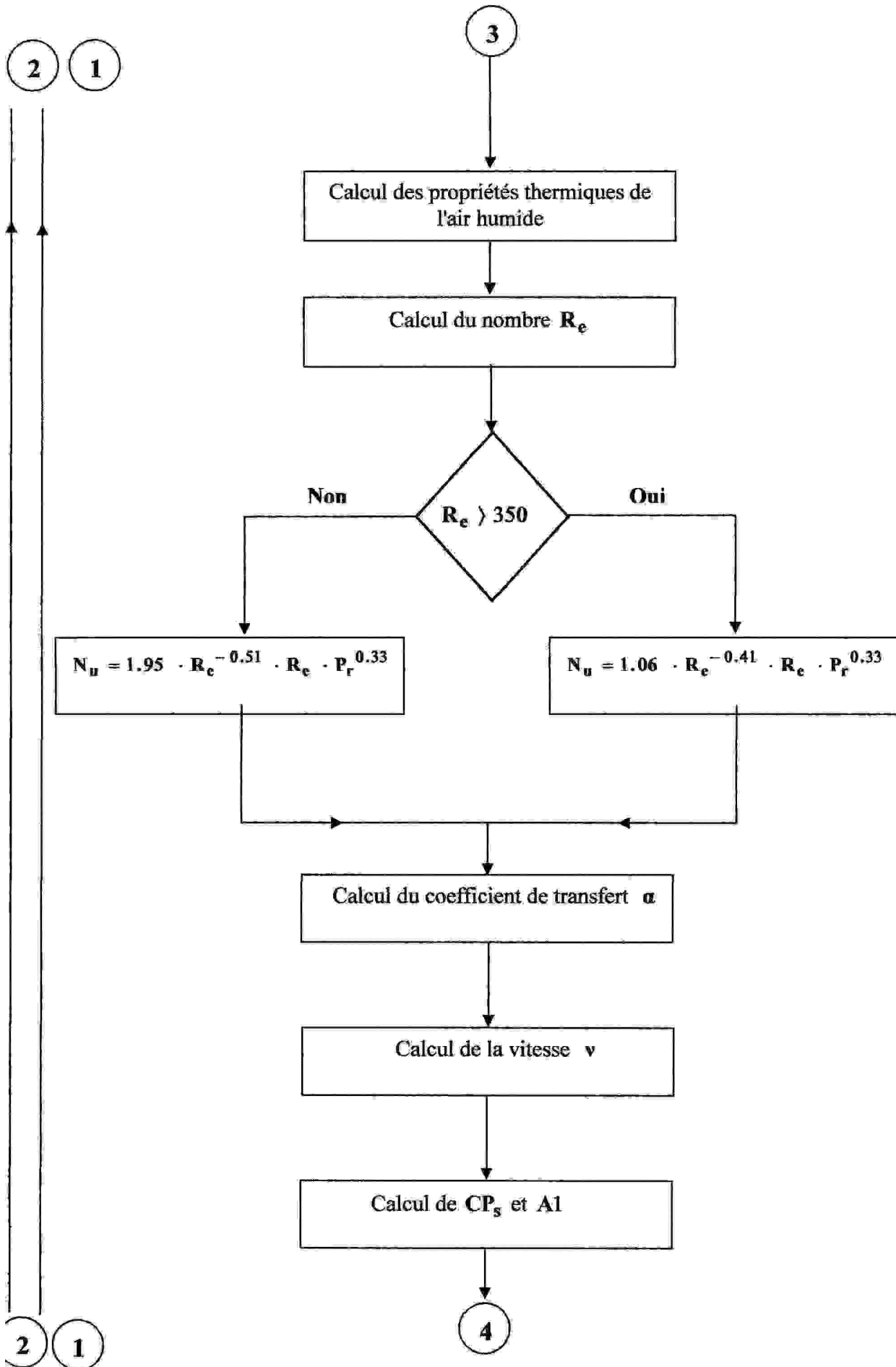
II-3-5. TECHNIQUE DE RÉOLUTION – ORGANIGRAMME:

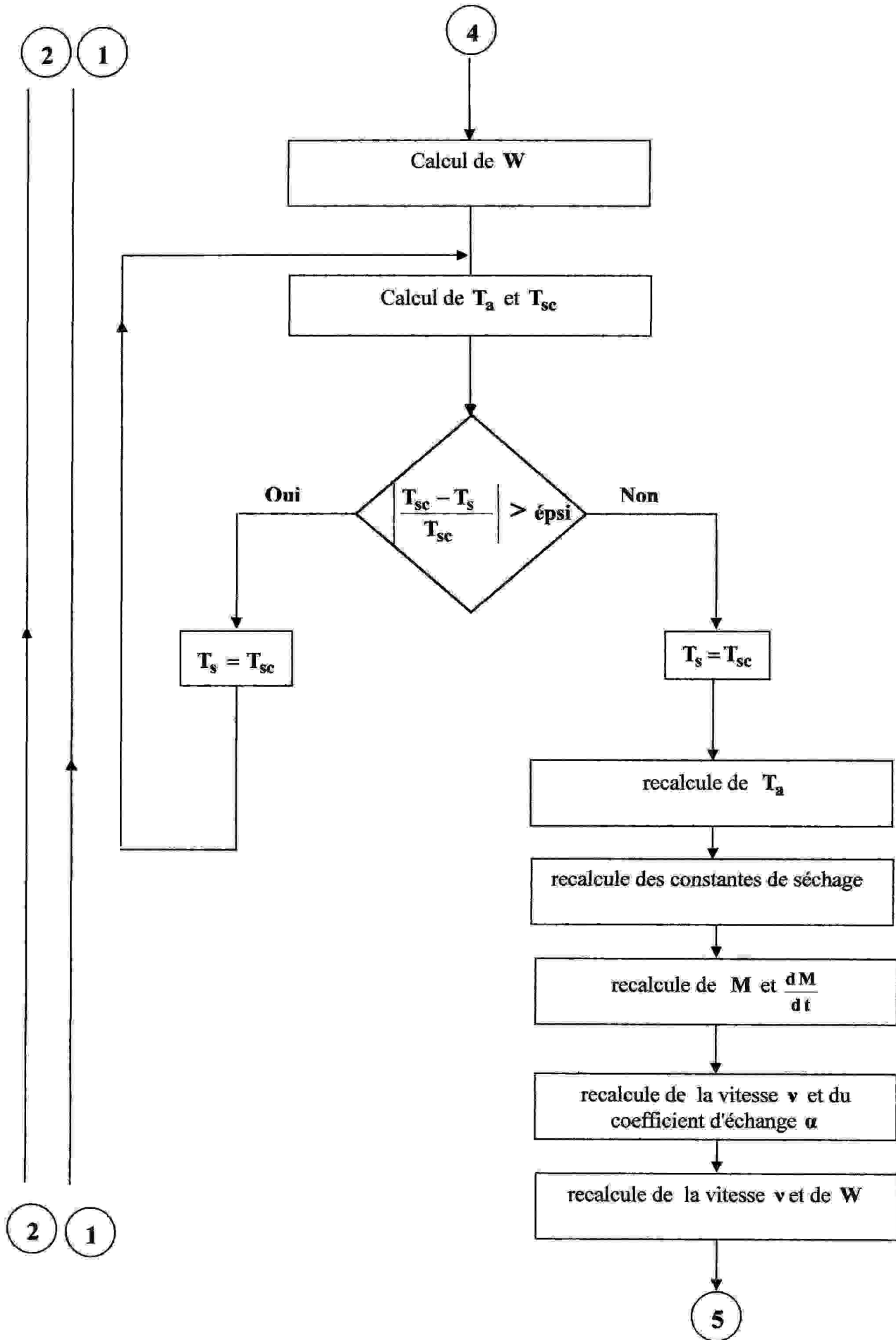
[18, 28, 30, 35,36]

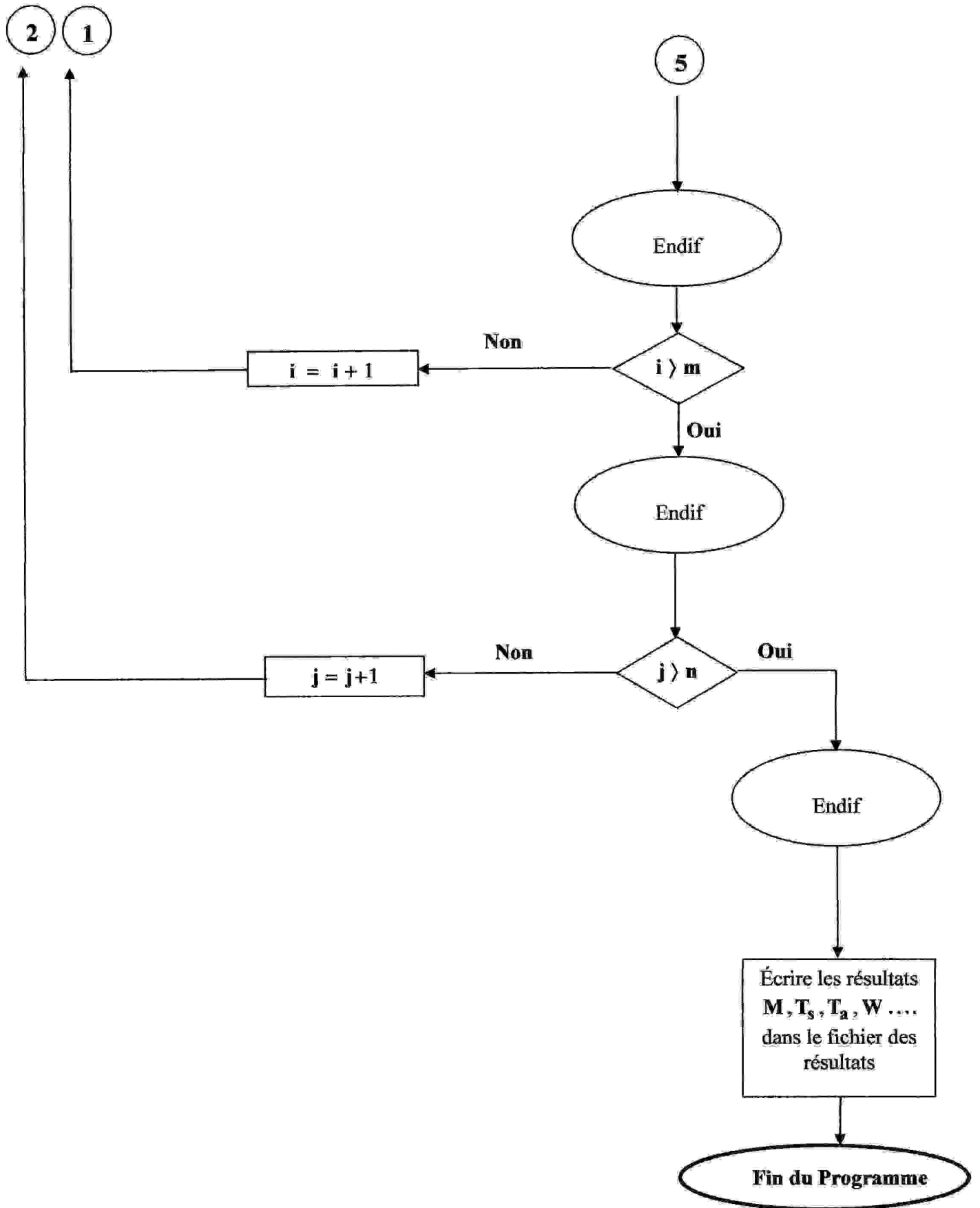
Pour la résolution du système d'équations, la méthode itérative de **Gauss–Seidel** est utilisée grâce aux avantages qu'elle présente.

Un code de calcul en **Fortran** a été ensuite développé pour la résolution du système dont l'organigramme est représenté ci-dessous:











CHAPITRE III

III- CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

III-1. INTRODUCTION:

Le séchage des produits agricoles, méthode commune de conservation naturelle en réduisant la quantité d'humidité, a toujours été une contribution significative au revenu des sociétés agricoles.

Des modèles de simulation du processus de séchage sont employés pour de nouvelles conceptions, améliorant les systèmes de séchage qui existent déjà et qui prévoient la circulation d'air au-dessus du produit, ou même pour le contrôle du processus (KARATHANOS et BELESSIOTIS, 1997 ; MATHIOULAKIS et AL., 1998 ; XIA et SUN, 2002). d'après [37]

Une connaissance profonde des paramètres de transfert et du comportement au séchage du produit particulier à sécher est considérée indispensable pour l'optimisation de l'exécution de séchage utilisée dans des modèles de simulation.

À cette fin, un modèle suffisamment précis est exigé, capable de prévoir les taux d'enlèvement de l'eau et de décrire l'exécution du séchage de chaque produit particulier dans les conditions utilisées dans les équipements appropriés.

Les paramètres du modèle employé par les algorithmes de simulation (coefficients de transfert, constantes de séchage etc....) sont directement liés aux conditions de séchage, c.-à-d. la température et la vitesse du milieu de séchage à l'intérieur du séchoir.

III-2. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE:

Le transport de l'eau pendant les processus de séchage des aliments a lieu en prédominance, pendant la période de chute de taux (SHARAF – ELDEEN et HAMDY, 1979) d'après [24, 37, 38].

Ceci est commandée par le mécanisme de la diffusion du liquide et peut-être décrit par la deuxième loi de FICK quand la diffusion radiale est considérée.

CRANK (1975), d'après [24, 37, 39, 40] a donné, la première fois, la solution analytique de l'équation de FICK pour différentes géométries (sphère, cylindre, plat rectangulaire), plus tard employée par beaucoup de chercheurs pour décrire les phénomènes de séchage de divers produits alimentaires.

D'après [24,37,40] , les modèles de séchage, décrivant le processus de séchage, peuvent être distingués dans trois catégories principales (SHARAF – ELDEEN et HAMDY,1979 ; MIDILLI et AL. , 2002 ; PANCHARIYA et AL. ,2002) à savoir : Les modèles théoriques , les modèles semi-théoriques et les modèles entièrement empiriques.

1- Les modèles théoriques : Le modèle de séchage théorique le plus largement étudié a été la deuxième loi de **FICK** de la diffusion ; en effet le séchage de beaucoup de produits alimentaires tels que le riz (**ECE** et **CIHAN** , 1993) et les noisettes (**DEMIRTAS** et **AL.** , 1998) a été prévu avec succès.

2- Les modèles semi-théoriques : offrant un compromis entre la théorie et la facilité d'utilisation (**FORTES** et **OKOS**,1981) et dérivant généralement soit directement de la solution générale de la loi **FICK** par simplification, soit des modèles simplifiés. Ce type de modèles n'est valide que dans les gammes spécifiques de la température, de la vitesse et de l'humidité de l'air pour lesquelles ils sont développés. Un tel modèle n'a besoin ni d'une géométrie d'un aliment typique, ni de sa diffusivité massique, ni d'ailleurs de sa conductivité (**PARRY**,1985).

3- Les modèles entièrement empiriques : dérivant des relations statistiques et corrélant directement le contenu d'humidité avec le temps de séchage. Ils négligent des principes fondamentaux du processus de séchage et leurs paramètres n'ont aucune signification physique (n'ayant aucun raccordement physique avec le processus de séchage lui-même) ; donc ils ne peuvent pas donner un avis précis et clair sur les processus importants qui se produisent pendant le séchage bien qu'il puissent décrire la courbe de séchage pour les conditions propres aux expériences (**ÖZDEMİR** et **DEVRES**,1999).

La différence principale entre ces trois groupes est que les modèles théoriques suggèrent que le transport d'humidité est contrôlé principalement par des mécanismes de résistance interne, alors que les deux autres ne considèrent que la résistance externe au transfert d'humidité entre le produit et l'air (**BRUCE**, 1985 ; **ÖZDEMİR** et **DEVRES**, 1999 ; **PARTI**,1993) d'après [40].

III-2-1. MODÈLES MATHÉMATIQUES DES COURBES DE SÉCHAGE:

L'équation de base, la plus généralement, employée pour décrire le processus de séchage, est semblable à la loi de NEWTON pour le refroidissement, incorporant une constante de séchage simple **K** pour l'effet combiné de divers phénomènes de transfert qui existent.

Elle a été, premièrement, suggérée par LEWIS (1921) et a la forme générale suivante:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_{eq}) \quad (\text{III} - 1)$$

Bien que les propriétés de transfert soient nécessaires pour décrire amplement la cinétique du séchage des matériaux, cette constante de séchage simple **K**, en combinant l'effet des divers phénomènes de transfert, est la plus généralement employée en pratique.

La solution de l'équation précédente est obtenue par intégration (AZZOUC et AL., 2002 ; PAHLAVANZADEH et AL., 2001 ; SAWHNEY et AL. 1999) [37,41]:

$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-K \cdot t) \quad (\text{III} - 2)$$

et c'est le **modèle de LEWIS**.

Ce modèle est, aussi parfois, appelé **modèle de NEWTON**. [40,42]

III-2-1-1. MODÈLES SEMI-THÉORIQUES:

Parmi les modèles semi théoriques, en plus du **modèle de LEWIS**, il y a:

→ L'approche semblable au **modèle de LEWIS** celle rapportée par HENDERSON et PABIS (1961): [24, 37, 42,43]

$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = A \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (\text{III} - 3)$$

et connue sous le nom du **modèle de HENDERSON et PABIS**.

—→ L'autre approche qui est celle du modèle dit "**modèle Logarithmique**" pour les fruits (TOGRUL et PEHLIVAN, 2004) :

$$MR = A \cdot \exp(-K \cdot t) + C \quad (\text{III} - 4)$$

où **A** et **C** sont des constantes dépendant du modèle.

—→ SHARAF-ELDEEN, BLAISDELL et HAMDY ont présenté le modèle exponentiel à deux termes:

$$MR = A \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + B \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \quad (\text{III} - 5)$$

basé sur la solution classique de l'équation de diffusion du liquide: [44]

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D \cdot t}{r_0^2}\right) \quad (\text{III} - 6)$$

et tenant compte seulement des deux premiers termes de la série de solutions, avec l'hypothèse de la géométrie sphérique (dont le rayon est r_0), du coefficient de diffusion **D** constant et du contenu d'humidité initial constant et égal à M_0 .

Un certain nombre de variations de l'équation de base (III - 2) a été développé comme suit:

—→ PAGE (1949) : qui a présenté l'équation de séchage de la couche mince du maïs:

$$MR = \exp(-K \cdot t^n) \quad (\text{III} - 7)$$

Plusieurs chercheurs ont utilisé la même équation pour d'autres grains (CHHINNAN, 1984 ; OVERHULTS et AL., 1973 ; PATHAK et AL., 1949). [37]

→ L'équation modifiée de **PAGE** (**PAGE**, 1949):

$$MR = A \cdot \exp\left(- (K \cdot t^n)\right) \quad (\text{III} - 8)$$

→ L'approche de **OVERHULTS** et **AL.** (1973):

$$MR = \exp\left(- (K \cdot t)^n\right) \quad (\text{III} - 9)$$

III-2-1-2. MODÈLES EMPÉRIQUES:

Parmi les modèles empiriques il y a:

→ Le modèle de **THOMPSON** (**THOMPSON** et **AL.**, 1968). [37]

(Pour le maïs)

$$t = A \cdot \ln MR + B \cdot (\ln MR)^2 \quad (\text{III} - 10)$$

→ Le modèle de **WANG** et **SINGH** (**WANG** et **SINGH**, 1978). [37,40]

(Pour le séchage du riz).

$$MR = 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 \quad (\text{III} - 11)$$

→ Le modèle **WEIBULL DISTRIBUTION**. [35]

$$MR = A - B \cdot \exp\left(- (K \cdot t^n)\right) \quad (\text{III} - 12)$$

III-3. ÉTUDES ANTÉRIEURES:

III-3-1. ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LES FRUITS ET LÉGUMES:

Il y a eu beaucoup d'études sur le séchage, en couches minces ainsi que sur les modèles mathématiques, des divers légumes et fruits comme:

La pomme de terre (**DIAMANTE** et **MUNRO**, 1993) , les oignons (**RAPUSAS** et **DRISCOLL**, 1995 ; **SARSAVADIA** et **AL.**, 1999) , les noisettes (**ÖZDEMİR**

et DEVRES ,1999) , les haricots verts et les courges (YALDIZ et ERTEKIN , 2001) , les bananes (DANDAMRONGRAK et AL. ,2002) [40] , les choux frisés (G. MWITHIGA et J. O. OLWAL ,2005) [42] , le raisin , les figues , la tomate , les oignons et les pois verts (A.A. EL-SEBAI et AL. , 2002) [41]

Le séchage en couches épaisses, n'a fait objet que pour le cas des grains, en effet tous les travaux trouvés sur le séchage de fruits étaient en couches minces, à part ceux trouvés de:

**** (RATTI et A. S. MUJUMDAR,1994) dans [22] sur les carottes, la pomme de terre et les pommes :** où un modèle pour la simulation des séchoirs à lots a été développé; l'effet du rétrécissement des matériaux pendant le séchage a été incorporé au modèle. Ce modèle a été prolongé pour inclure le cas de l'inversion de flux d'air. Les résultats de la simulation pour des conditions constantes d'air d'admission ont été comparés aux données expérimentales obtenues pendant le séchage en lots des cylindres de carotte. (Voir Figure (III-1)).

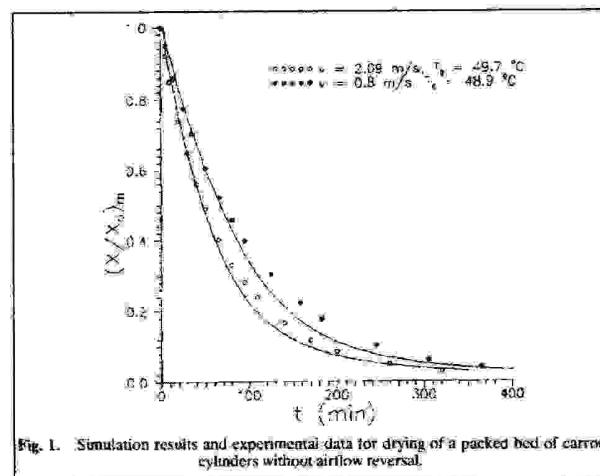


Figure (III-1) : Résultats de simulation et données expérimentales pour le séchage de la couche épaisse des cylindres de carottes. [22]

**** (JOSEF JILEK,1991) dans [32] sur la luzerne ;** où dix-huit expériences ont été effectuées sur une couche épaisse du produit humide.

** (GIKURU MWITHIGA, JOSEPH OCHIENG OLWAL, 2005) dans [42] ;

où l'effet de la température de l'air et de l'épaisseur d'échantillon sur la cinétique de séchage du chou frisé a été étudié. (Figures (III-2) -(III-3)).

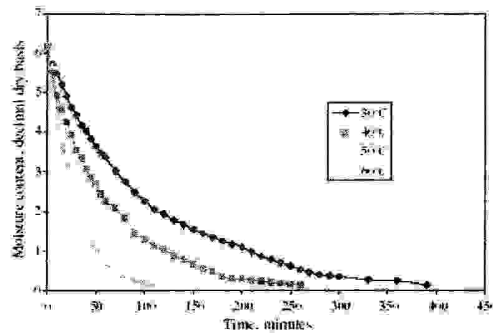


Fig. 5. Variation of moisture content with time and drying air temperature when drying kale in 10 mm thick layers.

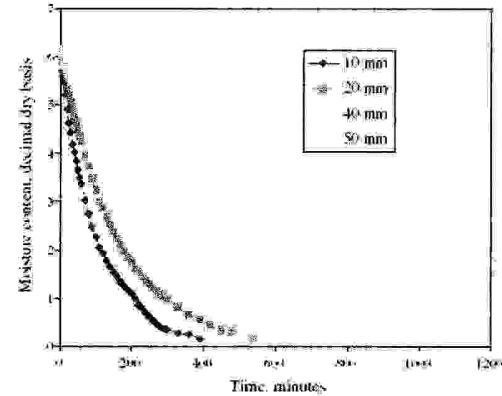


Fig. 6. Variation of moisture content with drying time and layer thickness when drying kale at a drying air temperature of 30 °C.

Figure (III-2) : Variation de la teneur en humidité en fonction du temps et de la température de l'air asséchant en séchant le chou frisé dans des couches épaisses de 10 millimètres. [42]

Figure (III-3) : Variation de la teneur en humidité en fonction du temps et de l'épaisseur de la couche en séchant le chou frisé à une température de l'air asséchant de 30 °C. [42]

et de

** (L. BENNAMOUN, 2006) dans [7] sur le raisin ; où l'étude a porté sur le séchage de couches épaisses dans un séchoir à lots à convection forcée.

Nota:

Sur le séchage des figes, en couches épaisses, aucun travail n'a été trouvé.

Les études faites sur les cinétiques de séchage des différents fruits et légumes peuvent être présentées, après une certaine classification, par les exemples trouvés dans les articles, comme suit:

- Les travaux qui présentent des modèles mathématiques de séchage de fruits ou légumes et afin d'estimer et choisir l'équation de la courbe de séchage appropriée (pour expliquer le comportement du séchage et de développer le modèle mathématique des produits agricoles), un nombre de modèles différents est appliqué et adapté aux données expérimentales et comparé selon les coefficients de détermination : ce n'est, en

vérité, qu'une évaluation des modèles de séchage dans le but de décrire les cinétiques de séchage.

Par exemple:

→ Le travail de (EBRU KAVAK AKPINAR, 2006) [40] sur le séchage des tranches de pomme de terre, de pomme et de potiron dans un séchoir à convection. (Voir Figures (III-4) et (III-5)).

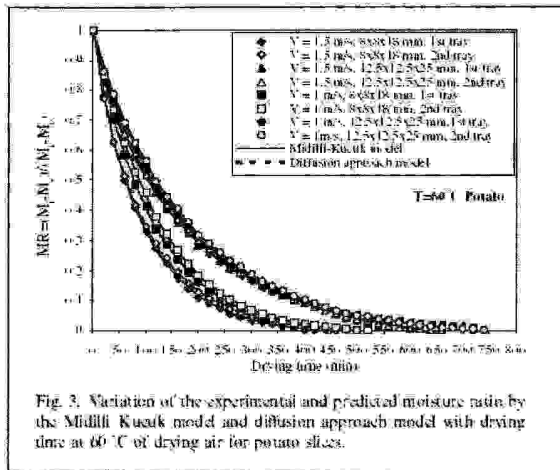


Fig. 3. Variation of the experimental and predicted moisture ratios by the Midilli Kucuk model and diffusion approach model with drying time at 60 °C of drying air for potato slices.

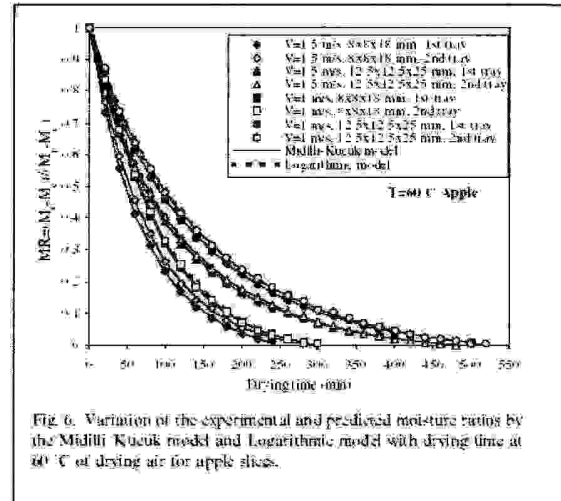


Fig. 6. Variation of the experimental and predicted moisture ratios by the Midilli Kucuk model and Logarithmic model with drying time at 60 °C of drying air for apple slices.

Figure (III-4) : Variation du ratio d'humidité (expérimental et prédit) par le modèle de MIDILLI-KUCUK et celui d'approche de diffusion en fonction du temps de séchage à 60 °C pour les tranches de pomme de terre. [40]

Figure (III-5) : Variation du ratio d'humidité (expérimental et prédit) par le modèle de MIDILLI-KUCUK et le modèle logarithmique en fonction du temps de séchage à 60 °C pour les tranches de pommes. [40]

→ Le travail de (A. VEGA et AL., 2007) [45] où la cinétique de séchage du paprika rouge a été étudiée et modélisée aux différentes températures (50, 60, 70 et 80 °C) et utilisant une vitesse d'air de 2,5 m /s.

Pour chaque température utilisée, seulement une période en chute de taux a été observée et aucune période de séchage de taux constant n'a été présente. Les modèles de NEWTON, HENDERSON-PABIS, PAGE et PAGE MODIFIÉ ont été appliqués aux données d'humidité expérimentalement obtenues. (Voir Figures (III-6) et (III-7)).

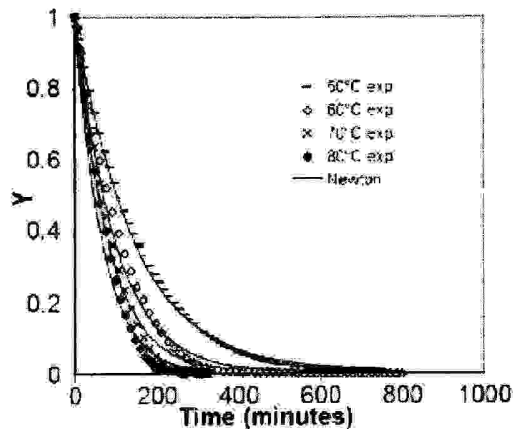


Fig. 4. Experimental and calculated moisture ratio by Newton m

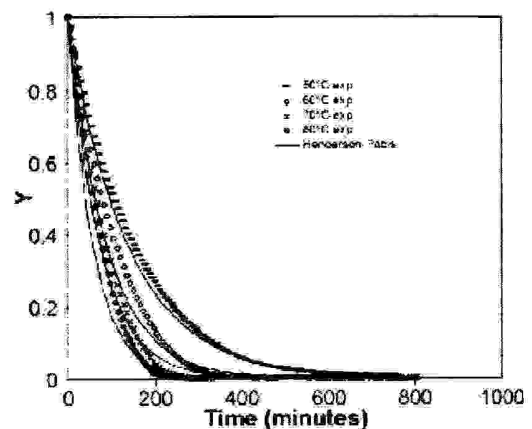


Fig. 5. Experimental and calculated moisture ratio by Henderson Pabis model.

Figure (III-6) : Ratio d'humidité (expérimental et calculé) par le modèle de NEWTON.
[45]

Figure (III-7) : Ratio d'humidité (expérimental et calculé) par le modèle de HENDERSON-PABIS.
[45]

● Les travaux qui évaluent expérimentalement la cinétique de séchage des produits agricoles en fonction des conditions de séchage (en utilisant un seul modèle mathématique ou même deux); une comparaison est alors faite entre les résultats obtenus pour le produit considéré aussi bien avec les résultats trouvés qu'avec ceux trouvés dans la littérature : ce n'est, en vérité, qu'une étude sur l'influence des conditions de séchage (température, vitesse et humidité de l'air asséchant, surface d'échantillon) sur les constantes de séchage.

Par exemple:

→ Le travail de (S. AZZOUZ et AL., 2002) [44] dont l'étude a été réalisée sur deux genres de raisins cultivés des deux côtés de la méditerranée. (Voir Figures (III-8) et (III-9)).

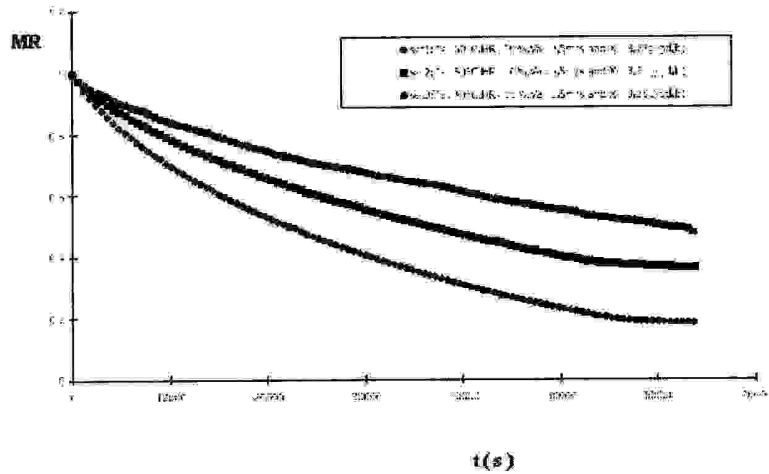


Figure (III-8) : Équation de cinétique du séchage de la couche du raisin de sultanie. [44]

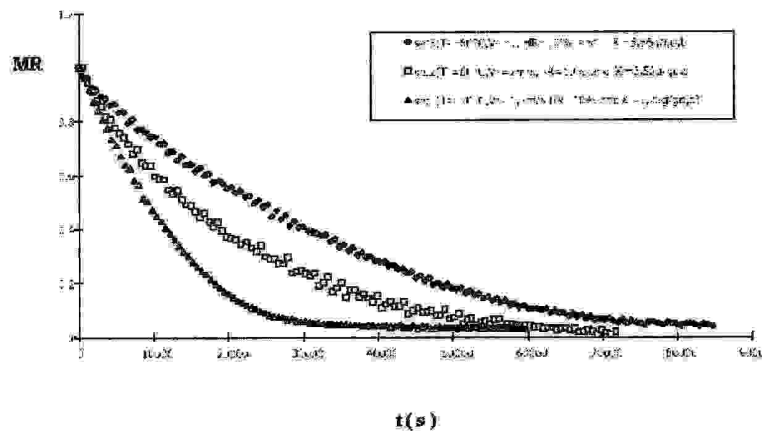


Figure (III-9) : Équation de cinétique du séchage de la couche du raisin de Chasselas. [44]

● Les travaux qui présentent des études paramétriques en examinant l'influence des paramètres de l'air asséchant sur les courbes de séchage:

Il y a:

$M = f(t)$ avec variation de T_a et constance de v et de ϕ : pour voir l'influence de la température de l'air T_a ;

$M = f(t)$ avec variation de v et constance de T_a et de ϕ : pour voir l'influence de la vitesse de l'air v ;

$M = f(t)$ avec variation de ϕ et constance de v et de T_a : pour voir l'influence de l'humidité relative de l'air ϕ ;

Il y a aussi :

$M = f(t)$ avec variation de la longueur spécifique du produit et constance des paramètres de l'air : pour voir l'influence de cette longueur caractéristique.

Par exemple:

→ Le travail de (O. YALDIZ et AL., 2001) [38] Sur le séchage en couches minces du raisin de sultanine (Voir Figure (III-10)):

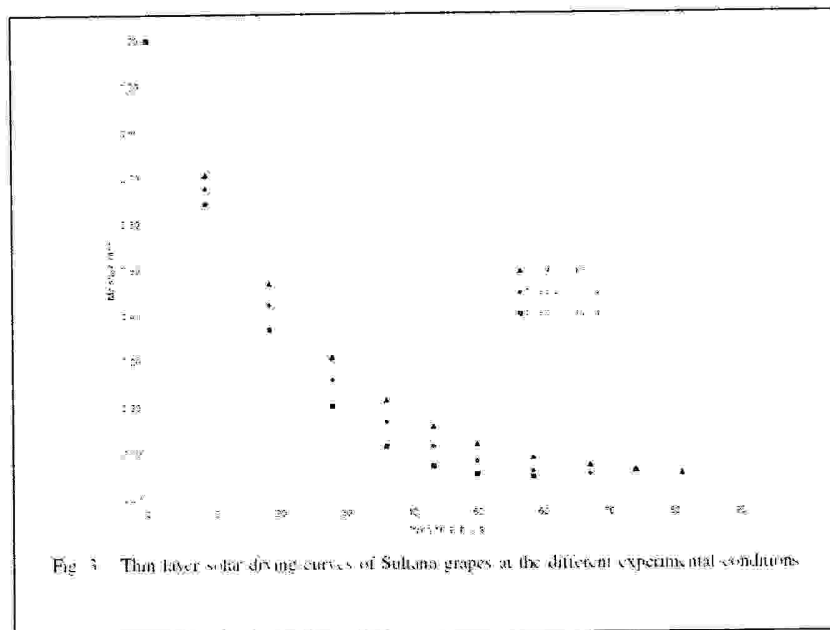


Figure (III-10) : Courbes de séchage solaire de la couche mince du raisin de Sultanie aux différentes conditions expérimentales. [38]

→ Le travail de (I. T. TOĞRUL and D. PEHLIVAN, 2003) [46] où le comportement au séchage des abricots simples, accrochant dans le sens d'écoulement d'air chaud dans une chambre de séchage, a été étudié. Dans les expériences, l'air a été passé par la chambre à une variété de vitesses (0,2 ; 0,5 ; 1,0 et 1,5 m/s) et de températures (50, 60, 70 et 80 °C). Les variations des taux de séchage avec le temps et le contenu d'humidité ont été employées pour examiner quatorze modèles de séchage d'une couche pour différentes données dans la littérature.

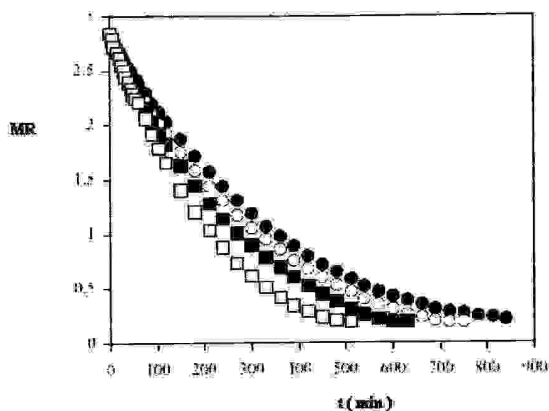


Figure (III-11) : Courbes de séchage d'une couche d'abricot à la température d'air de 70 °C. Les vitesses de l'air: ● 0.2 m/s ; ○ 0.5 m/s ; ■ 1.0 m/s; □ 1.5 m/s [46]

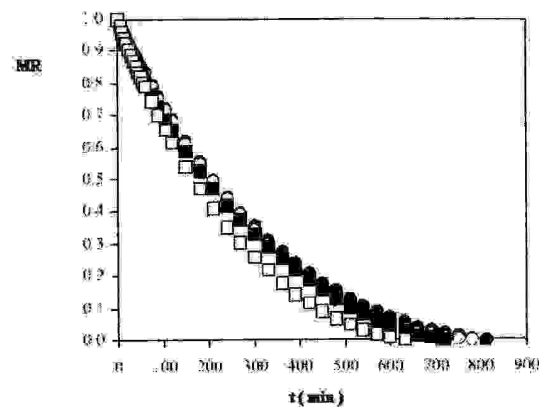


Figure (III-12) : Courbes de séchage d'une couche d'abricot à la vitesse de l'air de 0.5 m/s. Les températures de l'air: ● 50 °C ; ○ 60 °C ; ■ 70 °C ; □ 80 °C [46]

III-3-2. ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LES FIGUES:

La Figue, un des premiers fruits cultivés, est l'un des produits secs les plus importants avec plusieurs variétés séchées et stockées pour une consommation postérieure (VINSON,1999). [37]

Des figues peuvent être séchées aussi bien par des moyens traditionnels (le soleil ouvert ou séchage solaire) que dans des séchoirs utilisant l'air de chauffage.

De nos jours, un volume croissant de toute la production des figues est séché artificiellement, dans les systèmes mécaniques de séchage à chauffage d'air par la convection forcée.

★ Le travail de (A. A. EL- SEBAH et AL., 2002) [41], où a été pris en considération le séchage de quelques légumes et fruits tels que: le raisin les asperges, les pois, la tomate les oignons et les **figues**, en convection naturelle par un séchage indirecte (voir Figure (III-3-1)).

L'étude était à la fois, expérimentale et théorique dans le but d'une comparaison entre les deux approches.

★ Le travail de S. J. BABALIS et V. G. BELESSIOTIS, 2004) [24], où l'influence des caractéristiques de séchage des figes a été établie en couches minces et en convection forcée, tout en déterminant l'effet de la température de l'air et de sa vitesse sur les constantes de séchage en adaptant les données expérimentales par l'utilisation des techniques d'analyse de régression.

Le séchage des figes a eu lieu principalement dans la période de chute de taux, des températures de l'air plus élevées affectent de manière significative le taux de séchage aux premières étapes du séchage, mais leur effet relatif diminue après une période d'environ 10 -15 h. La grande influence de la vitesse d'air aux premières étapes du séchage est évidente, comme l'insensibilité relative du processus de séchage aux temps postérieurs. (Voir Figures (III-13 (a)) et (III-13 (b))):

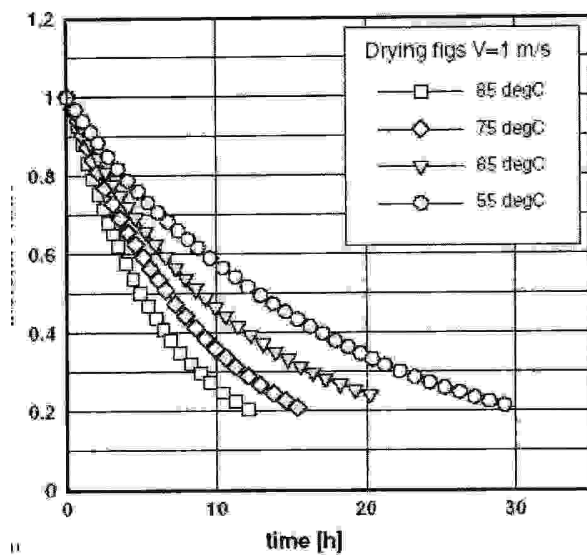


Figure (III-13 (a)) : Effet de la température sur les courbes de séchage pour la vitesse d'air de 1 m/s.

(a) : Ratio d'humidité en fonction du temps.

[24]

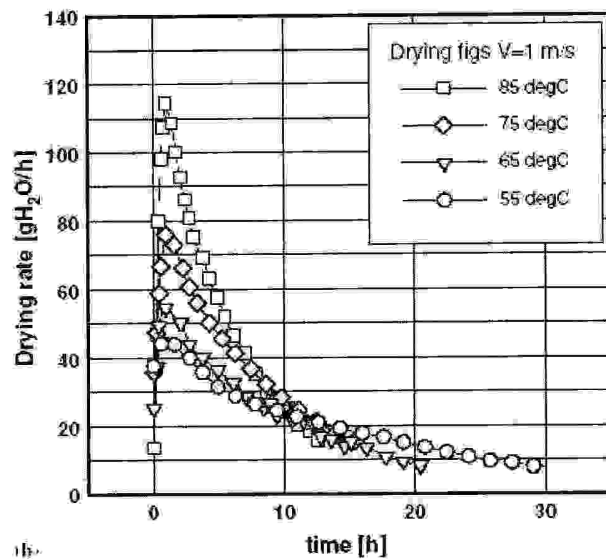


Figure (III-13 (b)) : Effet de la température sur les courbes de séchage pour la vitesse d'air de 1 m/s.

(b) : Taux d'humidité en fonction du temps.

[24]

★ Le travail de (I. DOYMAZ, 2005) [39], où le séchage solaire des figues a été étudié expérimentalement. La période constante de taux est absente dans la courbe de séchage et le processus de séchage a lieu pendant la période de chute de taux. Les données de séchage ont été adaptées à huit différents modèles mathématiques. (Voir figure (III-14))

★ Le travail de (S. J. BABALIS and AL., 2006) [37], où on a porté sur le séchage des figues par convection forcée dans une gamme bien précise de températures et de vitesses de l'air asséchant, en adaptant dix modèles mathématiques de séchage en couches minces aux données expérimentales obtenues, afin de trouver le modèle capable de décrire exactement le séchage des figues en convection forcée; ce dernier qui a lieu, principalement, dans la période de chute de taux pour la gamme entière des valeurs de la température et de la vitesse étudiées. (Voir Figure (III-15)):

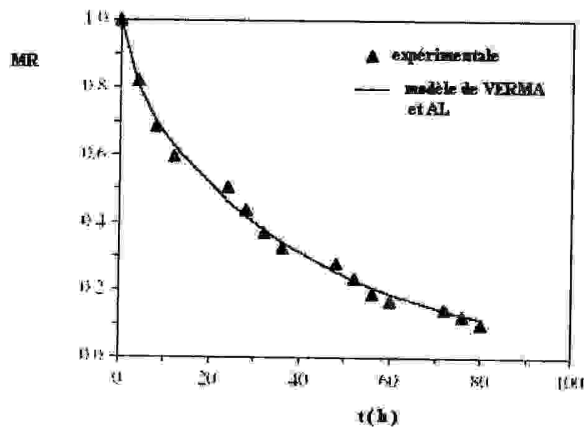


Figure (III-14) : Ratios d'humidité des figues prévus et ceux déterminés expérimentalement en fonction du temps de séchage. [39]

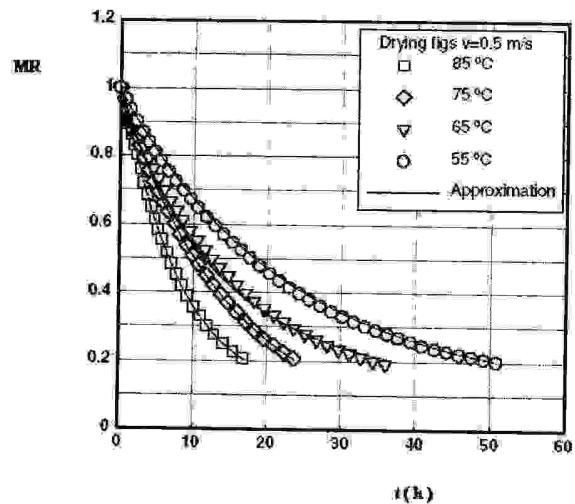


Figure (III-15) : Courbes de séchage (symboles) et approximations (lignes) utilisant le modèle exponentiel à deux termes pour différentes valeurs de T_a lorsque $v = 0.5 \text{ m/s}$. [37]

★ Le travail de (G. XANTHOPOULOS and AL. ,2007) [43], où un modèle mathématique a été présenté pour le séchage d'une couche de figues dans une pompe à chaleur expérimentale à cycle fermé.

Sept modèles de séchage ont été adaptés aux données expérimentales de séchage des figues, mettant en application des techniques non linéaires d'analyse de régression, afin d'avoir le meilleur modèle en termes d'exécution, tout en déterminant des corrélations entre les paramètres du modèle et les conditions de séchage pour calculer $MR = f(t)$. (Voir Figure (III-16)):

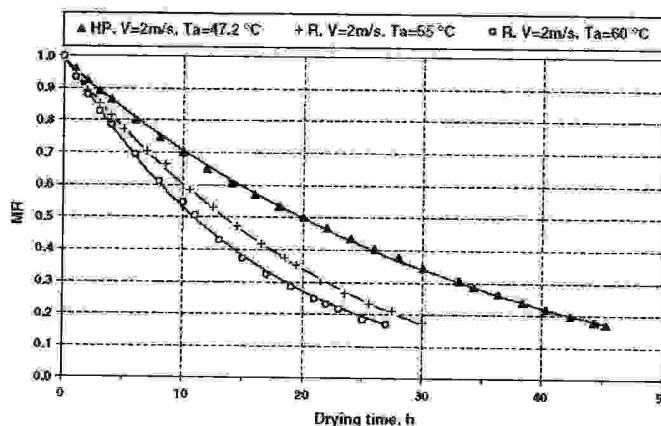


Fig. 4. Air temperature effect on the drying curves at 2 m/s.

Figure (III-16) : Effet de la température de l'air sur les courbes de séchage à 2 m/s. [43]

CONCLUSION:

Après tous ces travaux antérieurs sur la cinétique de séchage des fruits et légumes, nous avons pu toucher l'importance du modèle choisi pour la bonne représentation du processus de séchage c'est-à-dire le modèle qui nous rapproche le plus de la réalité !

III-4. APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE DES FIGUES (PRÉSENTE ÉTUDE):

III-4-1. CALCULS DES CONSTANTES DE SÉCHAGE:

Le modèle de HENDERSON et PABIS est choisi pour l'étude de la cinétique, il présente une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux [41, 37, 39, 40, 42, 43, 24,47], dont quelques uns sont présentés sur les seize figures précédentes.

Ce modèle n'est, en vérité, que le premier terme de la série de la solution générale de la deuxième loi de FICK (DOYMAZ, 2005) d'où son appartenance à la deuxième catégorie des modèles de séchage. [40]

C'est aussi, d'après [44], un modèle destiné pour les produits de forme sphérique.

S. J. BABALIS et V. G. BELESSIOTIS (2004) [24] ont étudié l'influence des conditions de séchage des figues sur les constantes de séchage et cela en utilisant le modèle précédent.

Plusieurs essais de séchage ont été effectués dans un séchoir tunnel d'échelle de laboratoire, en effet les valeurs du coefficient **K** sont approximées par l'équation simple de type Arrhenius (RAPUSAS et DRISCOLL ,1995 ; URETIR et AL.,1996 ; VERMA et AL. , 1985) dont la forme est :

$$K = KO \cdot \exp\left(\frac{-Ea}{Rg \cdot T_{abs}}\right) \quad (\text{III} - 13)$$

L'effet de la température de l'air et de sa vitesse sur les constantes de séchage a été déterminé en adaptant les données expérimentales par l'utilisation des techniques d'analyse de régression.

KO est un coefficient donné, en fonction de la vitesse de l'air asséchant par:

$$KO = 1341.2 \exp(2.8404 \cdot v) \quad (\text{III} - 14)$$

et E_a est l'énergie d'activation donnée, toujours, en fonction de v par:

$$E_a = \frac{(34.037663 \times 14407.625) + (48.47102 \times v^{15.96189})}{14407.625 + v^{15.96189}} \quad (\text{III} - 15)$$

En fin, la constante A dans l'équation (III - 3) est donnée, en fonction de v et T_a , par:

$$A = \left(\begin{array}{l} 0.000104 \cdot T_a^2 - 0.012291 \cdot T_a + 0.256909 \\ -0.000203 \cdot T_a^2 + 0.021976 \cdot T_a - 0.302885 \\ 0.000059 \cdot T_a^2 - 0.002967 \cdot T_a + 0.765417 \end{array} \right) \cdot v^2 \quad (\text{III} - 16)$$

M_{eq} est calculé à partir de l'équation de HENDERSON donnée, d'après [41], par :

$$1 - \phi = \exp(-\omega T_s - M_{eq} \zeta) \quad (\text{III} - 17)$$

ω et ζ sont deux constantes tirées expérimentalement.

Pour les figures : $\omega = 2.0108 \times 10^{-2}$ et $\zeta = 1.1714$

III-4-2. CALCUL DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT: [6, 18,19]

Pour une couche j , la vitesse de l'air v est calculée en fonction de la porosité qui est, à son tour, fonction du Shrinkage (rétrécissement) du produit pris en considération dans cette étude (deuxième spécificité de ce travail après la première qui était "le séchage d'un fruit en couches épaisses et non en couches minces").

La vitesse v est calculée comme suit: $v = \frac{v_0}{\varepsilon} \quad (\text{III} - 18)$

où v_0 est la vitesse de l'air à l'entrée du séchoir ;

la porosité ε est donnée par : $\varepsilon = 1 - OC$ (III - 19)

OC est le taux d'occupation et est défini comme le rapport entre le volume occupé par les sphères sur une claie et le volume du parallélépipède de dimension: $L \times \ell \times d_s$, la formule suivante a été utilisée pour son calcul:

$$OC = \frac{N_s \cdot \pi d_s^3}{6 \cdot L \cdot \ell \cdot d_s} \quad (III - 20)$$

d_s est le diamètre du produit calculé par :

$$d_s = \left(\frac{6 \cdot V_s}{N_s \cdot \pi} \right)^{1/3} \quad (III - 21)$$

(Ceci permet, bien, à l'effet du rétrécissement d'être pris en considération).

N_s est le nombre constant de sphères dans la couche j tel que:

$$N_s = \frac{L}{d_{so}} \times \frac{\ell}{d_{so}} \quad (III - 22)$$

V_s est le volume du produit, toujours, sur la claie j et est calculé comme suit:

$$V_s = \frac{m_{sh}}{\rho_s} \quad (III - 23)$$

ρ_s est calculée dans l'annexe C.

m_{sh} est égale à : $m_{sh} = (M + 1) \cdot m_{ssec}$ (III - 24)

m_{ssec} est constante, elle a été déduite à partir de sa composition initiale (voir annexe C) et en utilisant la formule précédente :

$$m_{ssec} = \frac{N_s \times 1073 \cdot 979 \times \pi \times d_{so}^3}{6(M_0 + 1)} \quad (III - 25)$$

III-4-3. VALEURS CHOISIES POUR LA PRÉSENTE ÉTUDE :

Pour la vitesse de l'air asséchant v :

0.42 ; 0.52 et 0.62 [m/s]

Pour la température de l'air asséchant T_a :

60 ; 70 et 80 [°C]

Pour l'humidité relative de l'air asséchant ϕ :

13 ; 16 et 20 [%]

III-4-4. COURBES DE SÉCHAGE:

La vraie traduction du séchage de nos figues, mises en couche épaisse, est la diminution de la teneur en eau dans le temps, qui est très claire sur toutes les courbes des figures (III-17 III-18 III-19 III-20 III-21 III-22) qui ne sont, en vérité, que les courbes de séchage étudiées dans le chapitre précédent et au début du présent, semblables toutes – par leurs allures – à celles trouvées dans:

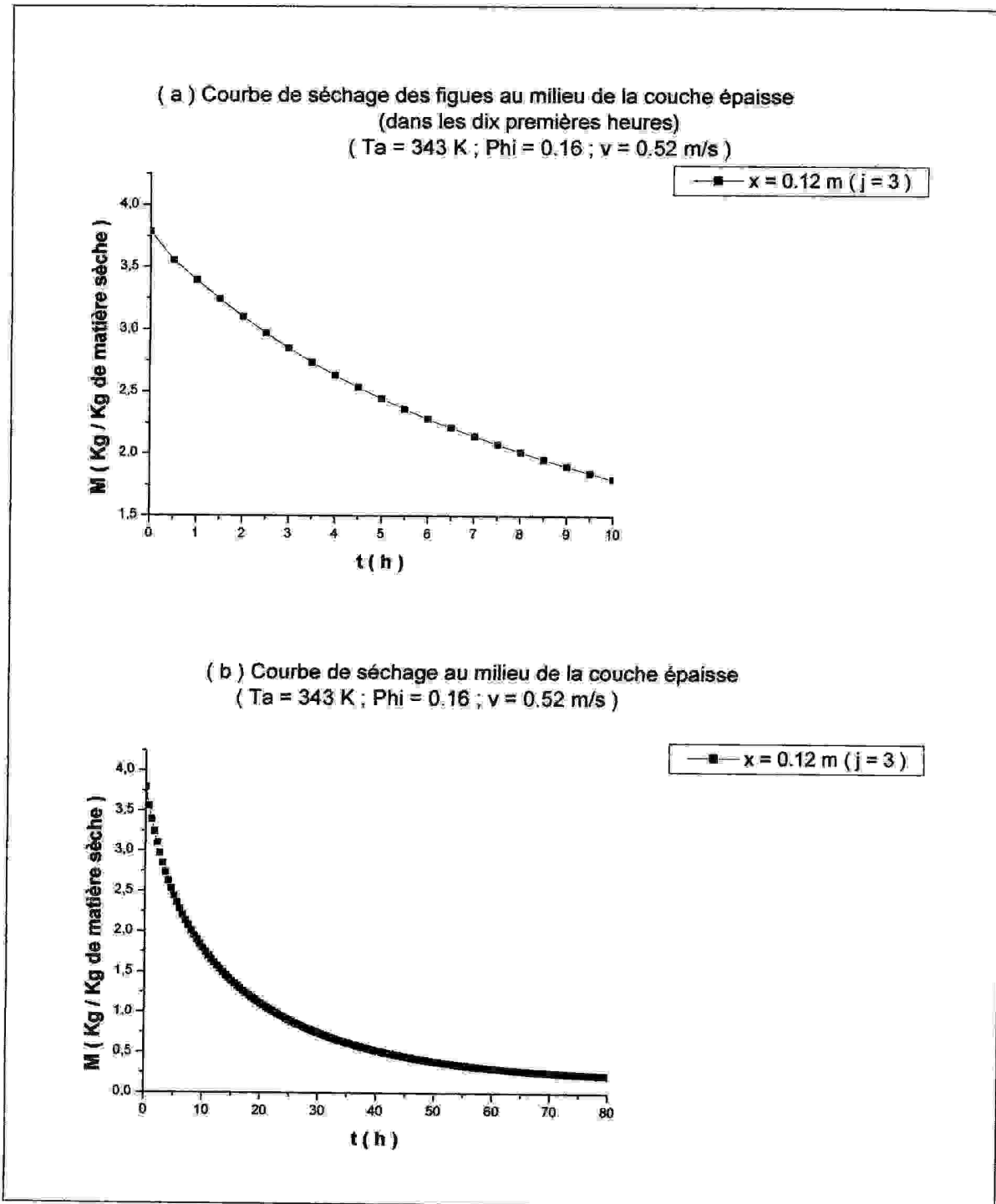
La théorie comme par exemple celle de : M. DAGUENET (1985) [1], P. RAZOUS (1955) [2], C. STRUMILLO and T. KUDRA (1986) [3], R.B. KEEY. (1992) [48], M. FORTES and M. R. OKOS. (1980) [49], A. CHARREAU et R. CAVAILLÉ. (1991) [10] et F. VACHET. (1993) [11].

Les travaux expérimentaux tels que ceux de : L. DOYMAZ (2005) [39], P. M. CHAUHAN and AL. (1996) [50], S. TRICHAIYAPORN and AL. (1992) [51], V. T. KARATHANOS and V. G. BELESSIOTIS. (1997) [52], A. R. P. KINGSLY (2007) [23], C. RATTI and A.S. MUJUMDAR (1995) [22], L. BENNAMOUN and A. BELHAMRI (2007) [19], S. YUCEF – ALI and AL. (2001) [53], A. HACHEMI and AL. (1998) [26], L. BENNAMOUN (2001) [6], E. K. AKPINAR. (2006) [40], S. SIMAL and AL. (1988) [54], A.W.AREGBA, J. P. NADEAU. (2007) [25], S. TRICHAIYAPORN and AL. (1992) [51],

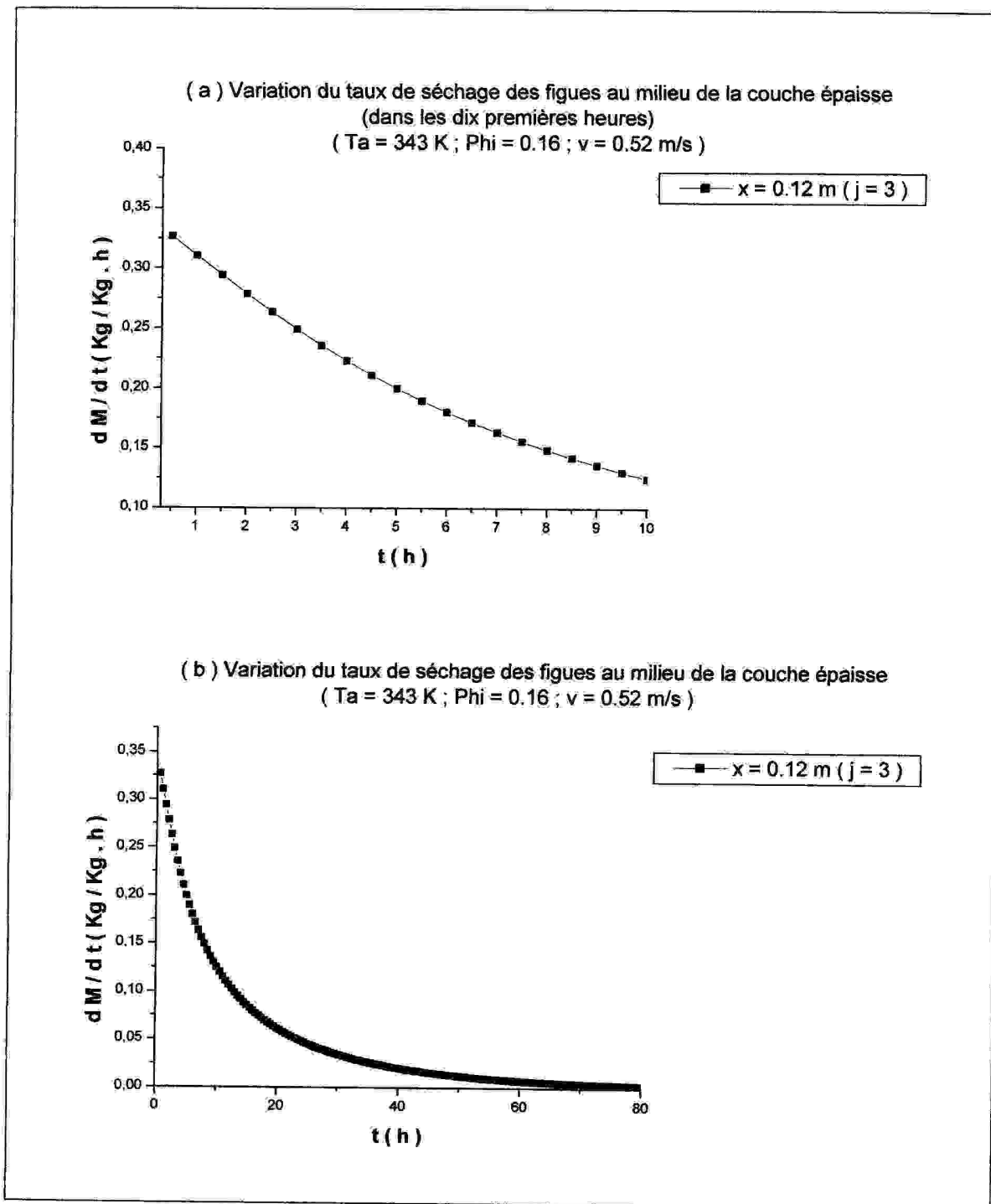
S. J. BABALIS and V.G. BELESSIOTIS (2004) [24] et A. VEGA et AL. (2007) [45].

Les thèses académiques comme celles de : L. BENNAMOUN. (2001) [6], N.SOTEHI (2003) [4], F. ZEMMOURI. (2005) [5], L. BENNAMOUN. (2006) [7] et CHOUGIAT (2004) [47].

Toutes les figures ne permettent de distinguer qu'une seule phase de séchage: **la phase de séchage à vitesse décroissante** caractérisée, sur **la Figure (III-17)**, par une inclinaison décroissante où la tangente n'est pas constante et encore mieux sur **la Figure (III-18)** où le taux de séchage est nettement décroissant (la pente étant négative).

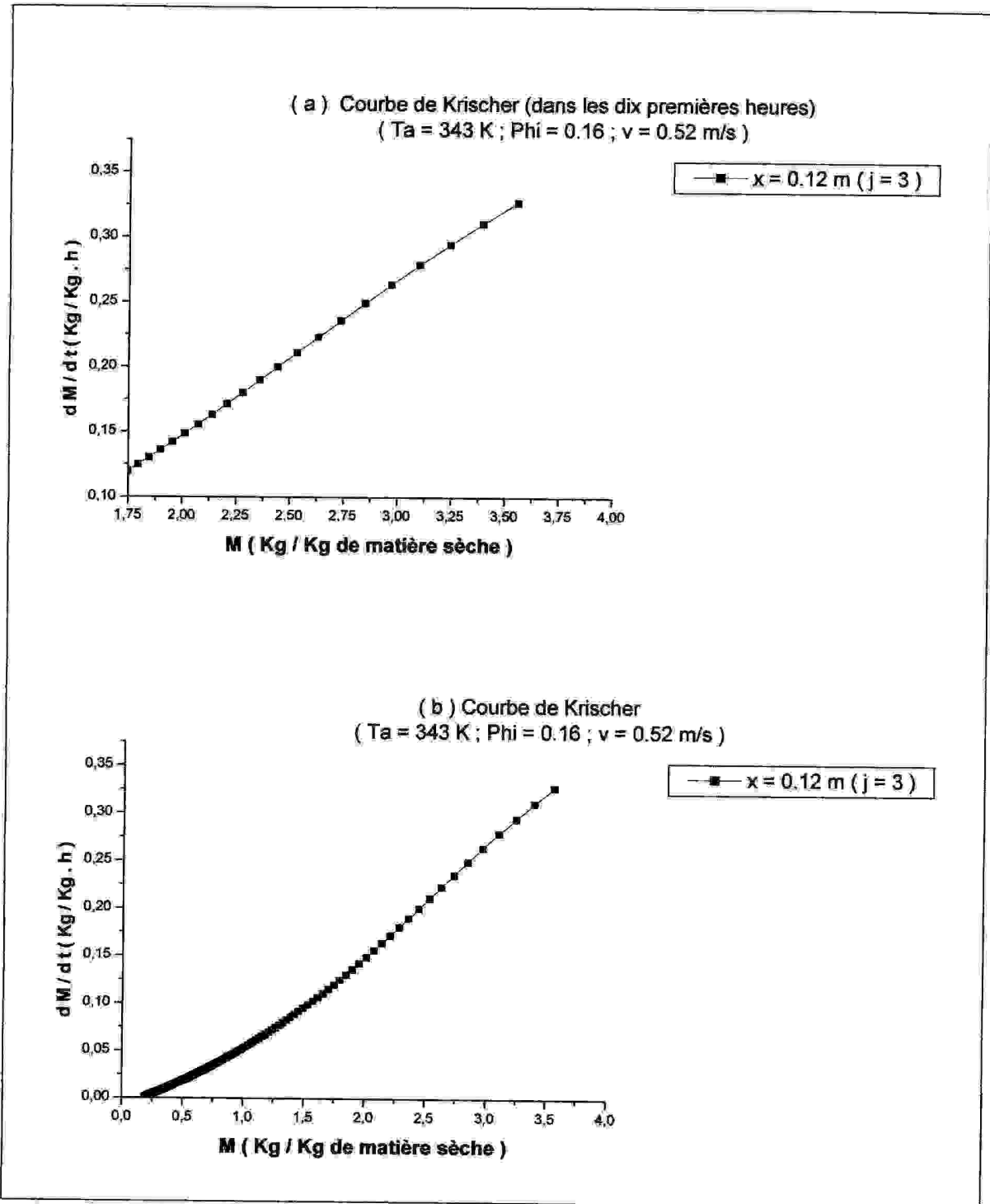


Figures (III-17): Variation de la teneur en eau des figues en fonction du temps
au milieu de la couche épaisse $M = f(t)$.



Figures (III-18): Variation du taux de séchage des figues au milieu de la couche

épaisse en fonction du temps $\frac{dM}{dt} = f(t)$



Figures (III-19) : Variation du taux de séchage des figes mises en couche épaisse en fonction de la teneur en humidité $\frac{dM}{dt} = f(M)$ (Courbe de KRISCHER)

Les trois types de représentation précédents ont pu, donc, mettre en évidence l'existence d'une seule phase pendant le déroulement du séchage: la phase CD (vue dans le premier chapitre). **La phase à vitesse constante de séchage est absente !**

Ces résultats sont en très bonne concordance avec:

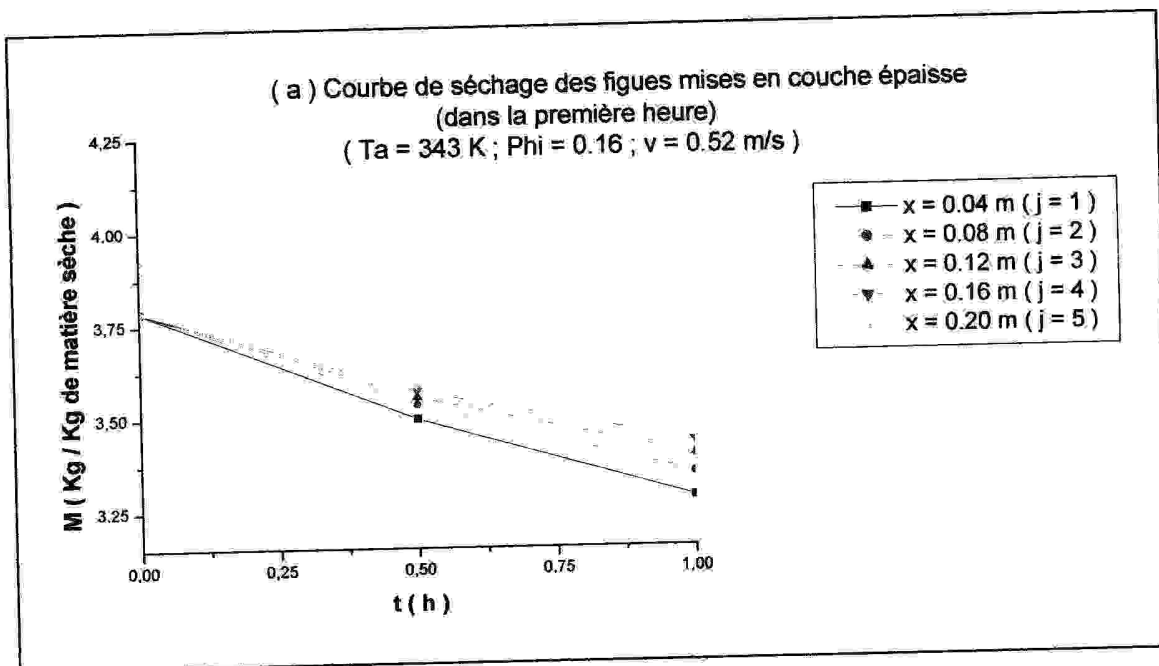
La théorie présentée par les travaux de [2, 3, 13, 48, 49]

Les travaux expérimentaux sur les fruits et légumes de [40, 42, 45, 37, 39, 43]

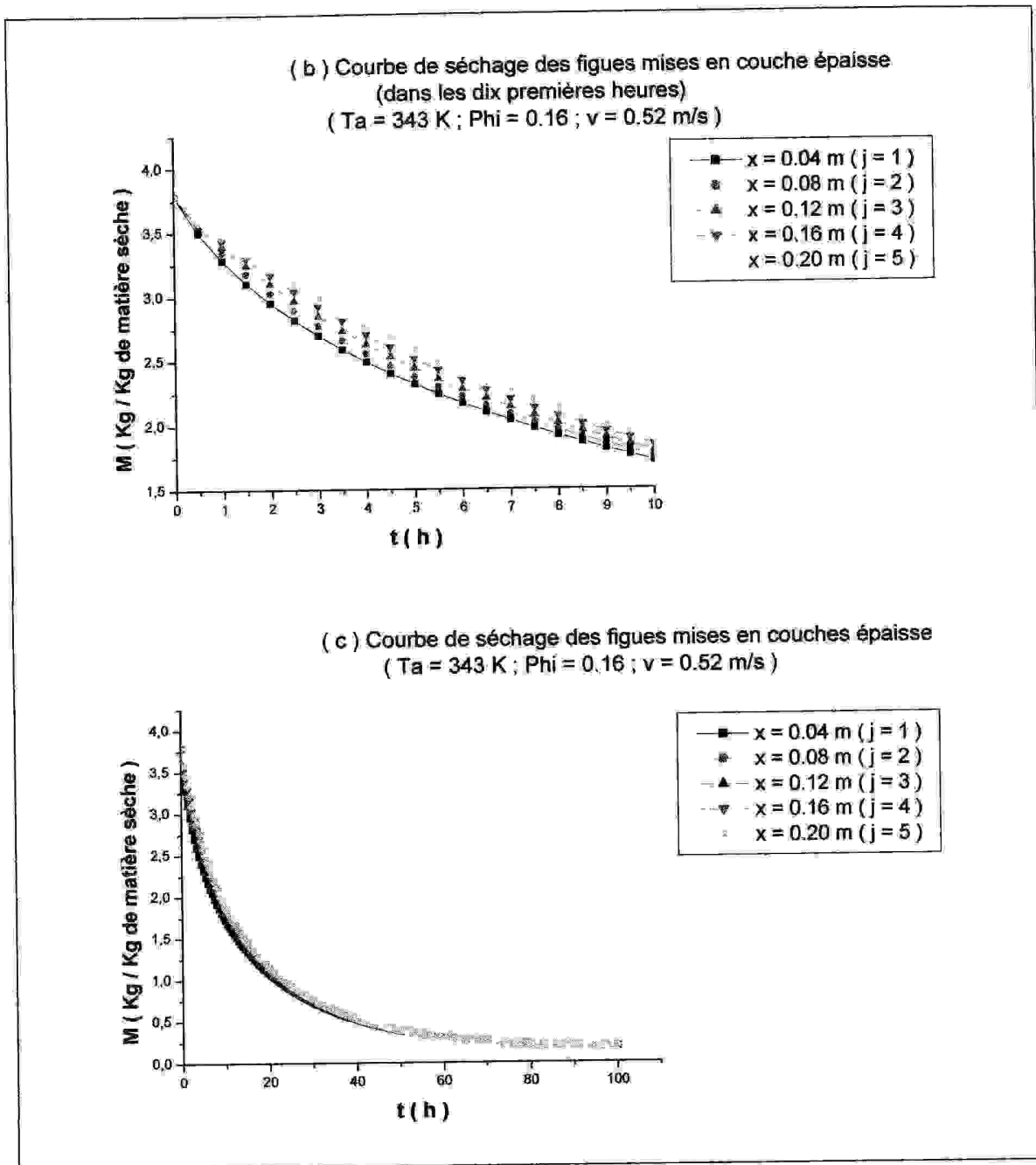
Les travaux expérimentaux de [24] sur les figues et utilisant le même modèle que le notre.

Les figures (III-20) montrent la variation temporelle de la teneur en eau des figues pour plusieurs hauteurs.

Les courbes de la figure (III-20 (a)) commencent à se séparer dès les 7.5 premières minutes du séchage ; on peut voir, déjà, qu'à la fin de la première demi heure (à $t = 0.5 \text{ h}$) que la première courbe ($j = 1$) est entrain de se séparer des quatre autres courbes d'une manière plus importante que celle prise par ces mêmes dernières entre elles et c'est la même attitude qui se reproduit à $t = 1.5 \text{ h}$, par exemple, avec la deuxième courbe ($j = 2$) quant aux courbes supérieures (et c'est la même chose concernant les autres courbes) : ceci est dû à la diminution de la teneur en eau dans le temps (c'est le processus du séchage même) et à son augmentation dans l'espace c'est-à-dire la hauteur (les couches inférieures sont traversées par un air plus chaud et moins saturé).



Figures (III-20): Variation de la teneur en eau des figues mises en couche épaisse $M = f(t)$



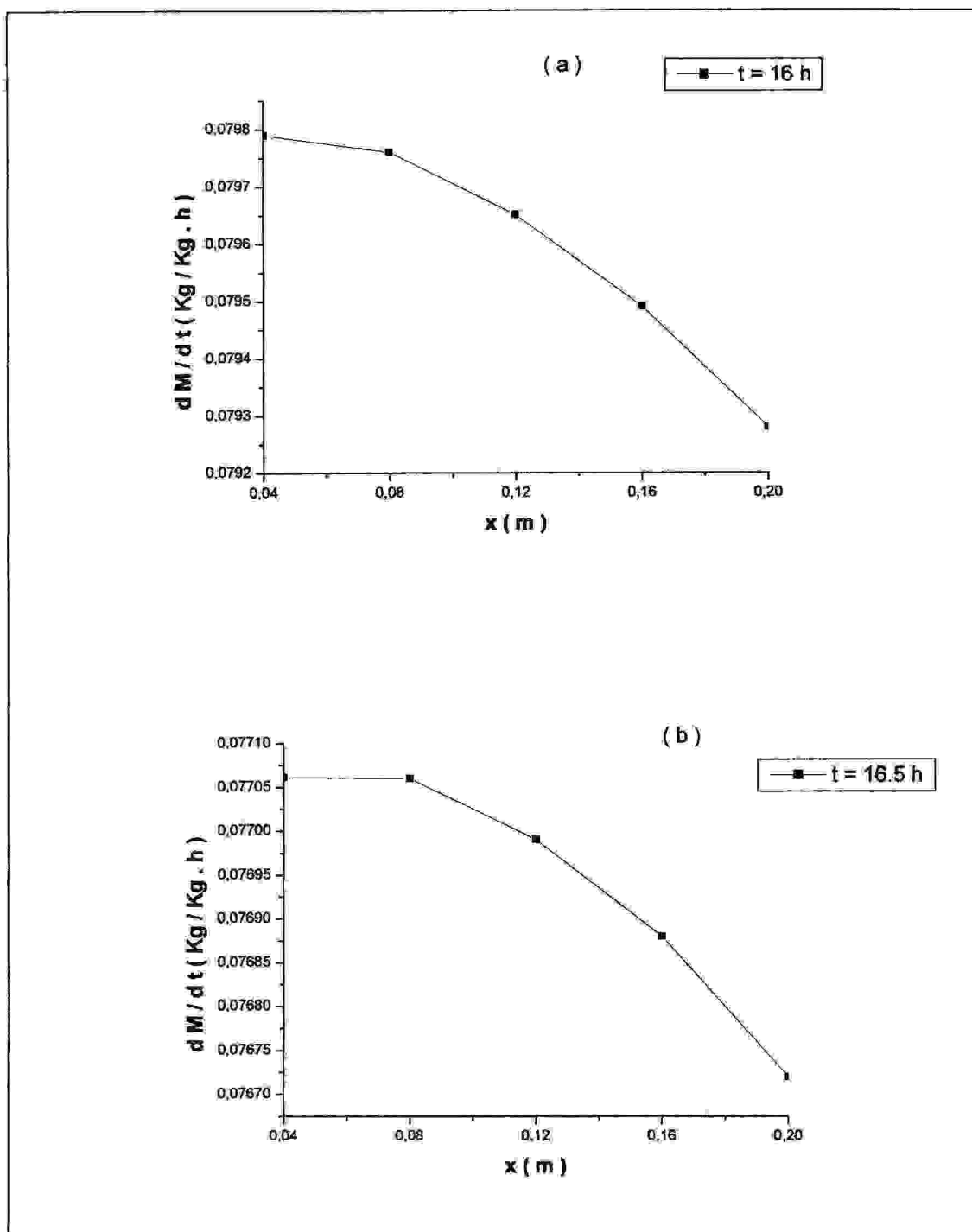
Figures (III-20): Variation de la teneur en eau des figues mises en couche épaisse $M = f(t)$

Tout cela est encore mieux expliqué sur les figures (III-21) qui montrent la variation du taux de séchage des figues en fonction de la hauteur dans l'intervalle de temps (en heures) [16,19], en effet à $t \leq 16 \text{ h}$ le taux de séchage est inversement proportionnel à la hauteur c'est-à-dire que la vitesse de séchage au niveau de la tranche j est supérieure à celle de la tranche $(j+1)$ dans toute la couche épaisse car l'air asséchant s'humidifie de moins en moins suivant la hauteur à cause de sa tendance vers la saturation, mais on remarque à partir de $t = 16.5 \text{ h}$ que l'inverse proportionnalité devient de plus en plus partielle jusqu'à ce que l'on obtienne une proportionnalité totale entre le taux de séchage et la hauteur de la couche épaisse des figues (l'allure de la figure (III-21 (b)) est tout à fait le symétrique de celui de la figure (III-21 (a)) ;

à $t = 16.5 \text{ h}$, la vitesse au niveau $x = 0.80 \text{ m}$ est égale à celle au niveau $x = 0.40 \text{ m}$ car la quantité d'eau à y évaporer est inférieure à celle qui y était présente à la date précédente d'où la décroissance de l'évaporation, autrement dit cette tranche est plus sèche qu'avant ; le même phénomène se reproduit aux dates $t = 17 \text{ h}$, $t = 18 \text{ h}$ et $t = 18.5 \text{ h}$ avec les autres niveaux.

Ce qui est remarquable, aussi, est que lorsque le taux de séchage dans une tranche $(j+1)$ s'égalise avec celui de la tranche j , peut en même temps dépasser sa valeur juste passée en toute croissance : l'air à cet instant et cet endroit est devenu moins saturé grâce au séchage avancé des tranches précédentes.

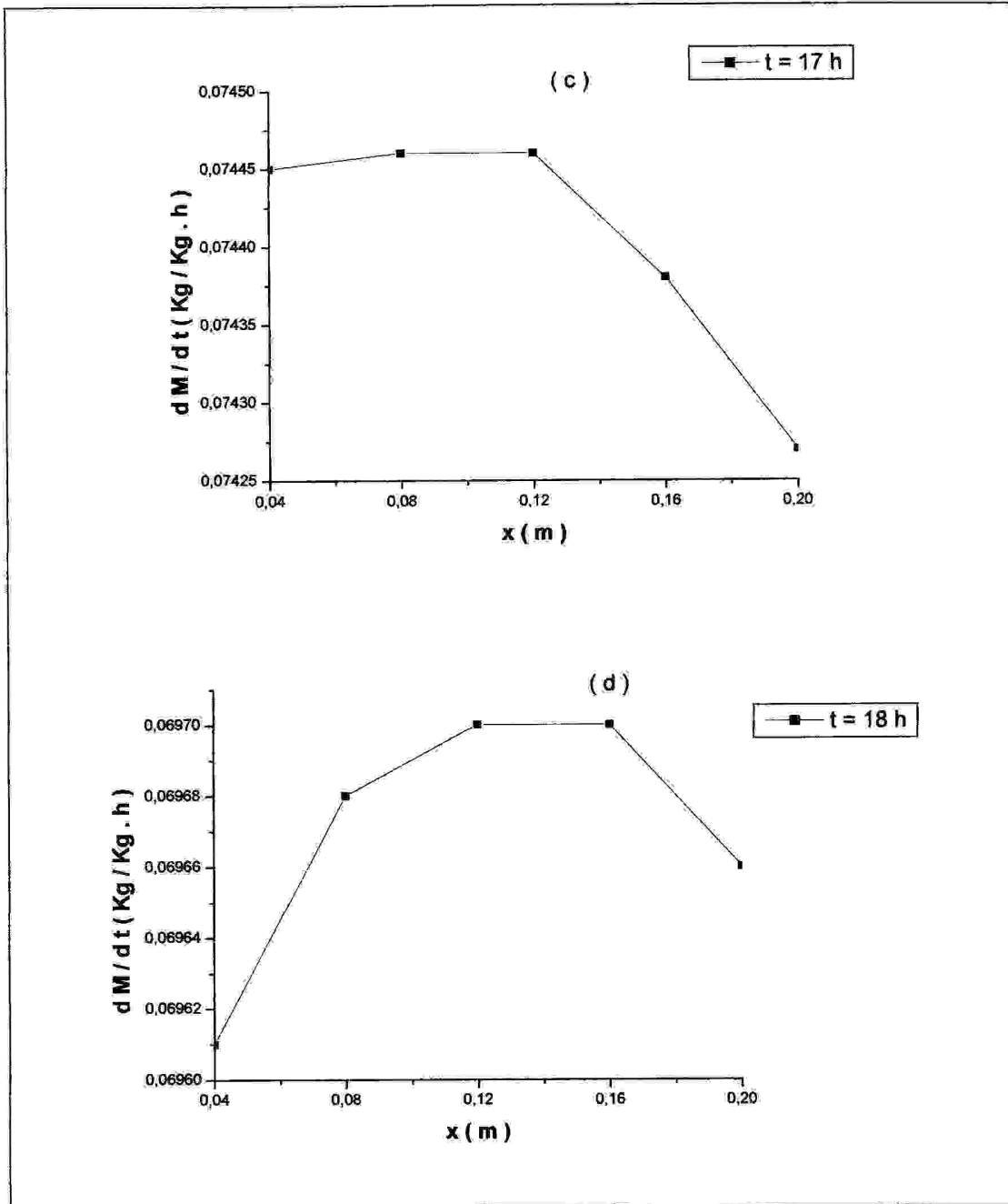
Par conséquent, ces figures au nombre de six montrent bien le déplacement du front de séchage suivant la hauteur de la couche.



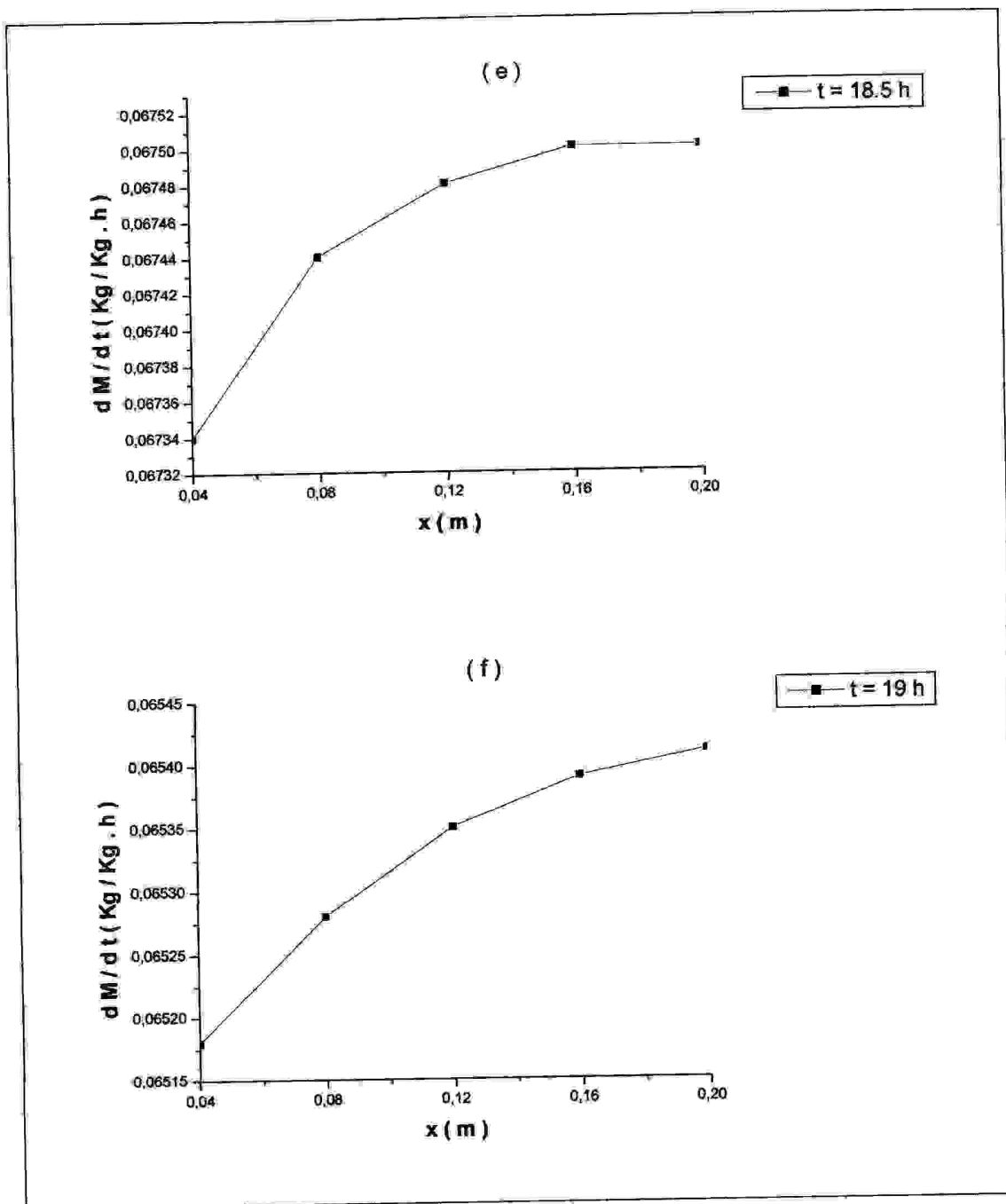
Figures (III-21): Variation du taux de séchage des figes mises en couche épaisse

en fonction de la hauteur $\frac{dM}{dt} = f(x)$

($T_a = 343 \text{ K}$; $v = 0.52 \text{ m/s}$; $\phi = 16 \%$)



Figures (III-21): Variation du taux de séchage des figues mises en couche épaisse en fonction de la hauteur $\frac{dM}{dt} = f(x)$ ($T_a = 343 \text{ K}$; $v = 0.52 \text{ m/s}$; $\varphi = 16 \%$)



Figures (III-21): Variation du taux de séchage des figes mises en couche épaisse

en fonction de la hauteur $\frac{dM}{dt} = f(x)$

($T_a = 343 \text{ K}$; $v = 0.52 \text{ m/s}$; $\varphi = 16 \%$)

La Figure (III-22) confirme bien tout ce qui a précédé sur l'évolution, dans le temps et dans l'espace, de la vitesse de séchage au cours de son processus.

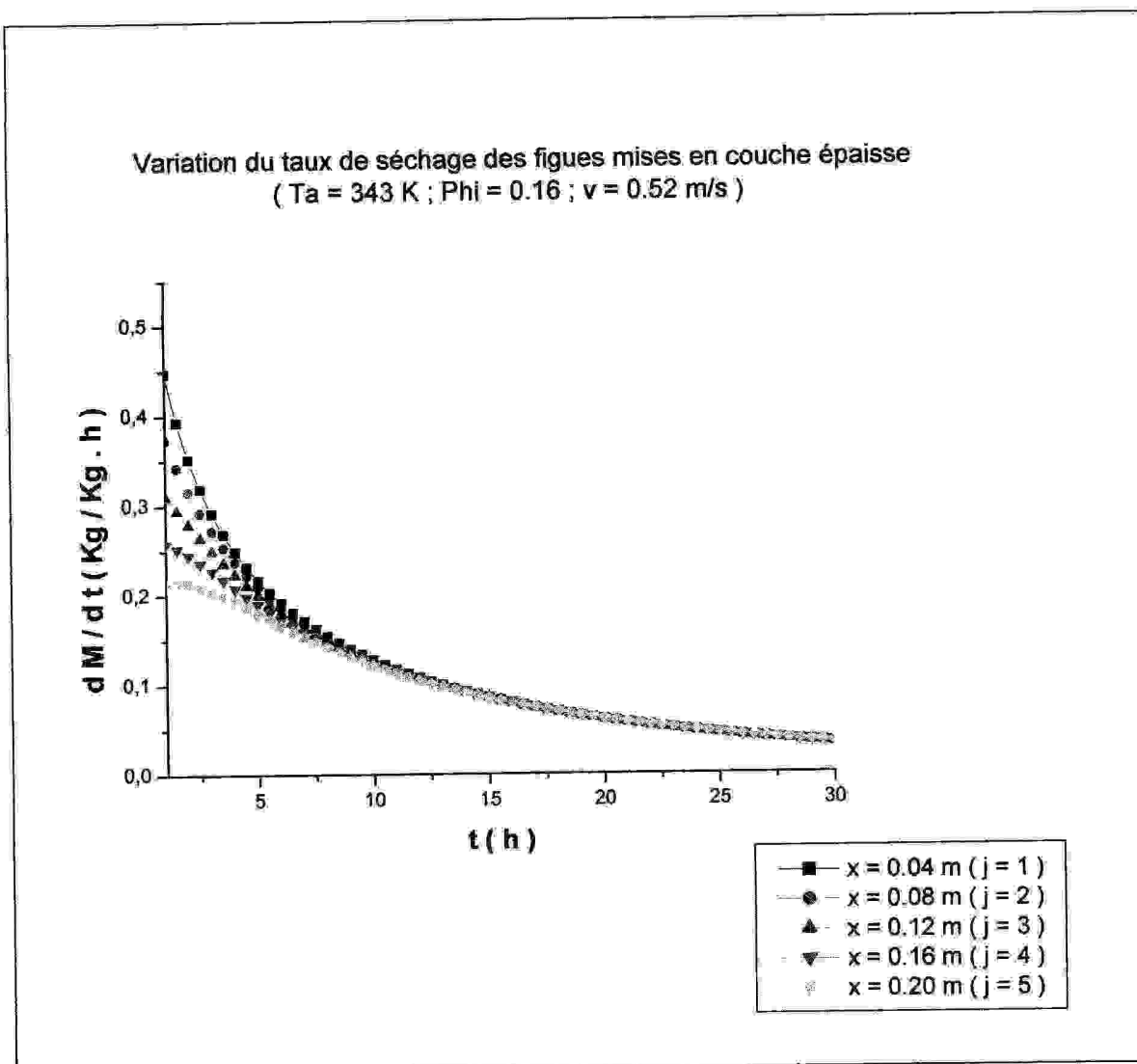


Figure (III-22): Variation du taux de séchage des figues mises en couche épaisse. $\frac{dM}{dt} = f(t)$

III-4-5. EFFET DU RÉTRÉCISSEMENT SUR LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE:

Le rétrécissement (**Shrinkage**) des produits alimentaires est un phénomène physique commun observé pendant différents processus de déshydratation ; des changements affectent la qualité du produit déshydraté et devraient être pris en compte en prévoyant des profils d'humidité et de température du matériel séché. [55]

Plusieurs modèles visés dans les travaux de [55] ont été comparés aux données expérimentales sur le séchage d'air de pomme, de carotte, de pomme de terre et de calmar. Les erreurs relatives moyennes entre les valeurs expérimentales et prévues du rétrécissement trouvées étaient dans la plupart des cas moins de 10 %, mais pour certains matériaux, les modèles qui négligent le changement de porosité tendent à montrer de plus grandes déviations.

Les travaux de [7, 18, 19, 44, 53, 56] prennent en considération le phénomène du rétrécissement.

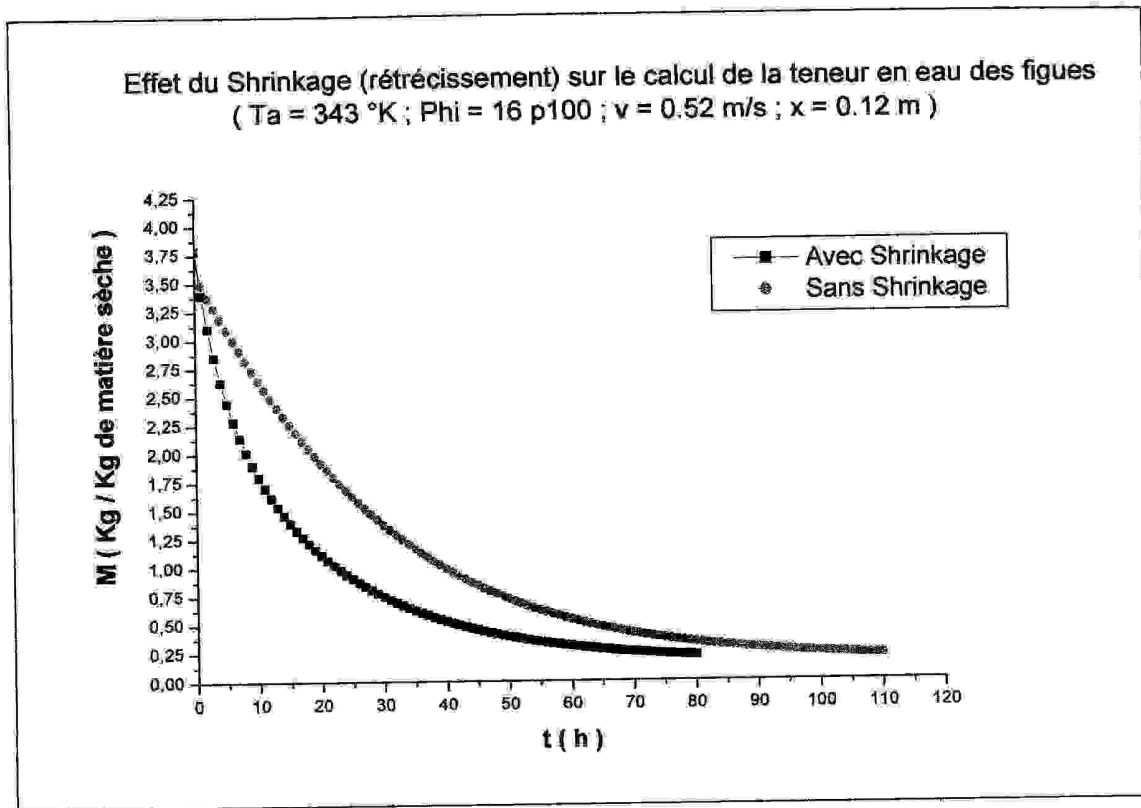


Figure (III-23) : Effet du rétrécissement sur les calculs de la teneur en eau des figues

La Figure (III-23) est une comparaison entre deux calculs qui ont été faits : l'un avec la prise en considération du phénomène de Shrinkage, l'autre sans.

L'importance de l'introduction du Shrinkage est très claire et sa négligence conduit à des résultats incorrects:

À $t = 10 \text{ h}$;

$M = 1.79514 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ (Avec Shrinkage) alors qu'on est à peine à

$M = 2.736 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ (Sans Shrinkage).

À $t = 20 \text{ h}$;

$M = 1.10947 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ (Avec Shrinkage) alors qu'on est à peine à

$M = 1.982 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ (Sans Shrinkage).

M_{eq} est atteint dans 75.5 h (Avec Shrinkage) alors que celui où le Shrinkage est négligé n'est atteint qu'après 110 h , soit alors 34.5 h de différence.

La cause de cette erreur réside au niveau du calcul de la vitesse v de l'air asséchant à travers la couche du produit humide, qui est considérée constante dans le cas (sans Shrinkage) alors qu'elle ne l'est pas en vérité : elle est fonction de la porosité ϵ qui est elle-même fonction du diamètre d_s variable au cours du séchage (voir partie calcul de la vitesse); les Figures (III-24) et (III-25) confirment bien cela en montrant l'effet du rétrécissement sur la porosité, la masse volumique et le diamètre du produit humide.

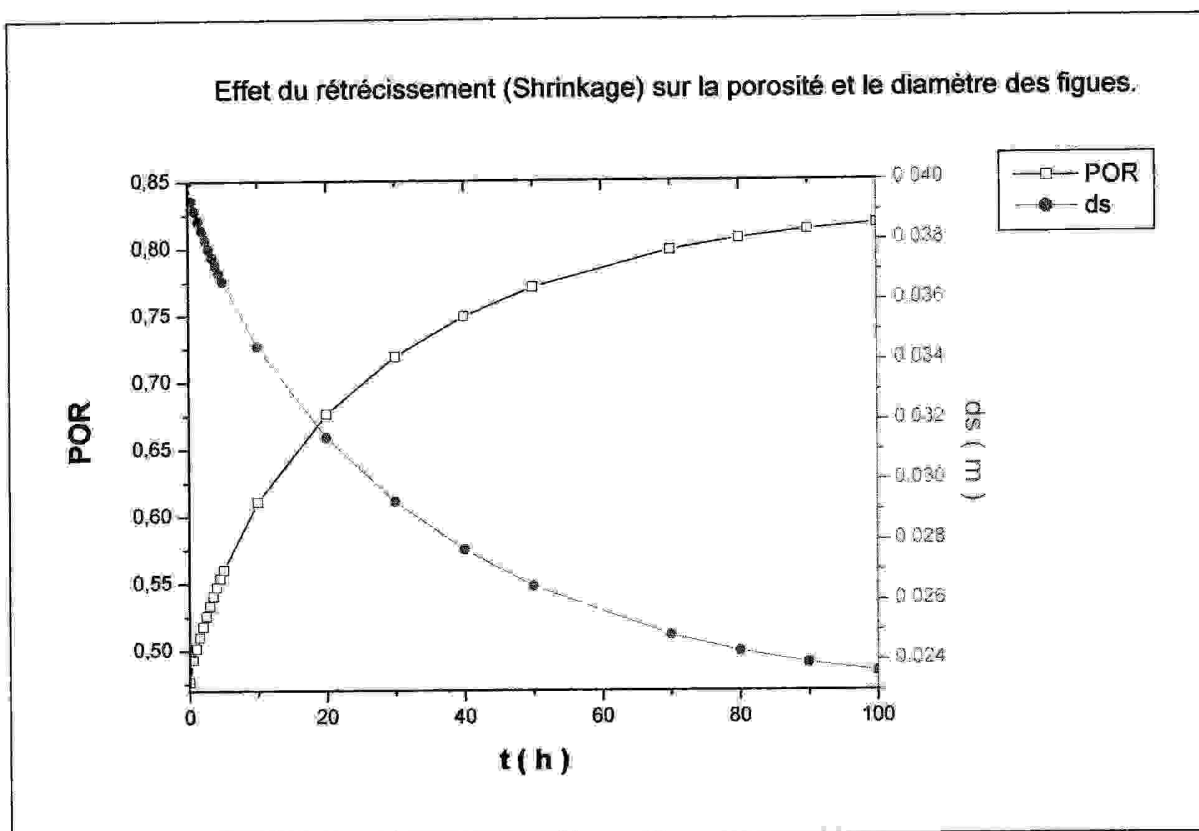


Figure (III-24) : Effet du rétrécissement sur la porosité et le diamètre des figes.

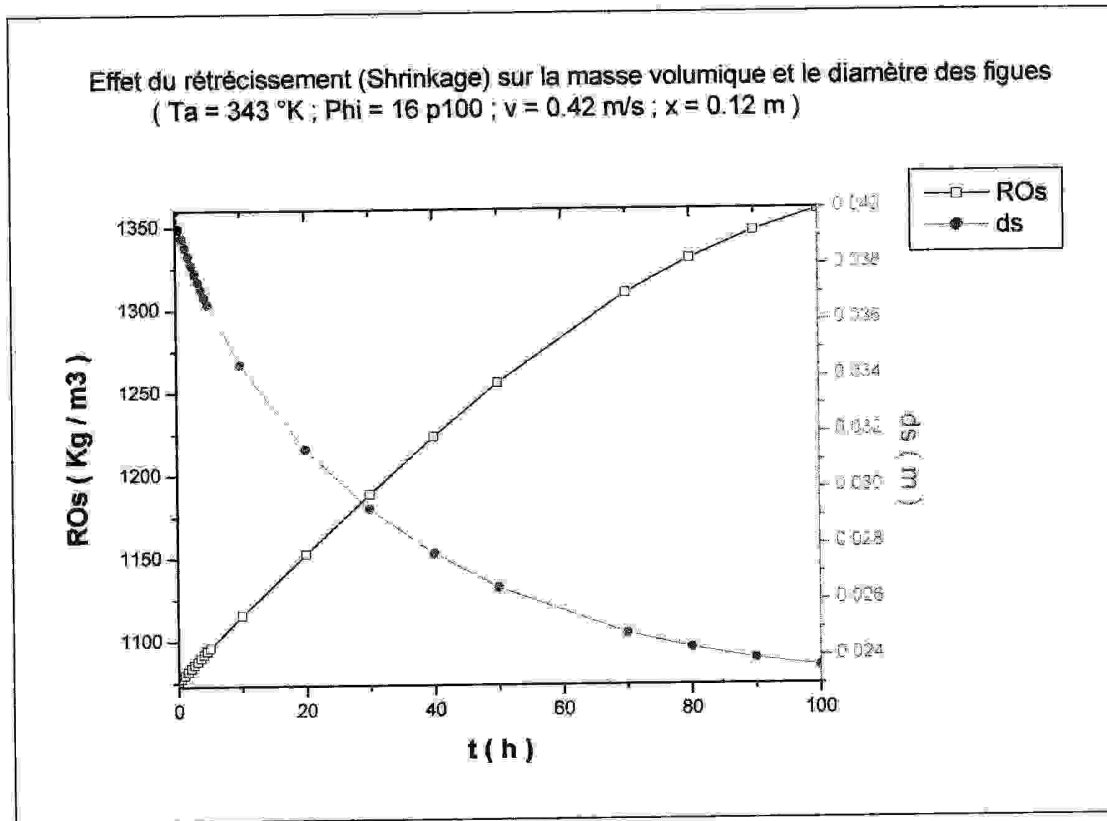


Figure (III-25) : Effet du rétrécissement sur la masse volumique et le diamètre des figues.

Ces constatations sont semblables à celles faites par [19,42]; aussi la courbe de séchage simulée dans les travaux de [54] a été plus précise quand le rétrécissement d'échantillon a été pris en considération.

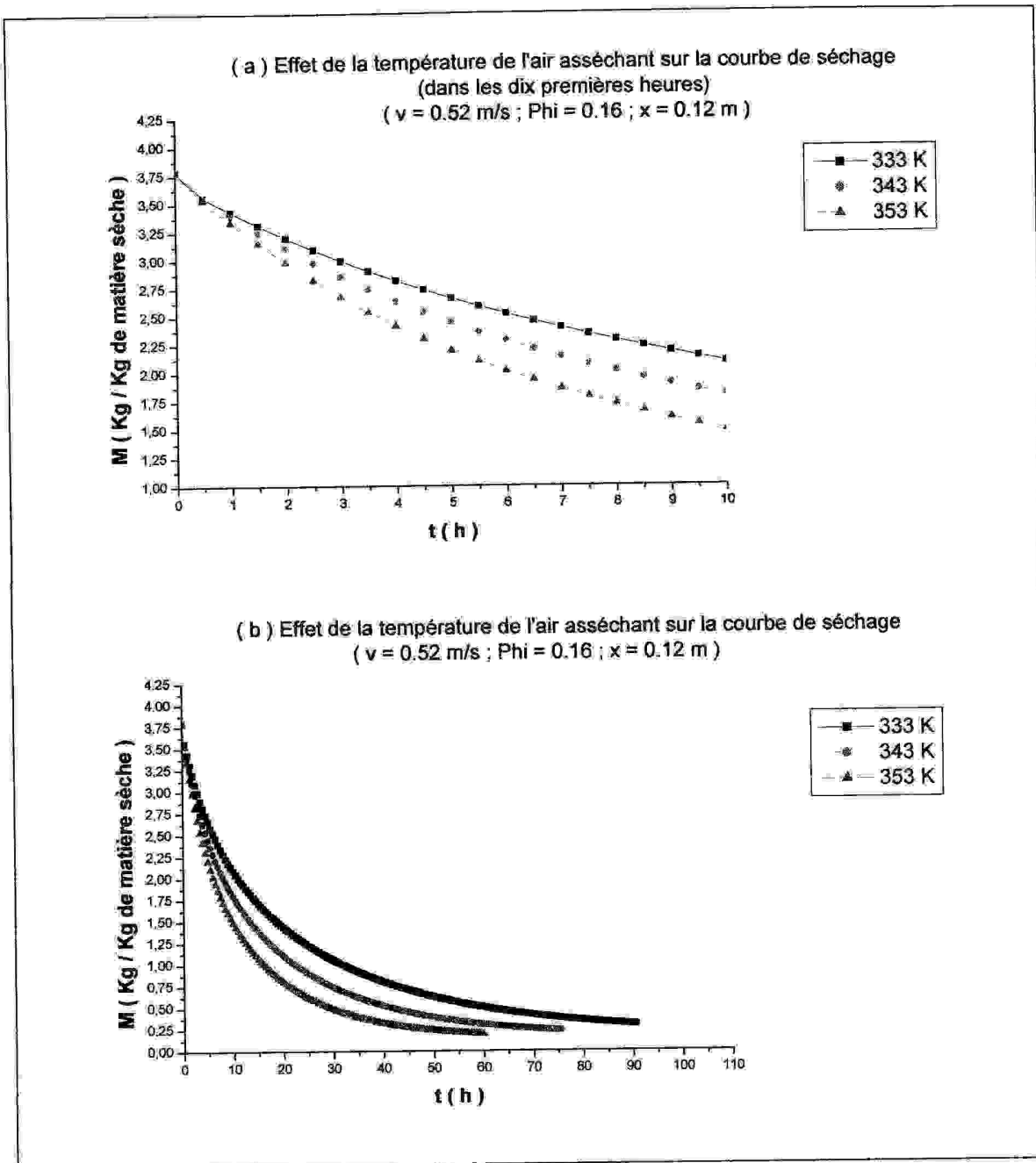
III-4-6. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE:

L'étude paramétrique consiste à faire varier des paramètres et de voir leur influence sur le modèle. L'étude a été faite au milieu de la couche épaisse ($x = 0.12 \text{ m}$, $j = 3$)

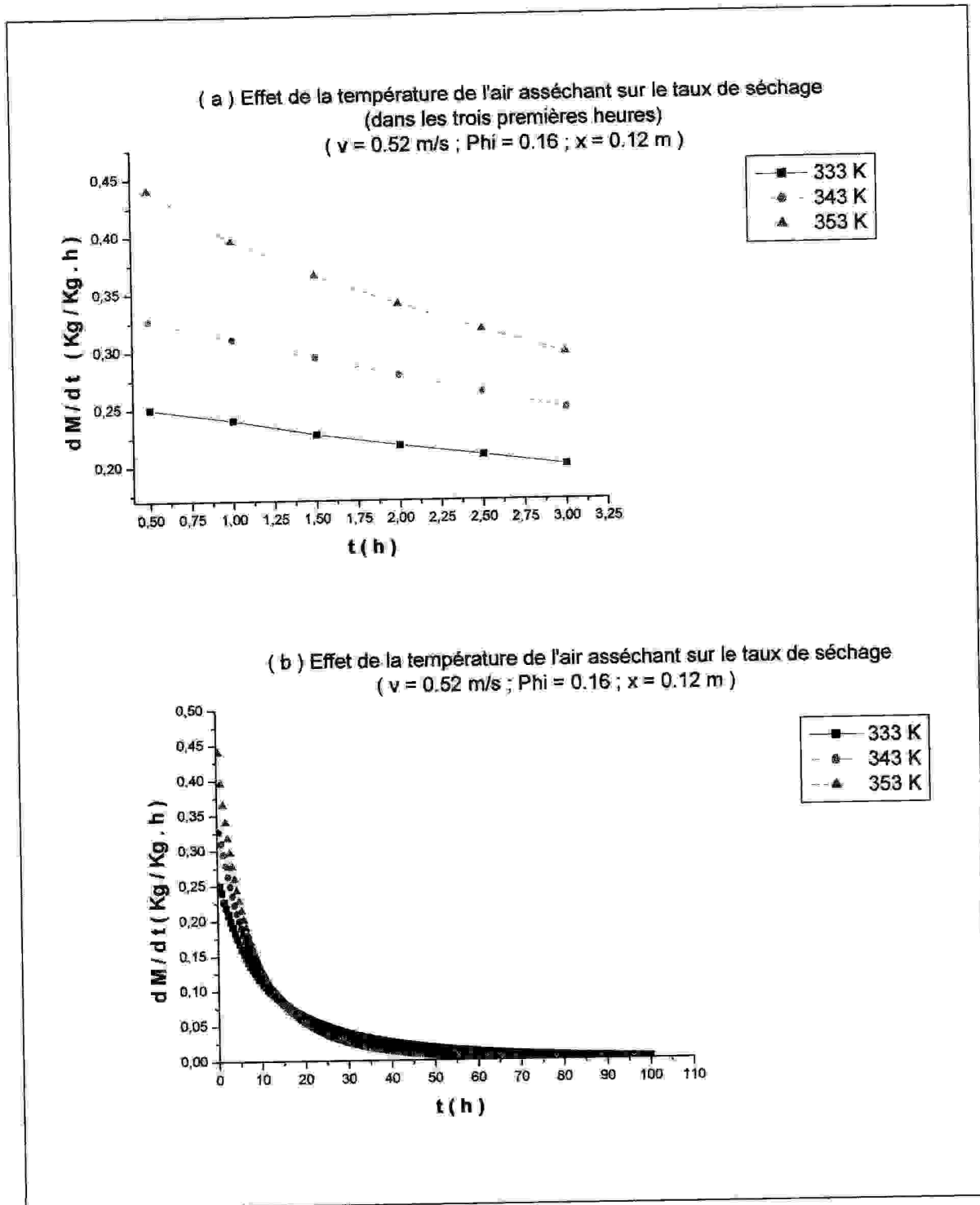
III-4-6-1. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ASSÉCHANT:

Les figures (III-26 (a)) et (III-26 (b)) montrent que la température de l'air asséchant est un paramètre influent dans le séchage, comme c'est le cas d'ailleurs dans les travaux de [17,18,19,24,40,41,42,43,44,47,54,56,57,58] où les résultats sont très similaires. En effet, l'augmentation de ce paramètre donne à l'air plus de pouvoir évaporateur qui est reflété dans le temps de séchage en le rendant plus court, autrement dit, cette augmentation permet de donner plus de chaleur au produit et par conséquent plus d'évaporation d'eau du produit est observée; une confirmation est donnée par la variation temporelle de la vitesse de séchage pour différentes températures de l'air asséchant où elle est proportionnelle à la valeur de la température (Figures (III-27 (a)) et (III-27 (b))), figures très semblables aux Figures (III-13) des travaux de S. J. BABALIS and V. G. BELESSIOTIS (2004) [24] sur les figues.

Sur la Figure (III-26 (b)), le temps de séchage pour $T_a = 333 \text{ K}$ est 90 h alors qu'il est de 60 h pour $T_a = 353 \text{ K}$ et sur la Figure (III-26 (a)), la quantité d'eau évaporée du produit à $t = 2.5 \text{ h}$, par exemple, pour $T_a = 333 \text{ K}$ est de $0.69886 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ alors qu'elle est de $0.96950 \text{ Kg/Kg de matière sèche}$ pour $T_a = 353 \text{ K}$.



Figures (III-26): Effet de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues.



Figures (III-27): Effet de la température de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.

Sur la figure (III-28) la variation de la teneur en eau du produit en montant à travers la couche épaisse pour les trois températures différentes de l'air asséchant (le temps étant fixé), permet de voir l'effet de ce paramètre sur la teneur en eau du produit.

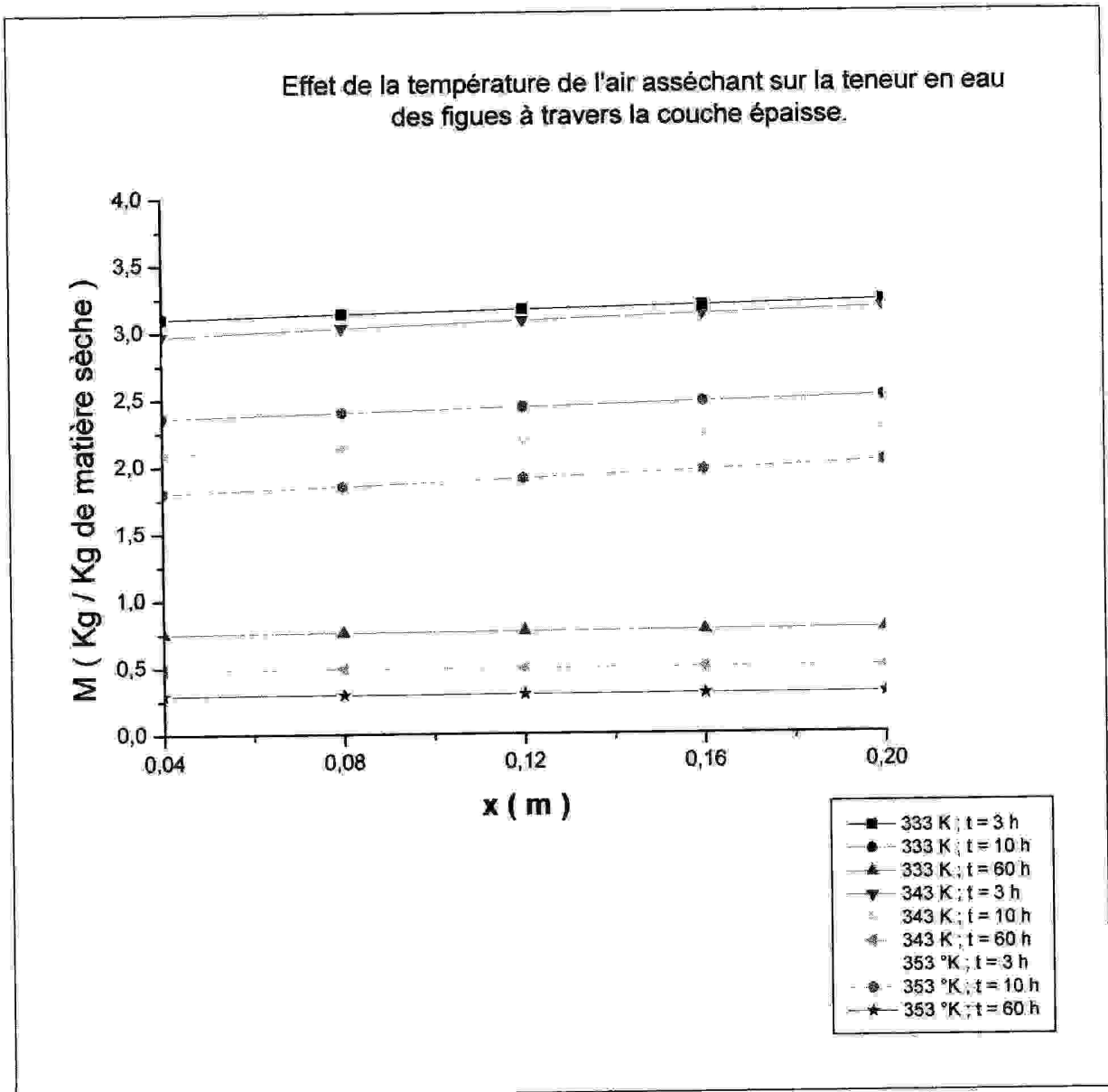


Figure (III-28): Effet de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes à travers la couche épaisse.

	$x = 0.04 \text{ m}$ (j = 1)	$x = 0.08 \text{ m}$ (j = 2)	$x = 0.12 \text{ m}$ (j = 3)	$x = 0.16 \text{ m}$ (j = 4)	$x = 0.20 \text{ m}$ (j = 5)
$T_a = 333 \text{ K}$	0.90028 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.84995 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.797272 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.7472 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.69873 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)
$T_a = 343 \text{ K}$	1.09002 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	1.01751 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.93953 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.86574 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.79636 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)
$T_a = 353 \text{ K}$	1.31558 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	1.22182 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	1.11623 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	1.01471 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)	0.91905 Kg / Kg de matière sèche (éaporée)

(Tab III-1) Quantités d'eau évaporée pour les trois températures utilisées

(t = 3 h ; v = 0.52 m/s ; $\phi = 16 \%$)

Les valeurs du (Tab III-1) et l'allure des courbes de la Figure (III-28) (pentes étant positives) montrent:

D'une part, la proportionnalité de la teneur en eau du produit avec la hauteur (chose déjà vue pour une même température) et l'inverse, bien sur, pour la quantité d'eau évaporée; et d'autre part, l'inverse proportionnalité de M avec la température de l'air asséchant (pour le même temps t et la même hauteur x) mais l'inverse pour la quantité d'eau évaporée.

La chose qui éclaircie l'effet de la température sur la cinétique de séchage est que, pour un T_a plus élevé, l'air prend plus d'humidité d'une hauteur à une autre (en mouvement ascendant dans la couche des figes); aussi, la Figure (III-28) montre bien qu'à la date $t = 60 \text{ h}$, M_{eq} est atteint pour $T_a = 353 \text{ K}$: le pouvoir évaporateur se confirme.

Sur la même figure, l'effet de l'augmentation de la température de l'air asséchant apparaît au début du séchage pour les premières couches qui prennent presque toute l'énergie de l'air asséchant (voir les courbes à $t = 3 \text{ h}$), ensuite l'effet de la température est visible pour les dernières couches (par exemple à $t = 10 \text{ h}$) car les premières couches commencent à prendre moins d'énergie (à cause du taux qui est en train de diminuer) et par conséquent plus d'énergie est cédée cette fois ci aux dernières couches (la Figure (III-28) confirme bien la lecture des figures précédentes).

III-4-6-2.EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT:

Les Figures (III-29 (a)) et (III-29 (b)), représentant l'évolution temporelle de la teneur en eau du produit humide pour plusieurs vitesses de l'air asséchant, montrent bien l'effet de cette dernière sur le transfert de masse au cours du processus de séchage : ce transfert est plus rapide quand la vitesse de l'air asséchant est plus élevée; les Figures (III-30) confirment bien cela en présentant, à leur tour, l'évolution temporelle du taux de séchage pour plusieurs vitesses de l'air asséchant.

La proportionnalité de la vitesse de l'air asséchant et celle du séchage peuvent s'expliquer par l'augmentation du nombre de Reynolds et par conséquent l'importance des échanges convectifs qui provoquent l'augmentation de l'évaporation d'humidité.

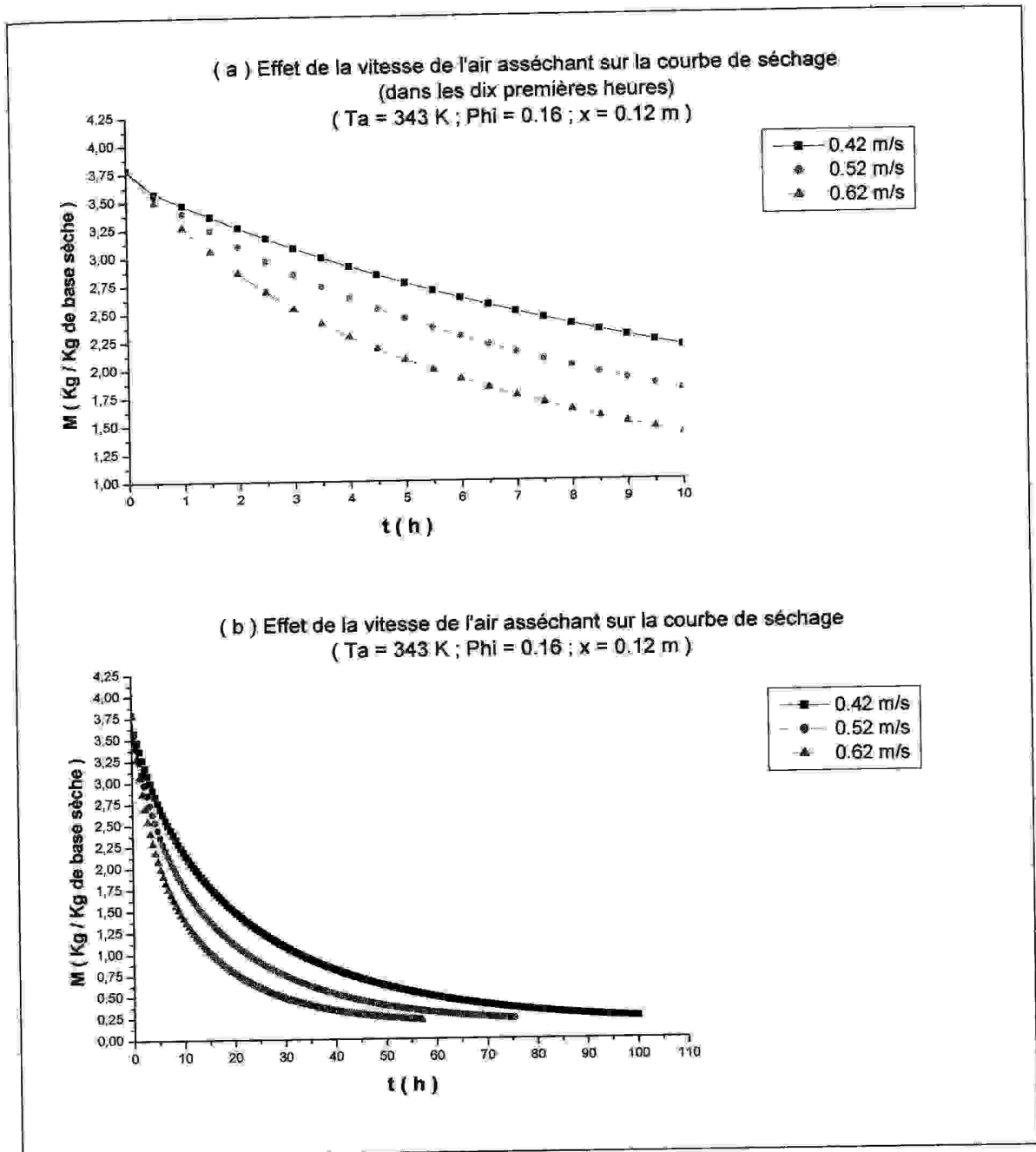
La Figure (III-31) représente la variation de la teneur en eau du produit en montant à travers la couche épaisse pour trois vitesses différents de l'air asséchant (le temps étant fixé), ce qui permet de voir encore mieux l'effet de ce paramètre sur la teneur en eau du produit.

Contrairement à la température, sur la Figure (III-31), l'effet de la vitesse de l'air asséchant apparaît au début du séchage même pour les dernières couches.

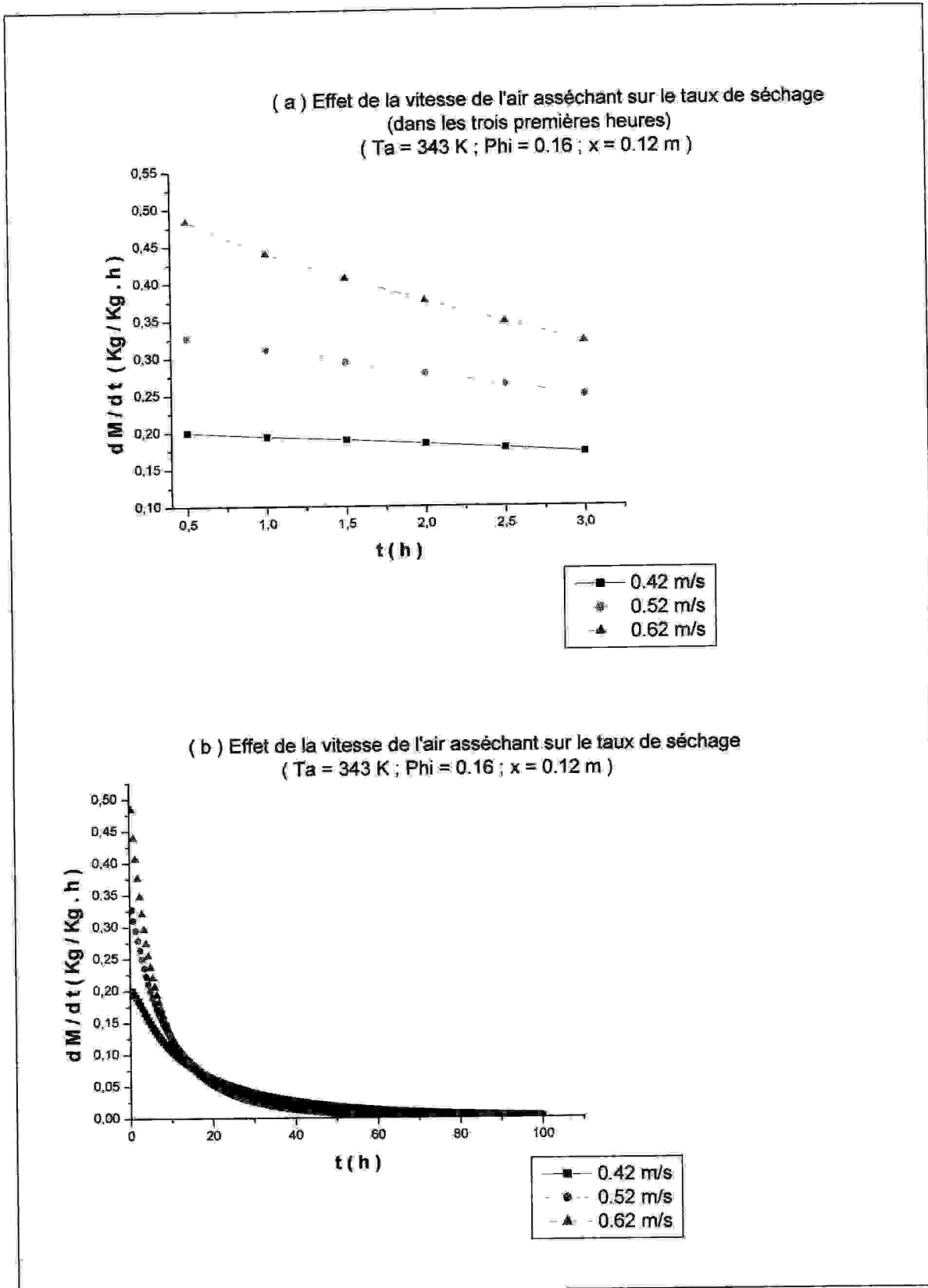
Sur la figure (III-30 (a)) l'influence de la vitesse de l'air asséchant est significative au début du séchage ($t = 0.5 \text{ h}$), avec un taux de séchage de 0.484 Kg/Kg.h pour la courbe de 0.62 m/s , plus de deux fois et demi la valeur correspondante pour 0.42 m/s , impliquant que le processus d'évaporation a eu lieu sur la surface et, pour cette fin, plus directement a été affecté par la vitesse.

Plus tard la prédominance de la variation de vitesse d'air sur le taux de séchage est devenue moins importante (à $t = 10 \text{ h}$ la courbe de 0.62 m/s coïncide avec celle de 0.52 m/s): ceci est très visible sur la Figure (III-30 (c)) et les dernières courbes de la Figure (III-31) pour $t = 60 \text{ h}$ sont très rapprochées surtout celles de 0.52 m/s et 0.62 m/s : On peut dire que la vitesse de l'air asséchant n'est pas un paramètre aussi influent que sa température.

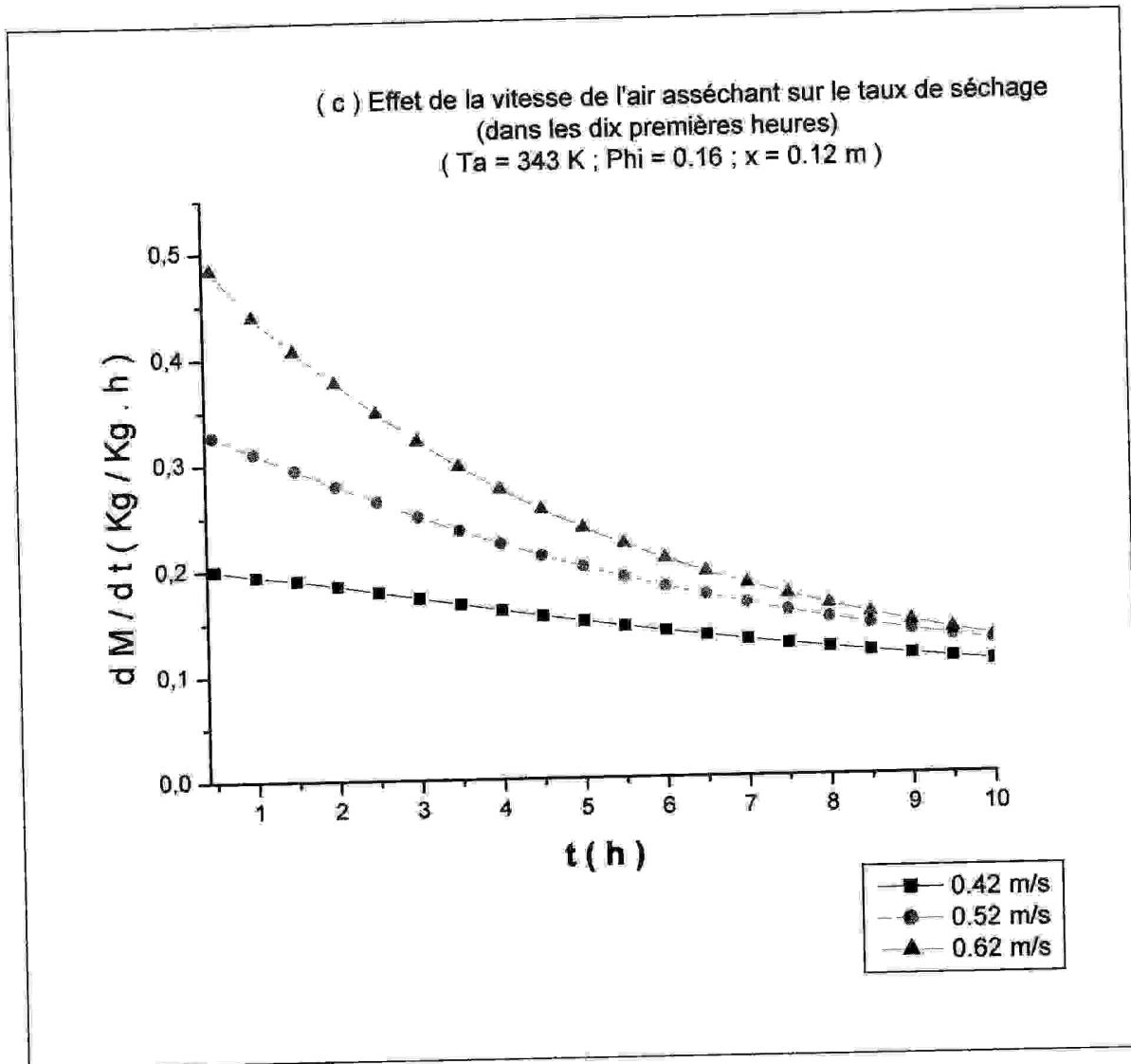
Ce résultat est en très bonne concordance avec les résultats des travaux de [17, 19, 24, 37, 40, 43, 44, 45, 47,50].



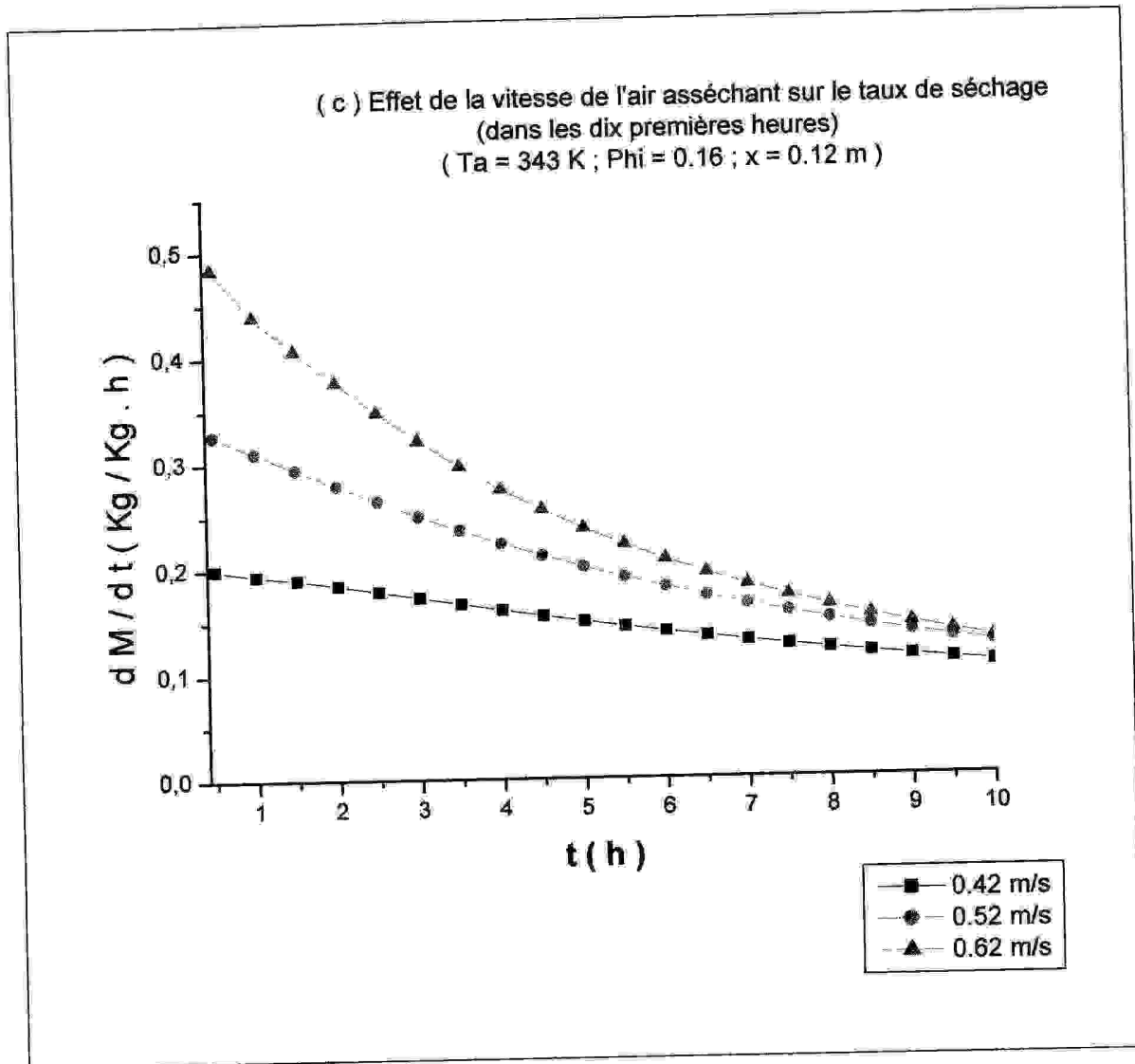
Figures (III-29): Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes.



Figures (III-30): Effet de la vitesse de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.



Figures (III-30): Effet de la vitesse de l'air asséchant sur le taux de séchage des figes.



Figures (III-30): Effet de la vitesse de l'air asséchant sur le taux de séchage des figes.

Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues à travers la couche épaisse pour trois temps différents.

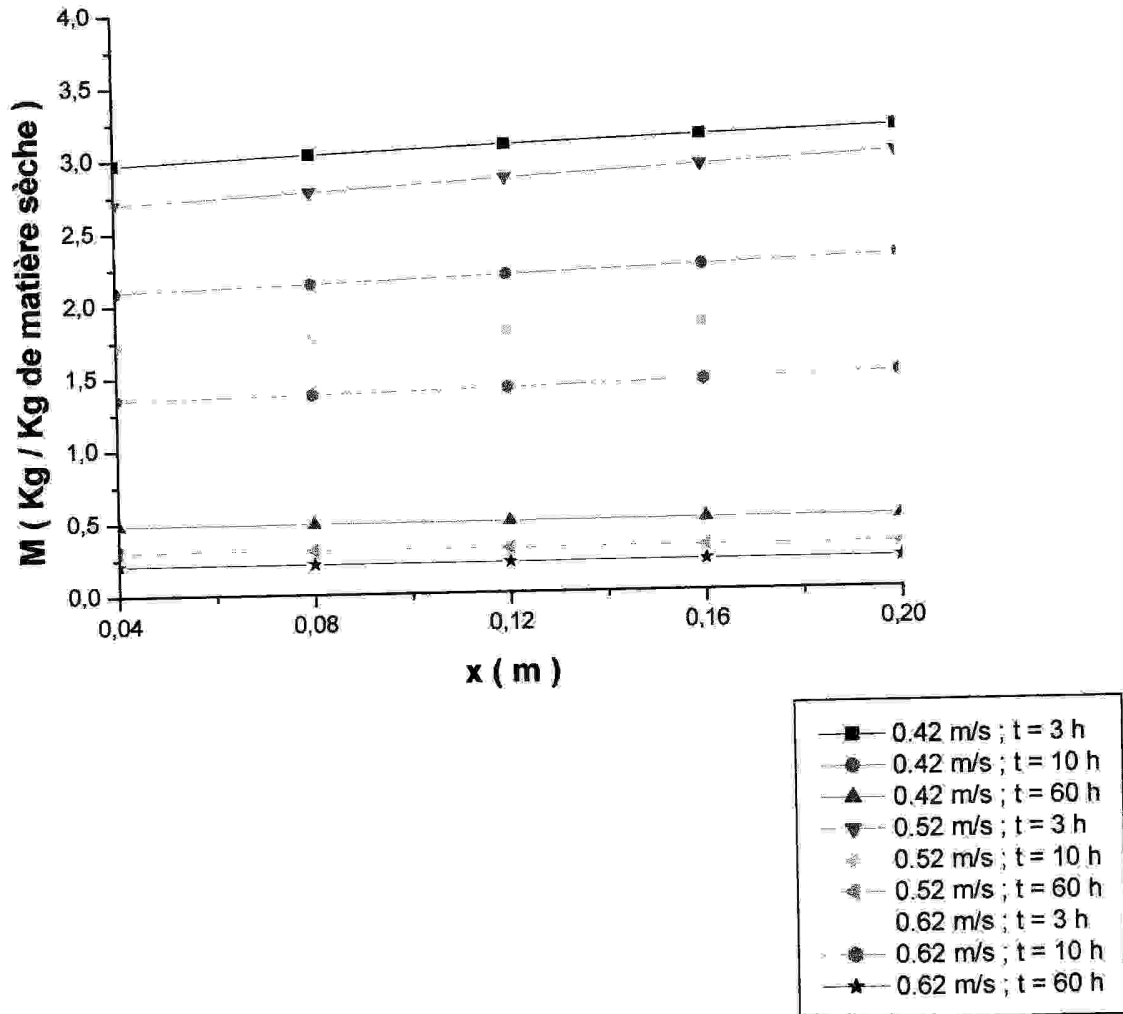
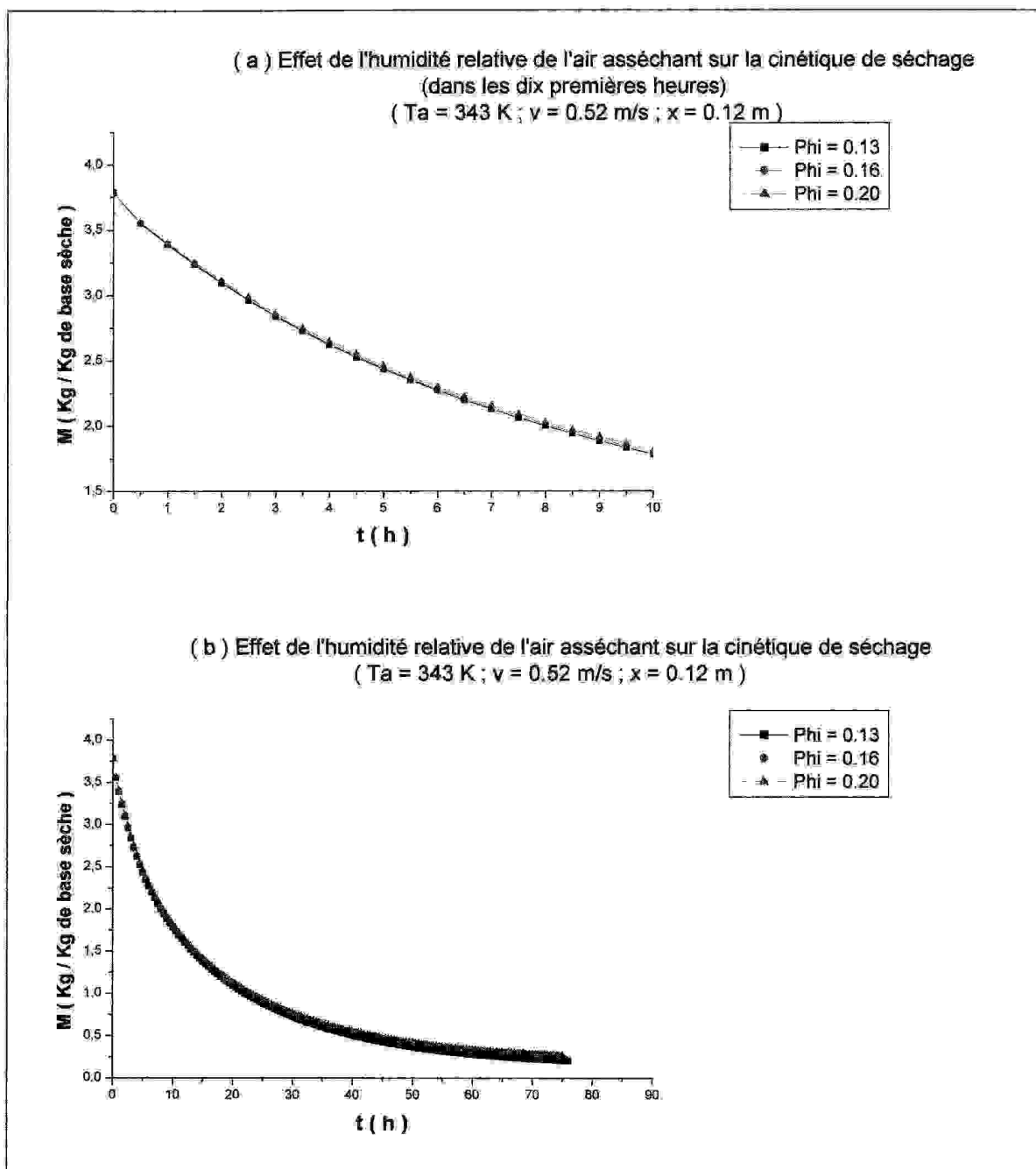
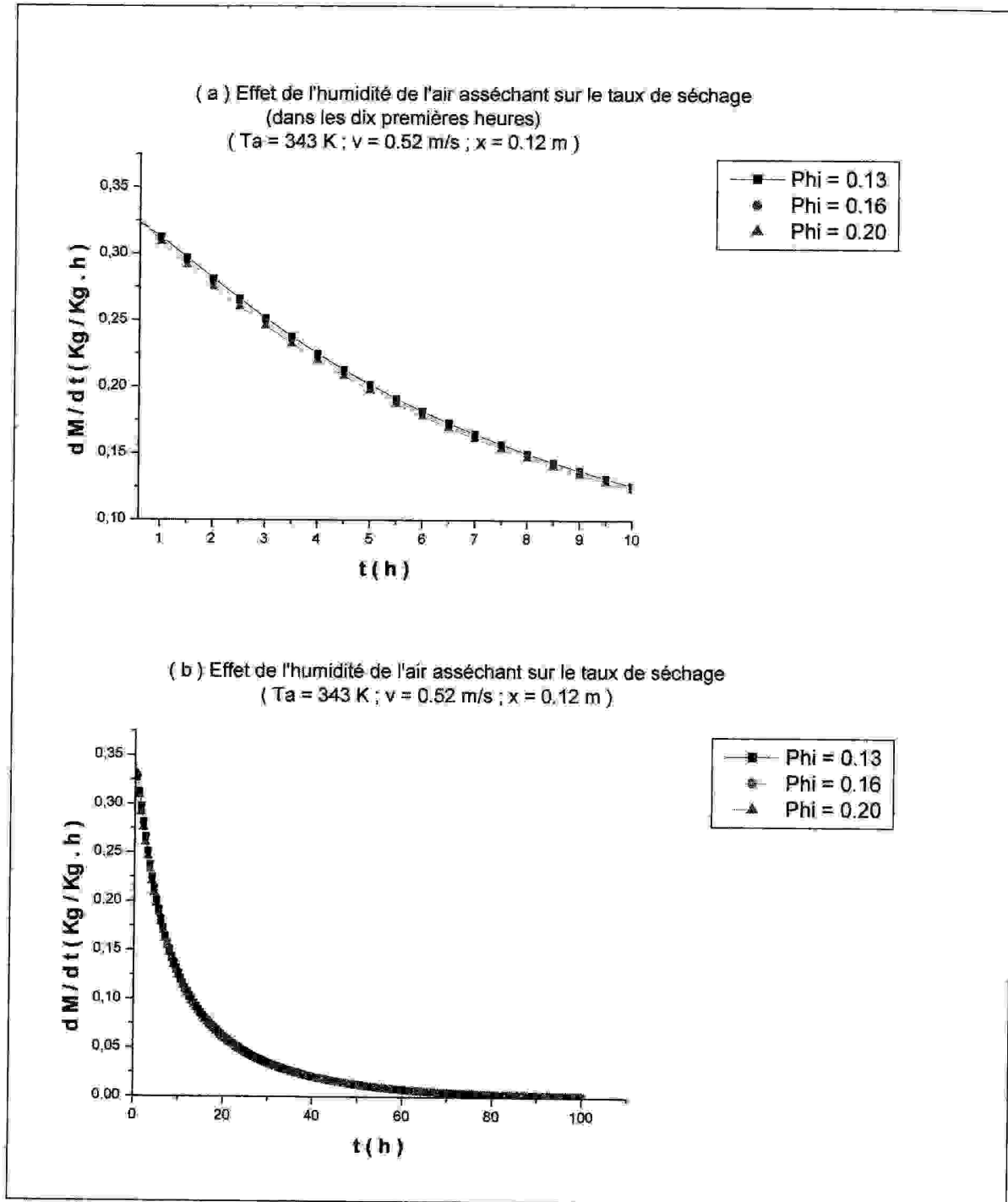


Figure (III-31): Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues à travers la couche épaisse pour trois temps différents.

III-4-6-3.EFFET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR ASSÉCHANT:



Figures (III-32): Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes.



Figures (III-33): Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.

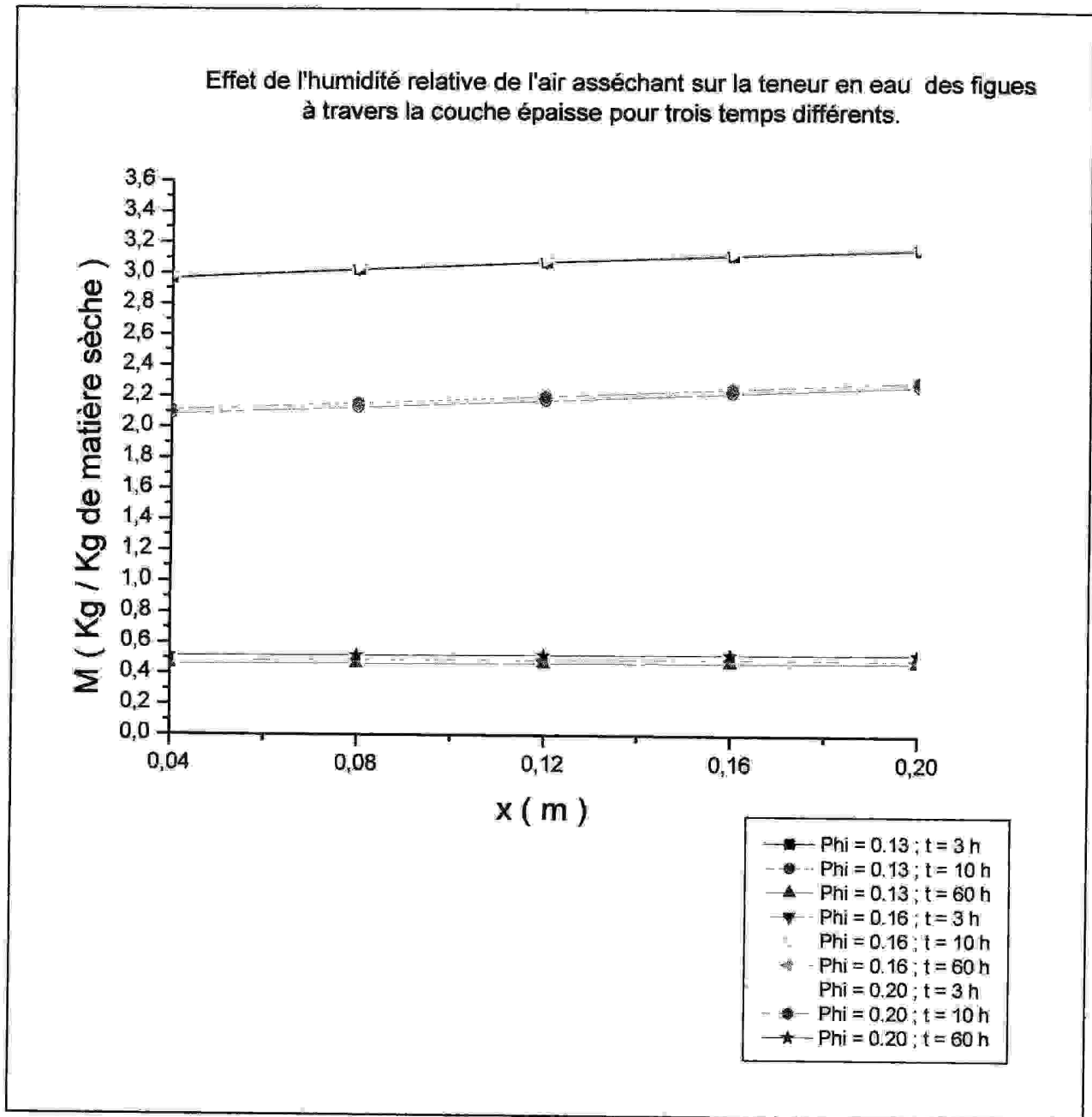


Figure (III-34): Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes à travers la couche épaisse pour trois temps différents.

D'après les figures (III-32), (III-33) et (III-34), l'effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la cinétique est négligeable (les courbes tracées sont quasiment superposées) : le contenu d'humidité à l'équilibre M_{eq} est atteint dans un même intervalle de temps pour les trois humidités relatives de l'air.

Ce résultat obtenu est en bonne concordance avec la simulation de [47] et les remarques de [19].

A noter que, dans les travaux effectués sur le séchage, l'effet de l'humidité relative de l'air asséchant est, généralement, négligé [60].

III-4-6-4.CONCLUSION:

L'étude de la cinétique du produit choisi dans ce mémoire, a permis d'arriver à des résultats similaires à ceux trouvés par plusieurs travaux antérieurs sur les fruits et légumes en particulier les figues.

Parmi ces résultats : l'absence de la phase constante de séchage, processus qui s'est déroulé dans la période de chute de taux (une phrase qui s'est répétée plusieurs fois pendant l'étude de la cinétique dans § III-2.);

un autre résultat : l'importance de la prise en considération du phénomène de Shrinkage lors de l'étude du séchage ;

et enfin les résultats de l'étude paramétrique qui a mis en évidence l'effet du changement des conditions extérieures à savoir : la température , la vitesse et l'humidité relative, en effet par l'augmentation du premier paramètre , augmentent les quantités d'eau à évaporer dans le produit humide surtout pour les premières couches , tan disque l'augmentation de la vitesse est apparemment bénéfique pour les dernières couches même au début du séchage ; il serait peut être préférable de jouer sur ce paramètre pour des couches plus épaisses.

mais à $t = 10\text{ h}$, la courbe de 0.62 m/s coïncide avec celle de 0.52 m/s : ce qui a permis de constater que la vitesse de l'air est un paramètre peu influent en le comparant à la température.

Pour l'humidité relative, elle reste un paramètre sans effet : résultat trouvé dans plusieurs travaux antérieurs.



CHAPITRE IV

IV - ÉTUDE DU SÉCHAGE DE LA COUCHE ÉPAISSE

IV-1. PARAMÈTRES DE L'AIR ET CEUX DU PRODUIT:

Les résultats présentés sont simulés sous les conditions suivantes :

La température de l'air asséchant à l'entrée du séchoir est de **343 K**, son humidité relative initiale est de **16 %** d'où une humidité absolue égale à la valeur **0.03141 Kg/Kg d'air sec** et sa vitesse est de **0.42 m/s**.

Les figues sont considérées comme des sphères dont le diamètre initial est de **0.04 m** et dont la teneur en eau et la température initiales sont égales, respectivement, à **3.7869794 Kg/Kg de matière sèche** et **311.5 K**.

Les Figures (IV-1 (a)) et (IV-1 (b)), représentant la variation temporelle de l'humidité de l'air asséchant à travers la couche des figues, montrent bien que cette humidité augmente avec le temps, à cause de son accumulation d'une hauteur à une autre, mais d'une manière uniformément variée (le gradient d'humidité n'est pas constant).

Sur la Figure (IV-1 (a)), à **t = 0.5 h** apparaît déjà l'importance de l'humidité de l'air pour les premières couches alors qu'elle est presque nulle pour la dernière, car l'énergie apportée par l'air est consommée par les premières.

Pour toutes les couches, exceptée la première, une décroissance commençant dès **t = 2.5 h** est observée, mais qui est différente d'une couche à une autre de façon à ce que la décroissance de la couche **j** soit moins importante que celle de la couche (**j+1**), cela est dû, probablement, à la quantité d'eau évaporée qui est plus importante pour les premières couches (voir résultats de la cinétique) et c'est ce qui rend l'air plus humide alors il prend l'humidité de moins en moins en hauteur.

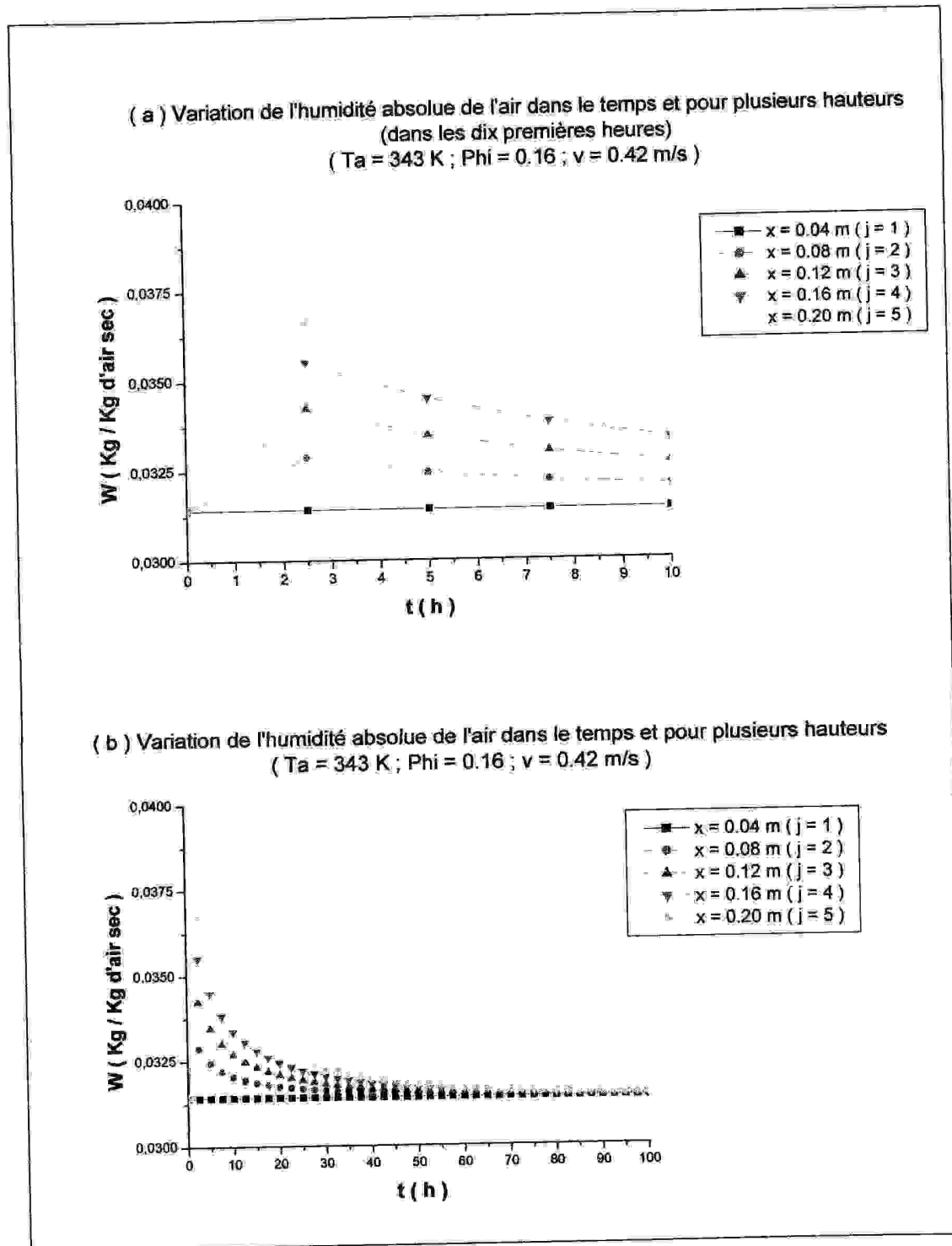
La décroissance au niveau de la dernière couche (**j = 5**) n'est pas due à la quantité d'eau évaporée (comme c'est le cas pour la deuxième couche par exemple) mais plutôt à la diminution de celle accumulée par le séchage des couches précédentes (cette couche est en train de sécher moins rapidement).

Les Figures (IV-2 (a)) et (IV-2 (b)), représentant l'évolution temporelle de l'humidité absolue de l'air au milieu et à la sortie du séchoir, montrent que le maximum d'humidité est atteint à $t = 2.5$ h pour les deux courbes, juste avant la décroissance.

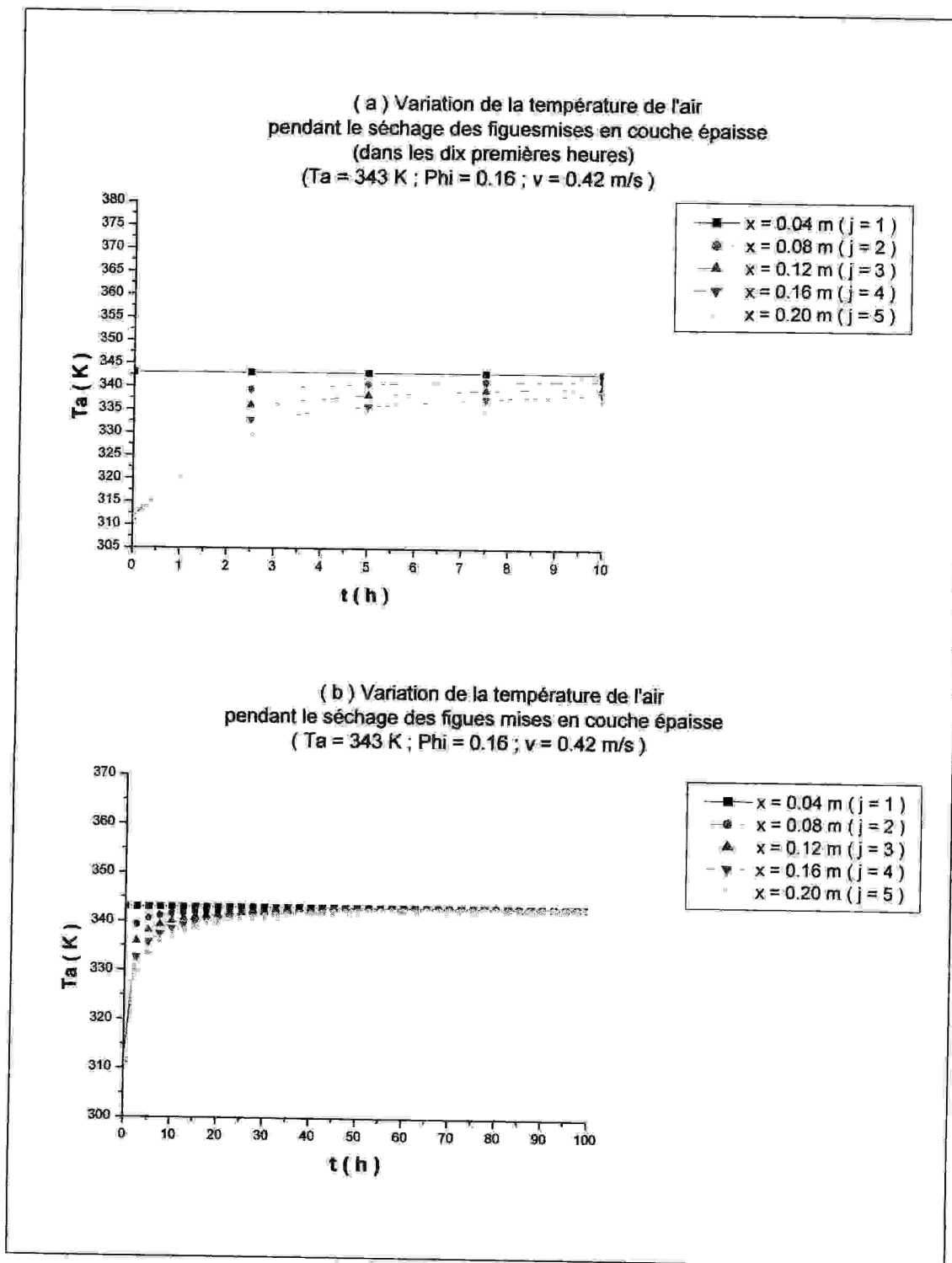
Les Figures (IV-3 (a)) et (IV-3 (b)) montrent, aussi, que la température de l'air augmente dans le temps, ce qui permet de dire que l'énergie acquise ne sert pas uniquement à l'évaporation de l'eau du produit (figures).

La Figure (IV-3 (a)) confirme toutes les constatations précédentes, en effet à $t = 2.5$ h la température de l'air augmente de 27.82 K pour la deuxième couche alors qu'elle n'augmente que de 18.25 K pour la dernière (c'est plus qu'une fois et demi plus grand), l'augmentation pour la troisième couche est de 24.4 K quant à la quatrième, elle est de 21 K, donc une autre fois, la consommation de l'énergie est beaucoup plus importante pour les premières couches.

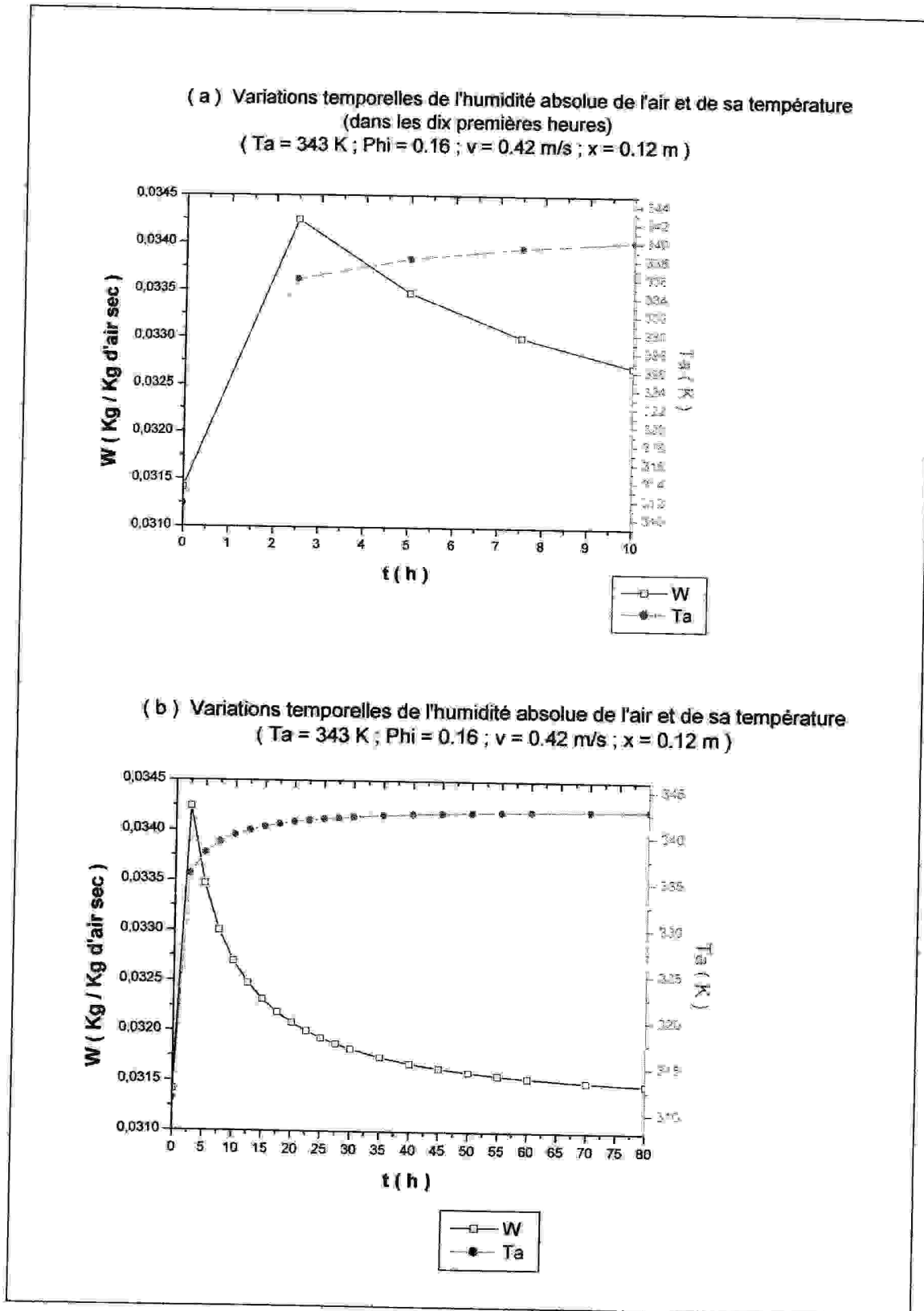
L'augmentation de l'humidité absolue de l'air est maximale à la fin des 150 premières minutes du séchage, ainsi que celle de sa température (voir Figures (IV-4 (a)) et (IV-4 (b))).



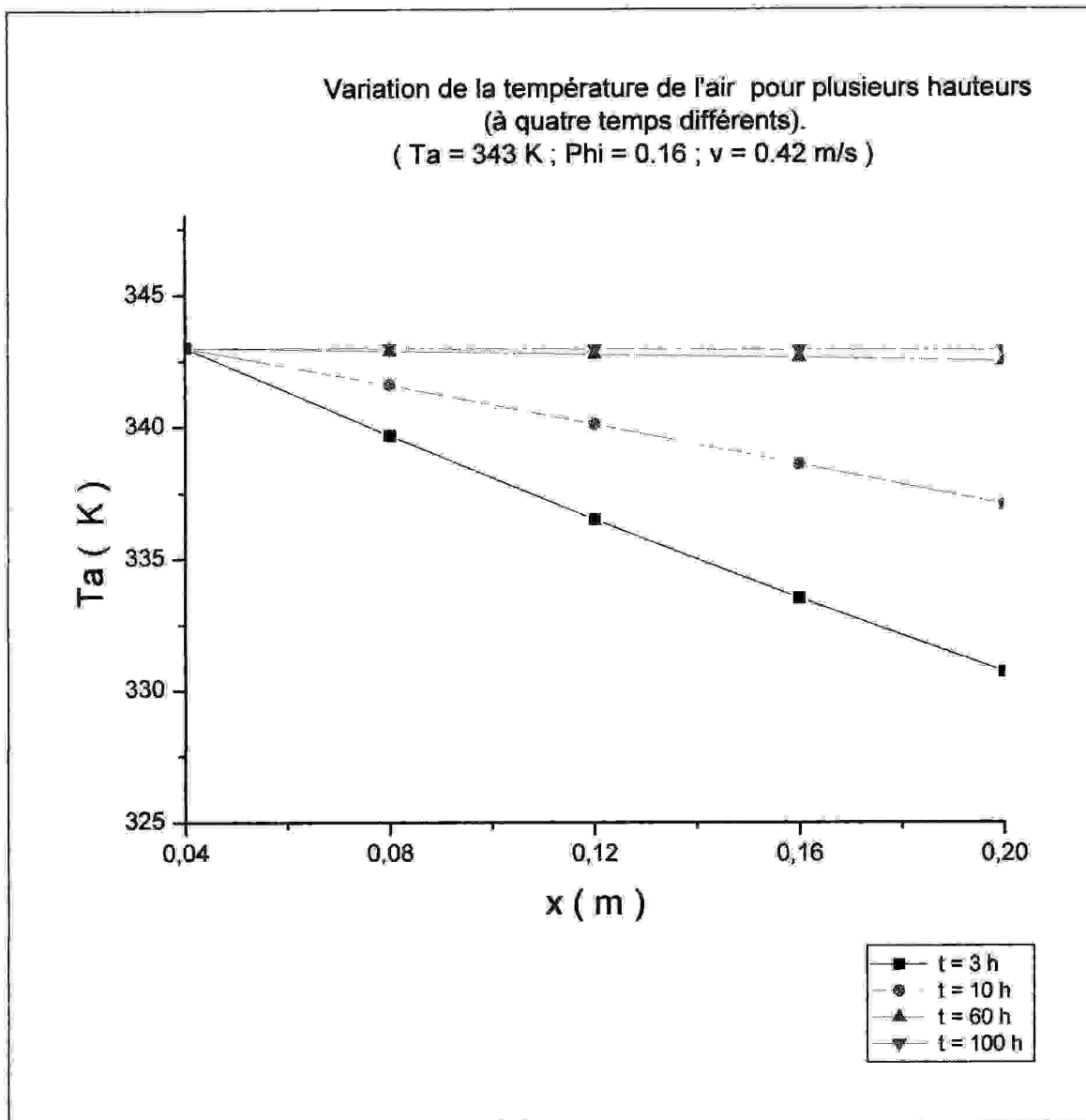
Figures (IV-1) : Variation de l'humidité absolue de l'air dans le temps et pour plusieurs hauteurs.



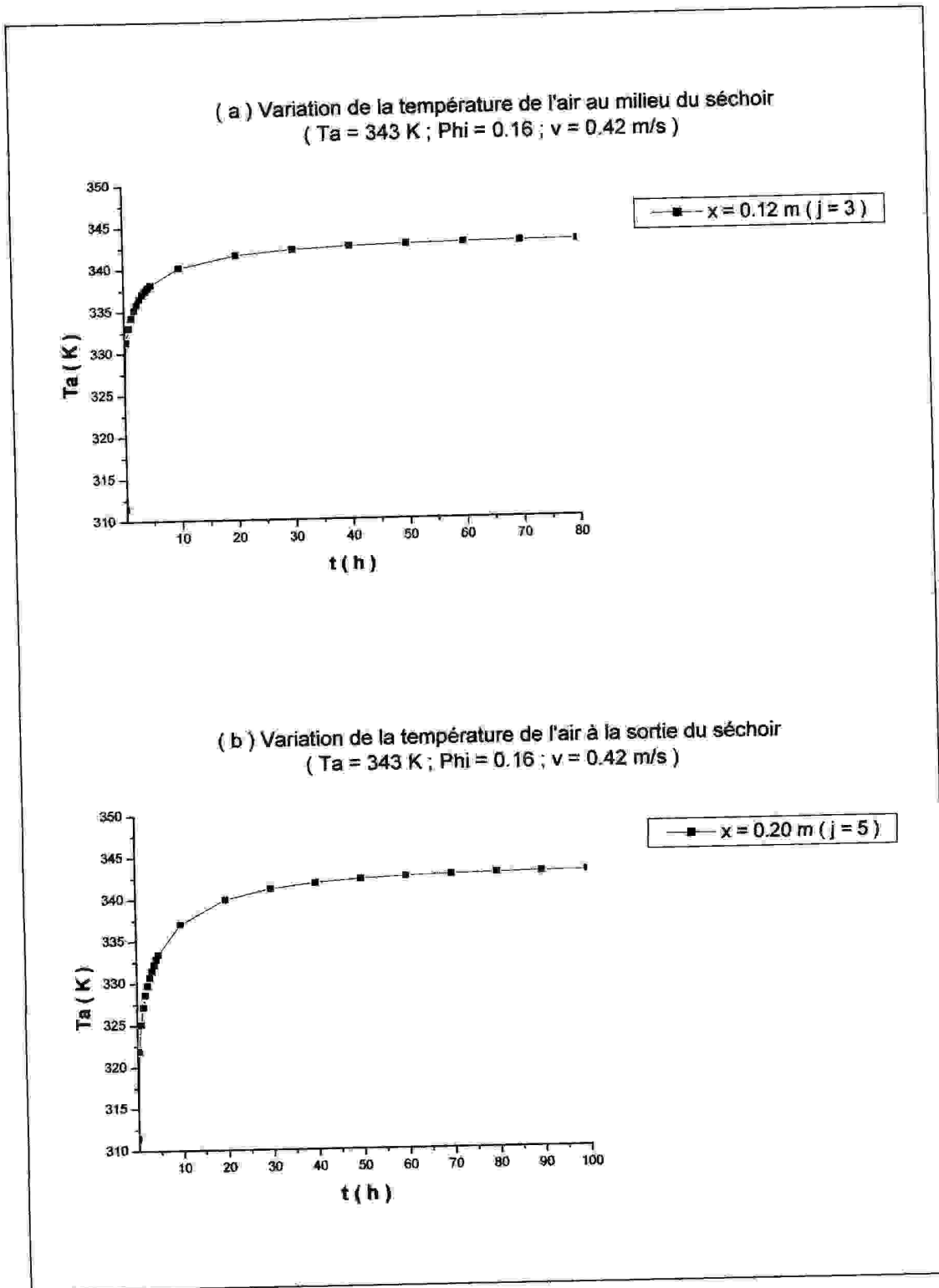
Figures (IV-3) : Variation de la température de l'air dans le temps et pour plusieurs hauteurs.



Figures (IV-4) : Variations temporelles de l'humidité absolue de l'air et de sa température.



**Figure (IV-5) : Variation de la température de l'air pour plusieurs hauteurs.
(À quatre temps différents)**



Figures (IV-6): Variation de la température de l'air dans le temps, au milieu et à la sortie du séchoir.

Les Figures (IV-3 (a)) et (IV-3 (b)) montrent que la température de l'air augmente continuellement avec le temps jusqu'à atteindre la température de l'air asséchant et la Figure (IV-5) montre qu'elle diminue avec la hauteur à cause de la consommation de l'énergie apportée par les premières couches du produit : Les premières couches à sécher sont les premières à atteindre cette température, c'est encore plus clair sur les Figures (IV-3(a)) et (IV-3(b)).

Les Figures (IV-6 (a)) et (IV-6 (b)), représentant l'évolution temporelle de la température de l'air au milieu du séchoir ($j = 3$) et à sa sortie ($j = 5$), montrent bien que l'équilibre thermique est atteint au milieu bien avant la sortie.

(Le gradient de température entre le milieu et la sortie diminue au cours du temps car il y a moins d'évaporation).

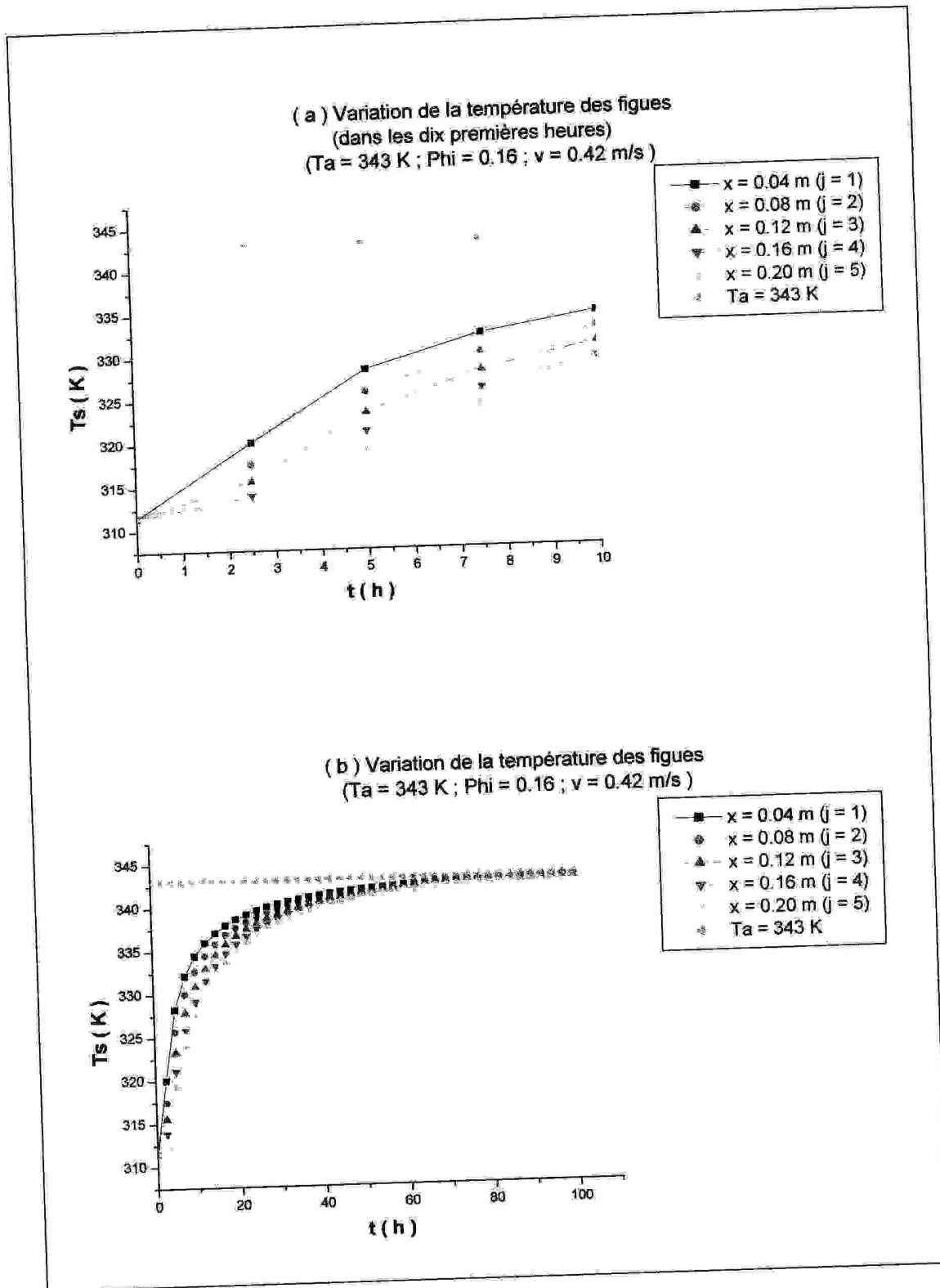
Les Figures (IV-7 (a)) et (IV-7 (b)) représentent l'évolution temporelle de la température du produit humide tout en mettant en évidence son augmentation dans le temps de séchage et la Figure (IV-8), montre sa diminution à travers la couche à sécher (selon la hauteur).

Sur La Figure (IV-7 (a)), la température du produit, pour la dernière couche ($x = 0.20 \text{ m}$) et pour le même temps de séchage, est quasiment égale à celle de l'ambiance.

Voici une autre affirmation de tout ce qui a été dit sur toutes les courbes $W = f(t)$ et $T_a = f(t)$; en effet au début du séchage, la température des figues qui sont loin de l'entrée du séchoir, est celle qui augmente le moins rapidement à cause, bien sur, de l'air qui cède son énergie aux figues les plus proches (une énergie qui sert pour les transferts massique et thermique).

Les courbes des Figures (IV-9 (a)), (IV-9 (b)) et (IV-9 (c)) représentent l'évolution temporelle de la température du produit humide à l'entrée, au milieu et à la sortie du séchoir en montrant qu'elles rejoignent toutes celle de l'air asséchant ($T_a = 343 \text{ K}$) mais dans des temps différents bien évidemment.

Les Figures (IV-10 (a)) et (IV-10 (b)) montrent que les équilibres massique et thermique sont atteints au milieu du séchoir après 100 h de séchage.



Figures (IV-7) : Variation de la température des figues dans le temps et pour plusieurs hauteurs.

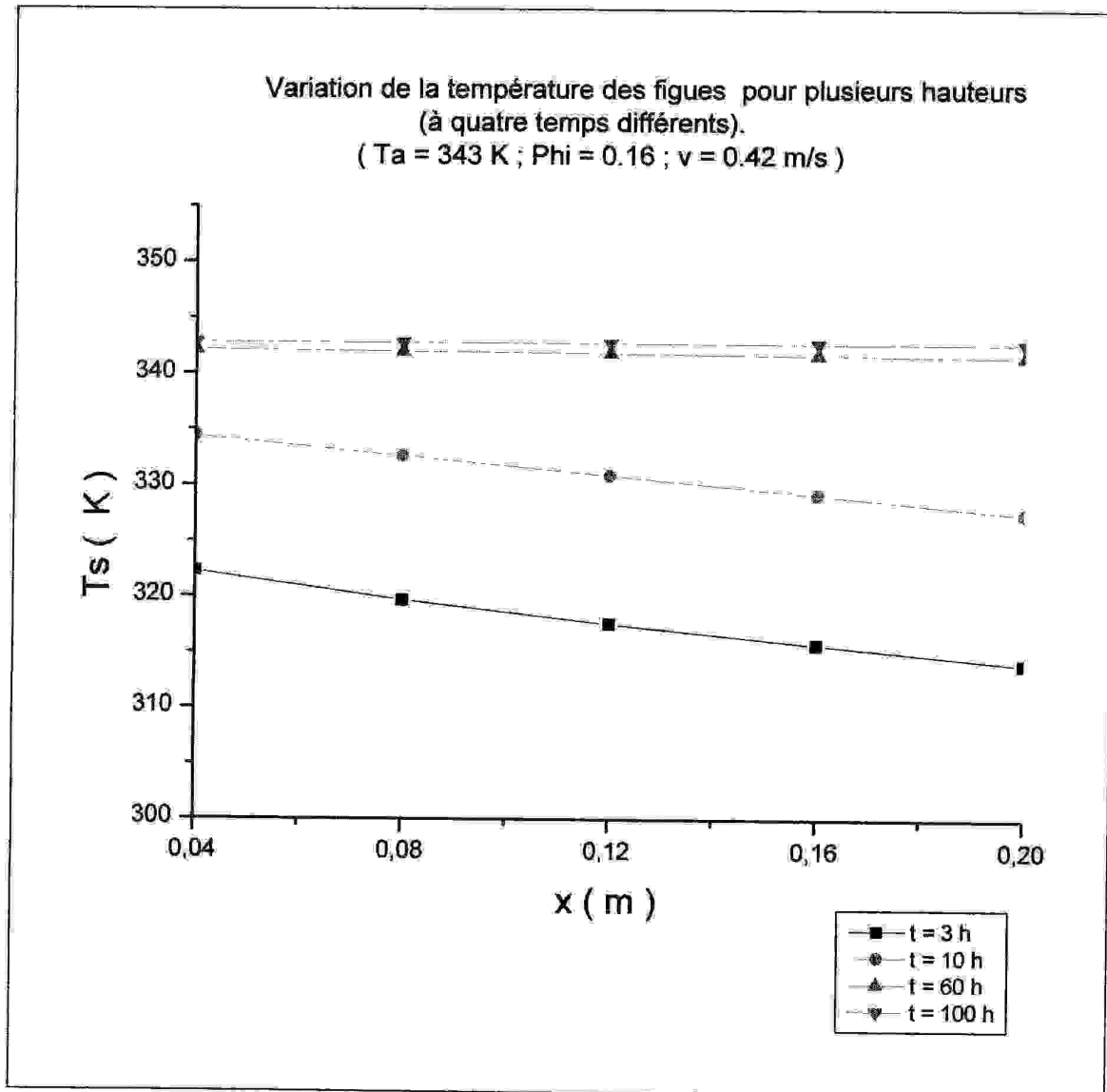
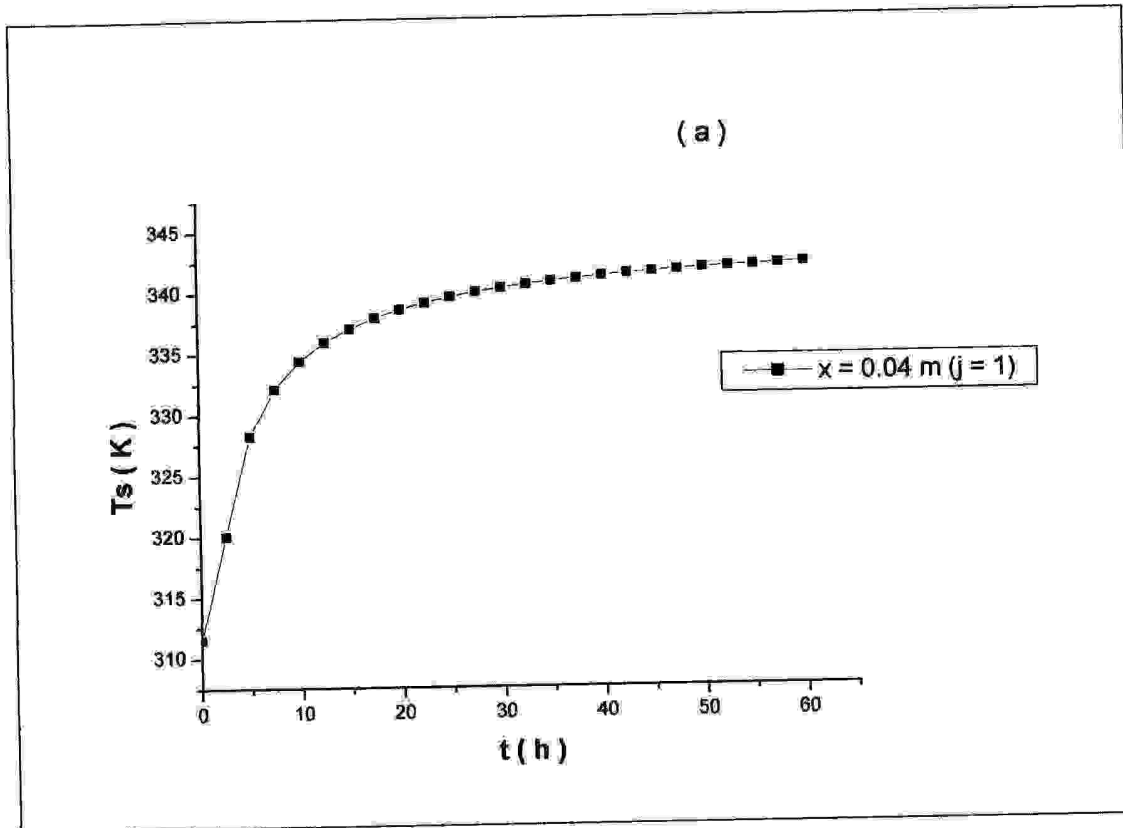
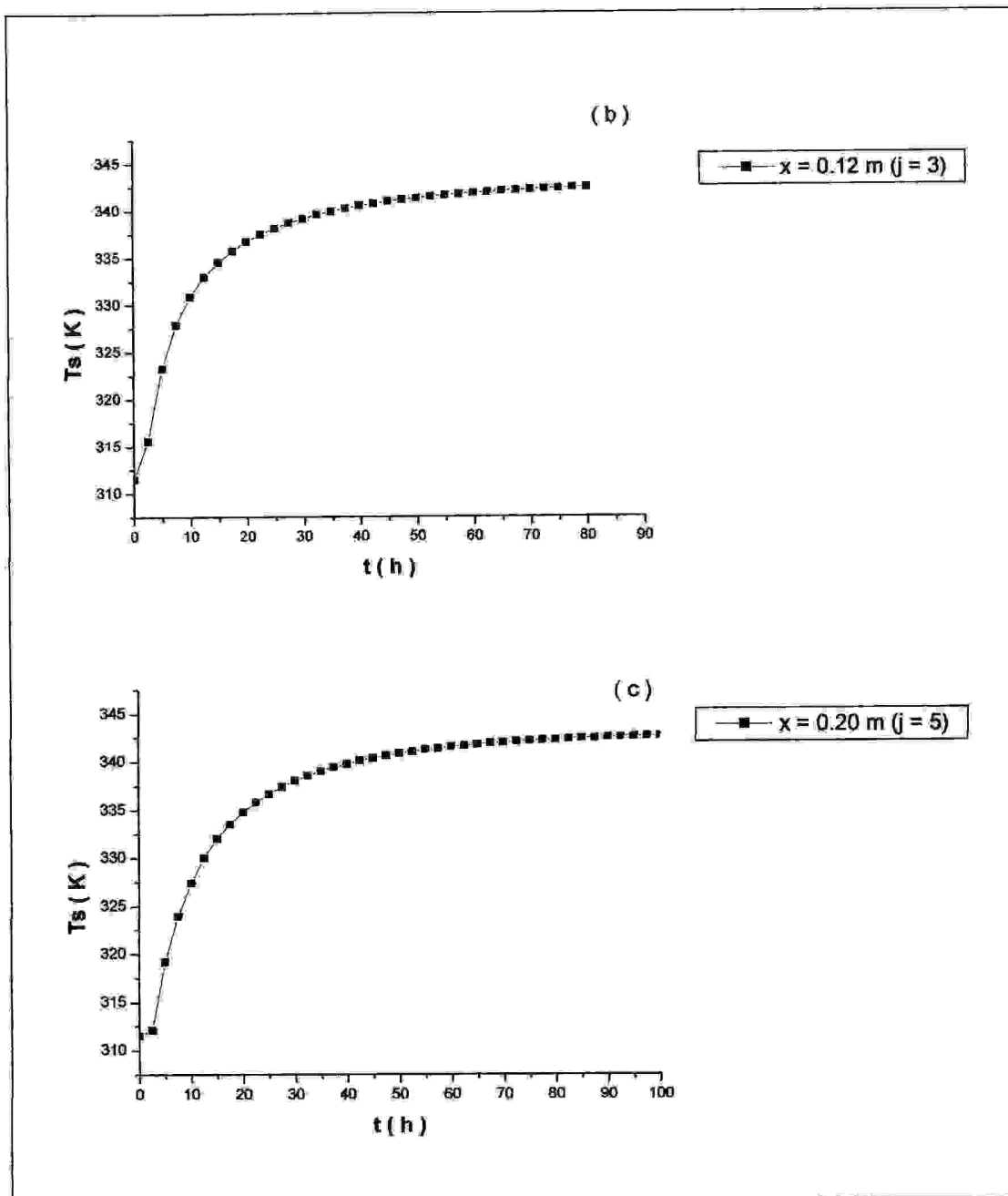


Figure (IV-8) : Variation de la température des figes pour plusieurs hauteurs.
(À quatre temps différents)

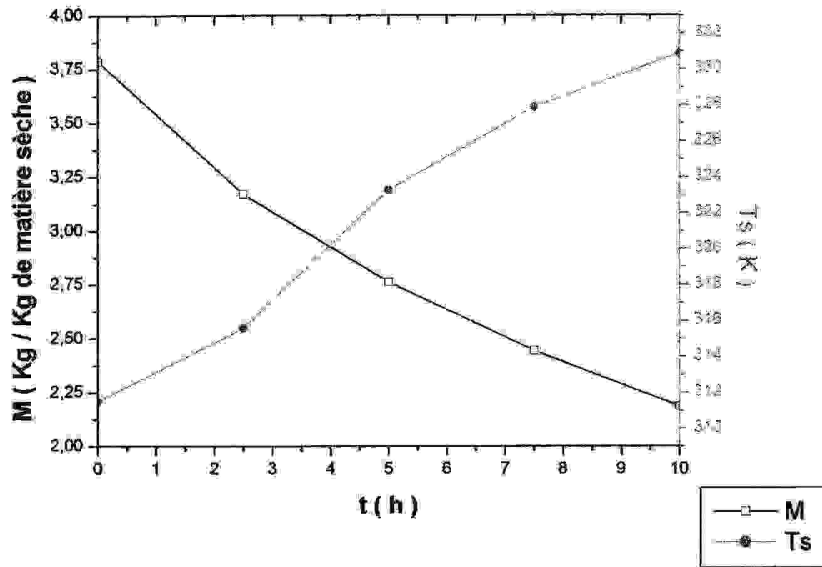


Figures (IV-9) : Variation de la température des figes dans le temps.
(À l'entrée, au milieu et à la sortie du séchoir)

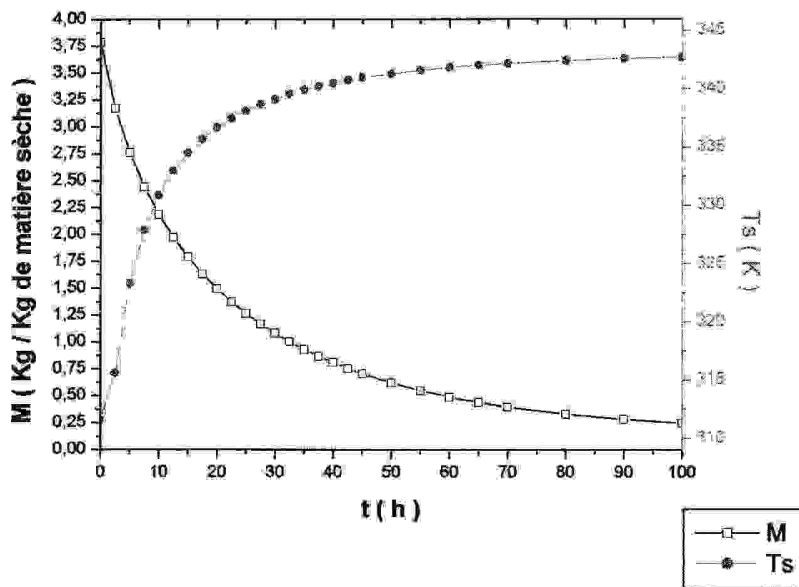


Figures (IV-9) : Variation de la température des figues dans le temps.
(À l'entrée, au milieu et à la sortie du séchoir)

(a) Variations temporelles de la teneur en eau du produit et de sa température.
 (dans les dix premières heures)
 ($T_a = 343 \text{ K}$; $\Phi = 0.16$; $v = 0.42 \text{ m/s}$; $x = 0.12 \text{ m}$)



(b) Variations temporelles de la teneur en eau du produit et de sa température.
 ($T_a = 343 \text{ K}$; $\Phi = 0.16$; $v = 0.42 \text{ m/s}$; $x = 0.12 \text{ m}$)



Figures (IV-10) : Variations temporelles de la teneur en eau du produit et de sa température.

IV-2. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE:

Généralement, les travaux concernant le séchage ne portent que sur l'étude paramétrique de la cinétique.

Dans cette étude, la variation des paramètres de l'air asséchant (sa température, sa vitesse et son humidité relative) permet de voir leurs effets sur le séchage, **déjà des résultats ont été trouvés concernant la cinétique de séchage dans le chapitre précédent.**

IV-2-1. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ASSÉCHANT:

En fixant l'humidité relative de l'air asséchant ainsi que sa vitesse, **la Figure (IV-11)** montre que l'augmentation de la température de l'air asséchant entraîne une élévation de l'eau évaporée du produit, en effet les pentes des courbes sont différentes, par exemple : à $t = 3 \text{ h}$ et à $t = 10 \text{ h}$, la pente de la courbe représentant cette augmentation à travers la couche du produit, pour une température de l'air asséchant égale à 353 K est plus importante à celles où $T_a = 333 \text{ K}$ et $T_a = 343 \text{ K}$ respectivement ; l'humidité accumulée dans l'air au niveau $x = 0.08 \text{ m}$ après 10 h de séchage, est de 0.04983 Kg/Kg d'air sec lorsque l'air est soufflé à 353 K alors qu'elle est de 0.02023 Kg/Kg d'air sec (presque la moitié) au même niveau et à la même date lorsque l'air est soufflé à 333 K .

En examinant l'évolution temporelle de l'humidité absolue de l'air au niveau de la deuxième et la dernière couche sur **la Figure (IV-12)**, le gradient de l'humidité entre ces deux couches est plus grand quand la température de l'air asséchant l'est, ce qui confirme ce que vient de se dire.

Sur la même figure, la décroissance des courbes (comme sur **la Figure (IV-1 (a))**) commence à se faire à $t = 2.5 \text{ h}$ au niveau de toutes les couches, mais pour 333 K , la décroissance au niveau de la dernière couche se fait à $t = 3 \text{ h}$ donc bien après celle de la deuxième couche, alors, sûrement, une température moins élevée de l'air asséchant entraîne une énergie insuffisante d'où sa consommation par les premières couches du produit est évidente.

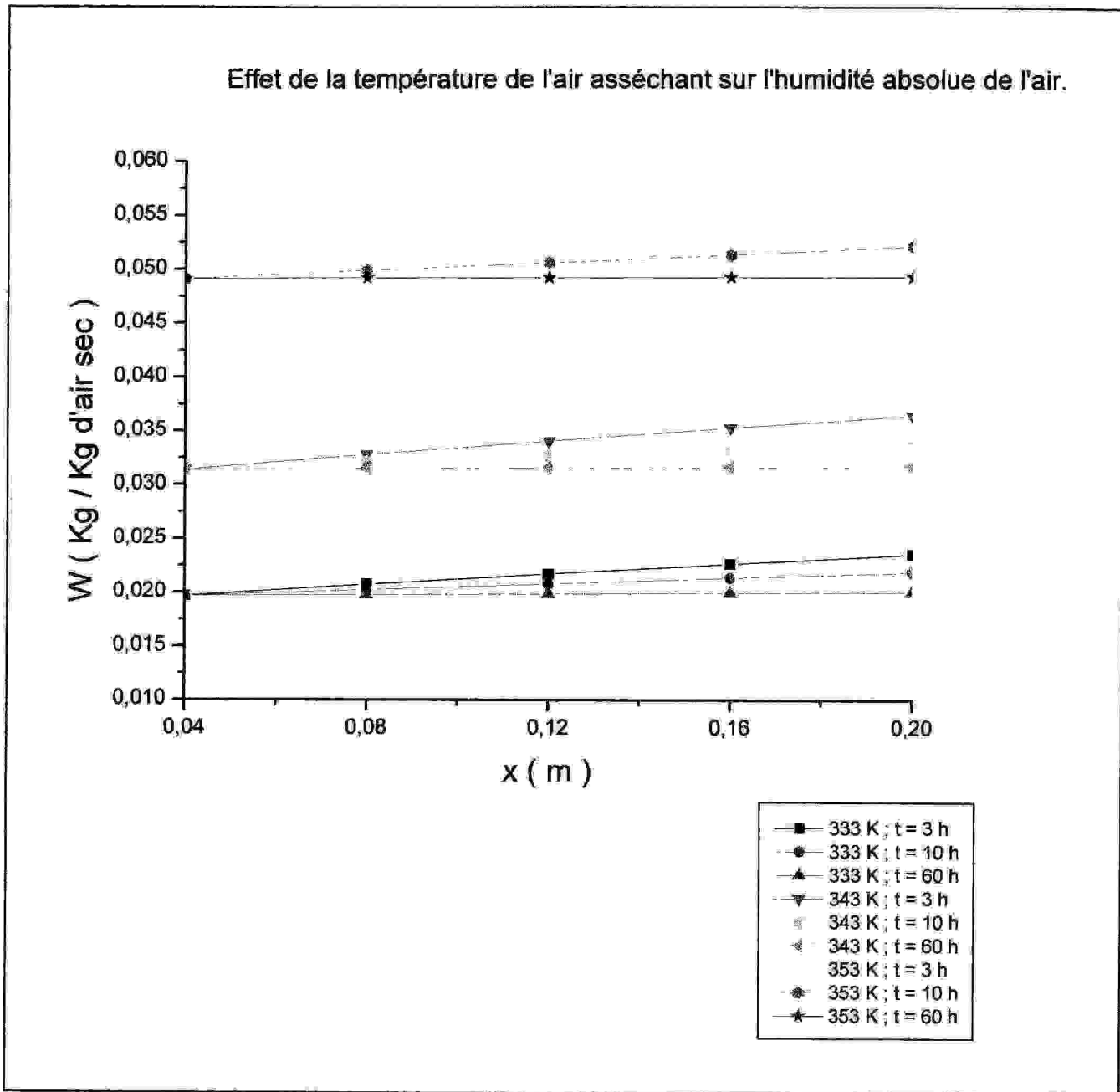
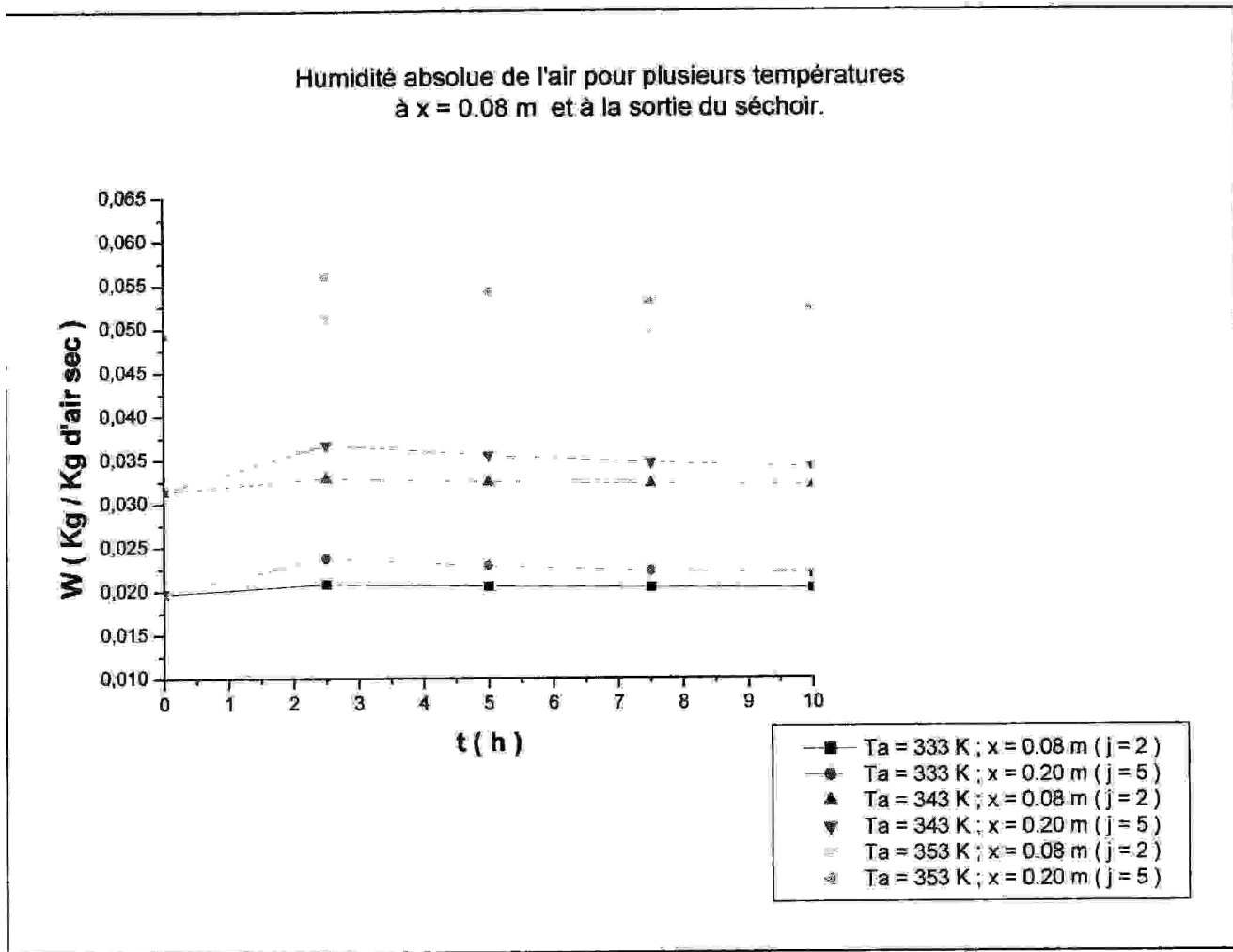


Figure (IV-11) : Effet de la température de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air.



**Figure (IV-12) : Humidité absolue de l'air pour plusieurs températures.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)**

La Figure (IV-13) représentant l'évolution de la température de l'air à travers le produit et à deux dates différentes, montre bien l'effet de la température de l'air asséchant sur cette température d'air.

Sur cette figure, la température de l'air diminue suivant la hauteur (l'air asséchant cède son énergie en montant, chose déjà vue) mais d'une manière plus grande et plus rapide quand la température de l'air asséchant est plus élevée (la pente de la courbe correspondante est plus importante) : les premières couches prennent plus d'énergie et en plus du transfert de masse plus important (voir cinétique), le transfert thermique l'est aussi (à $t = 3$ h la différence de température entre la première et la dernière couche est de 15 K pour $T_a = 353$ K, alors qu'elle est de 9 K pour $T_a = 333$ K).

Sur la Figure (IV-14), apparaît une autre fois l'effet de la température de l'air asséchant sur la température de l'air, en effet dès qu'elle augmente, le gradient de la température entre la deuxième et la dernière couche augmente aussi.

à partir de $t = 3$ h la température de l'air au niveau de la dernière couche ($j = 5$) pour $T_a = 343$ K dépasse la température de l'air au niveau de la deuxième couche ($j = 2$) pour $T_a = 333$ K ; et à partir de $t = 4.5$ h la température de l'air au niveau de la dernière couche pour $T_a = 353$ K dépasse la température de l'air au niveau de la deuxième pour $T_a = 343$ K (la température de l'air de la dernière couche pour $T_a = 353$ K est tout le temps supérieure à celles de toutes les couches pour $T_a = 333$ K).

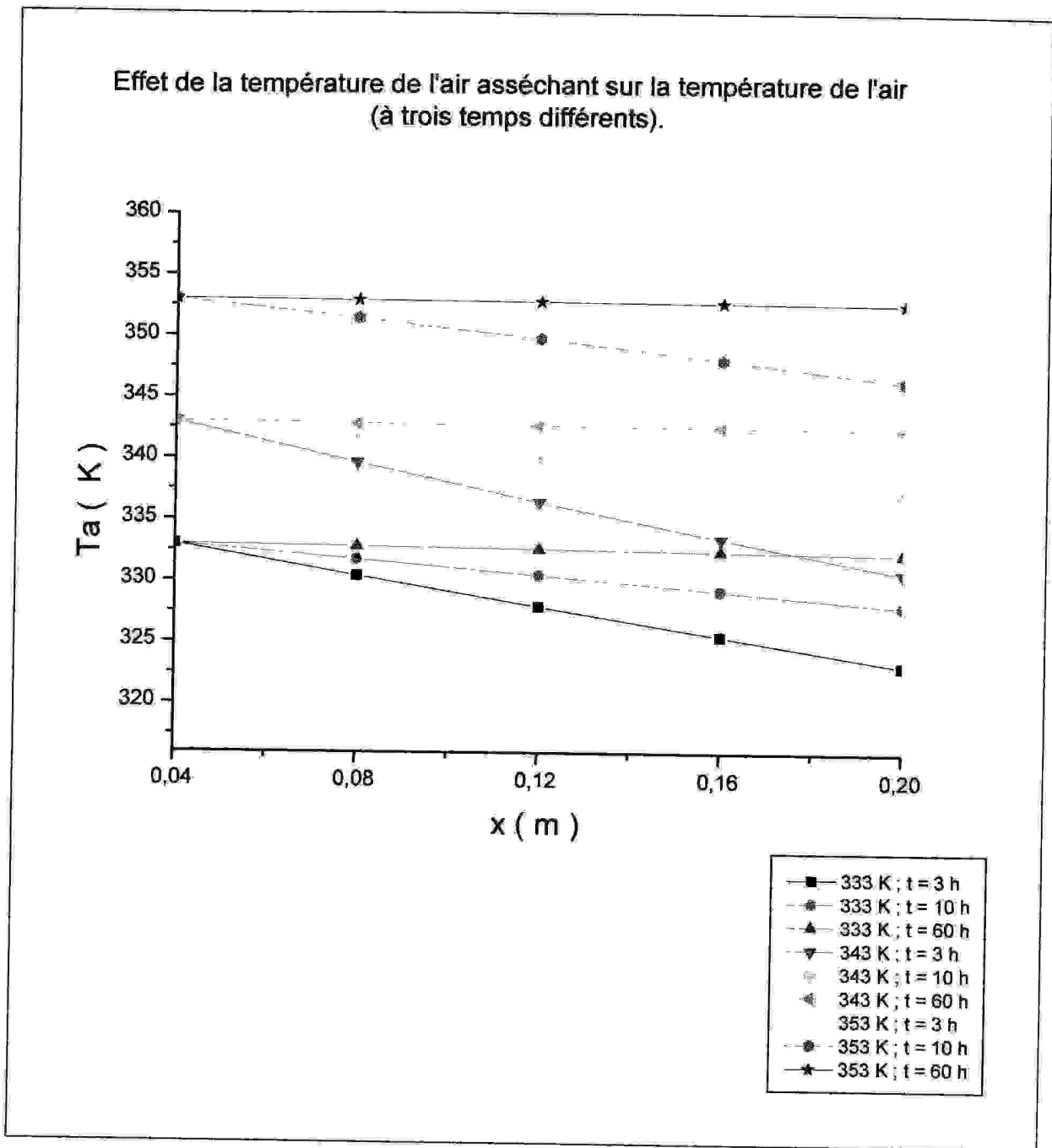


Figure (IV-13) : Effet de la température de l'air asséchant sur la température de l'air.
(À trois temps différents)

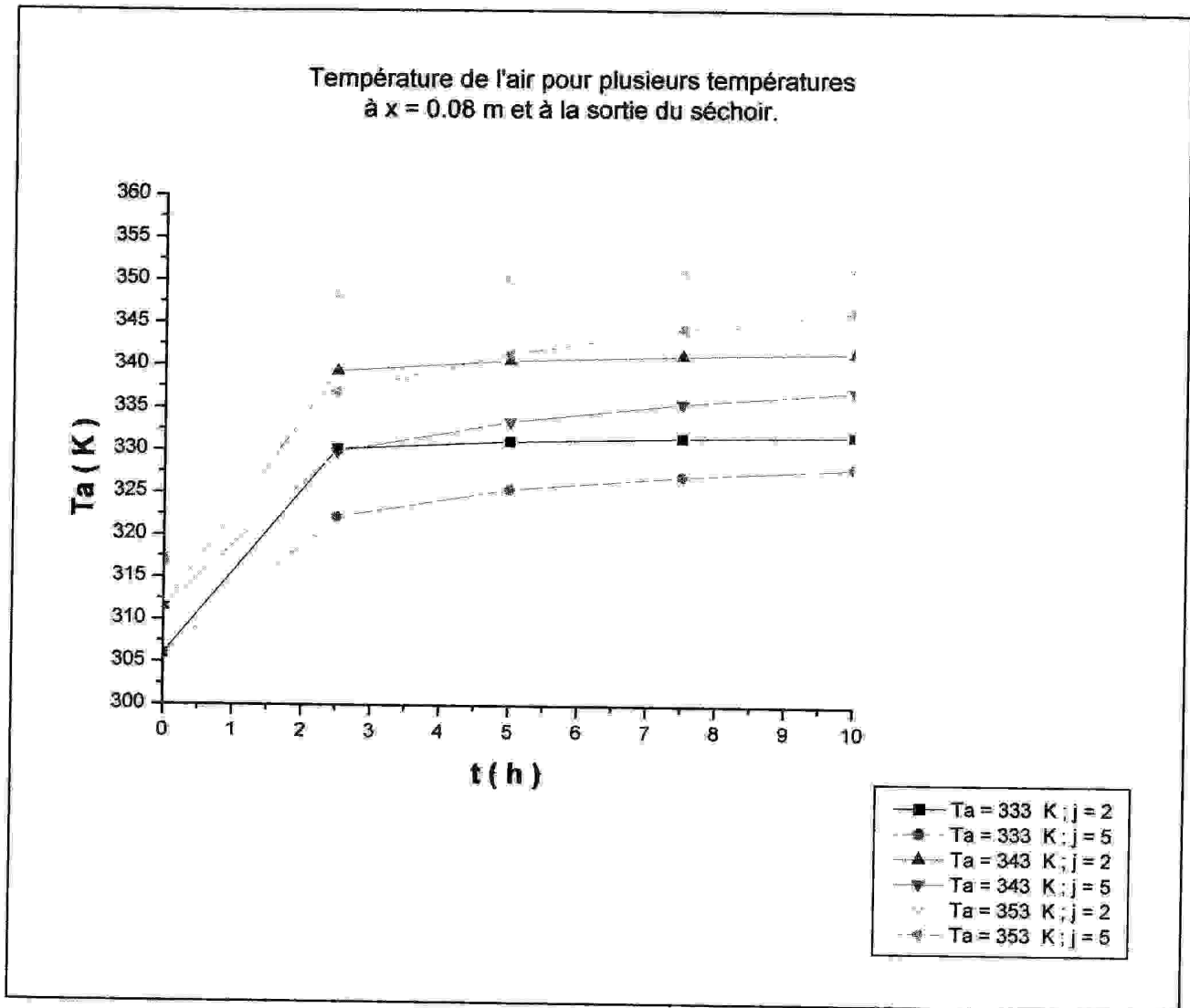


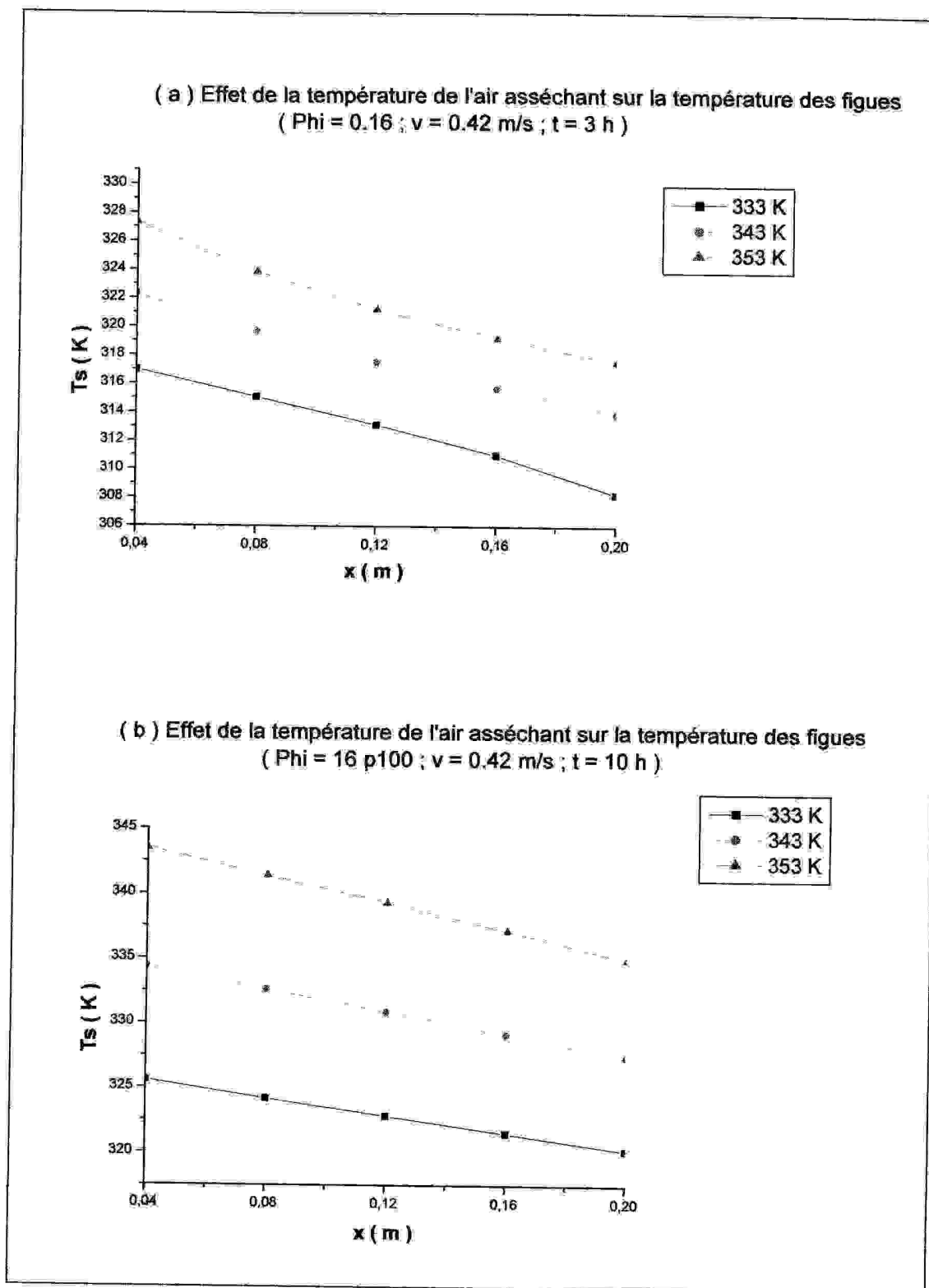
Figure (IV-14) : Température de l'air pour plusieurs températures.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)

Les Figures (IV-15 (a)) et (IV-15 (b)) représentent, à deux dates différentes, la variation de la température des fibres à travers la couche à sécher pour trois températures différentes de l'air asséchant.

La température des fibres diminue d'une couche j à celle qui la succède et le produit gagne plus de chaleur dès que la température de l'air asséchant est plus élevée, on voit même, sur la figure (IV-16), que la température du produit au niveau des premières couches est d'autant plus voisine que celle du produit au niveau des dernières couches.

La Figure (IV-16) montre, qu'à $t = 5 \text{ h}$, la température de la dernière couche pour $T_a = 343 \text{ K}$ s'égalise avec celle de la deuxième couche pour $T_a = 333 \text{ K}$ et à partir de ce moment, la courbe ($j = 5$) est au dessus de celle de ($j = 2$) ce qui met en évidence l'effet de la température de l'air asséchant qui est encore très clair à partir de $t = 15 \text{ h}$.

Les résultats trouvés, concernant l'effet de la température de l'air asséchant, sont en bonne concordance avec ceux trouvés par [16, 58,7].



Figures (IV-15) : Effet de la température de l'air asséchant sur la température des figues.

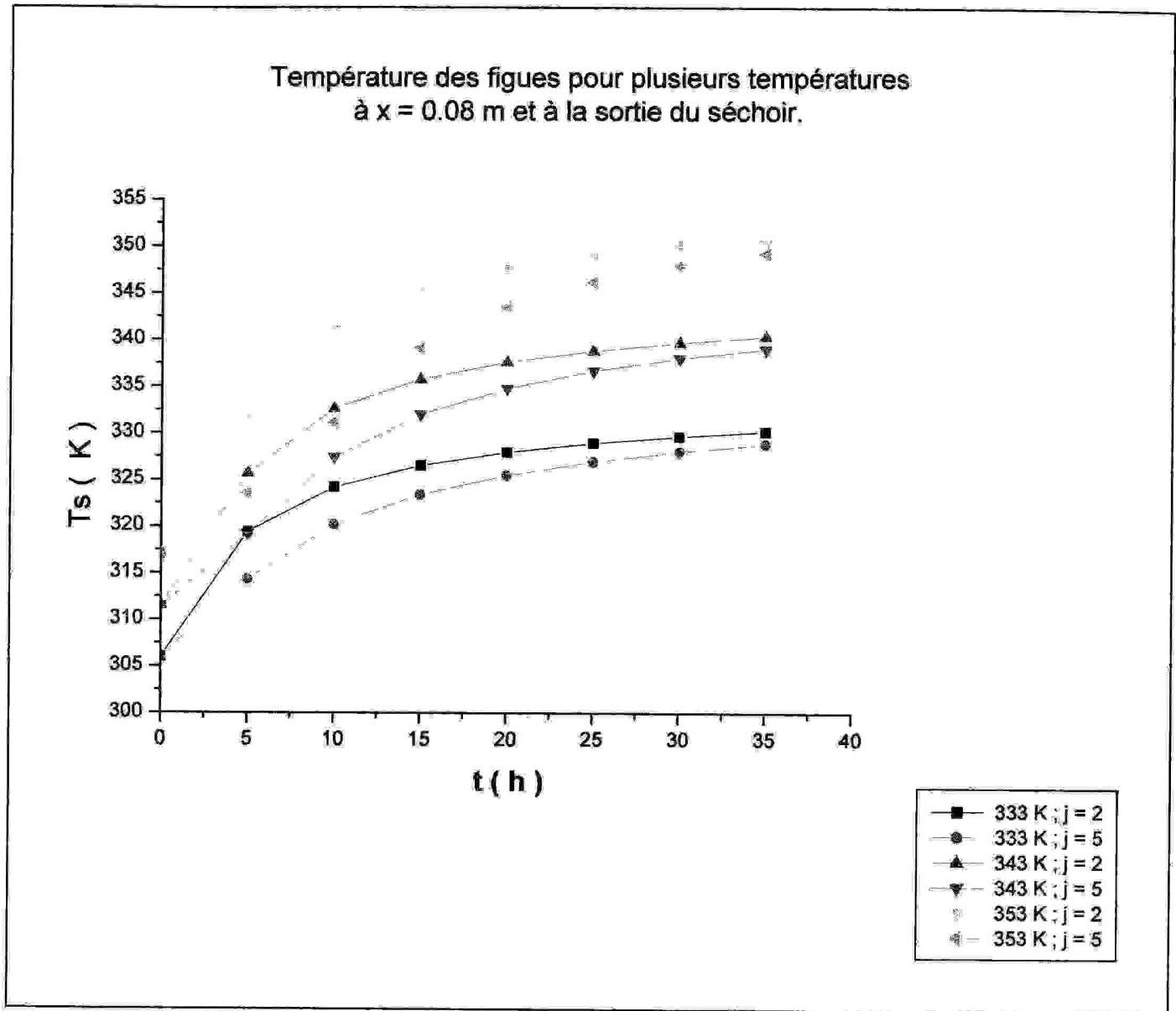


Figure (IV-16) : Température des figes pour plusieurs températures.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)

IV-2-2. EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT:

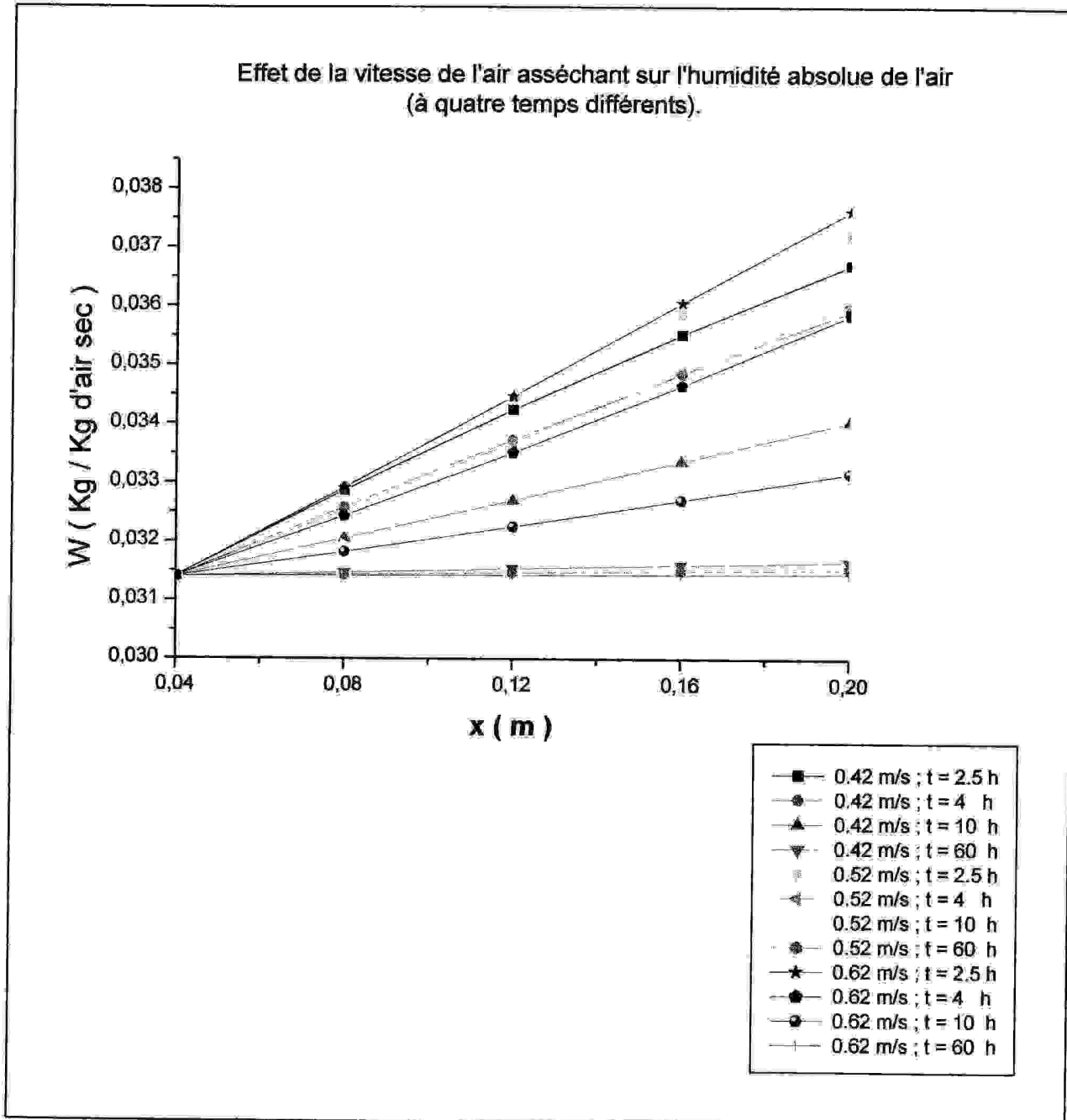


Figure (IV-17) : Effet de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air.
(À quatre temps différents)

La Figure (IV-17) représente l'évolution de l'humidité absolue de l'air à travers le produit à sécher pour trois vitesses différentes et à des dates différentes.

La première et la deuxième couche ($j = 1$) et ($j = 2$) ne sont pas influencées par la vitesse de l'air asséchant, c'est à partir de la troisième couche que l'effet de cette dernière apparaisse.

À $t = 2.5$ h l'effet de la vitesse de l'air asséchant est remarquable.

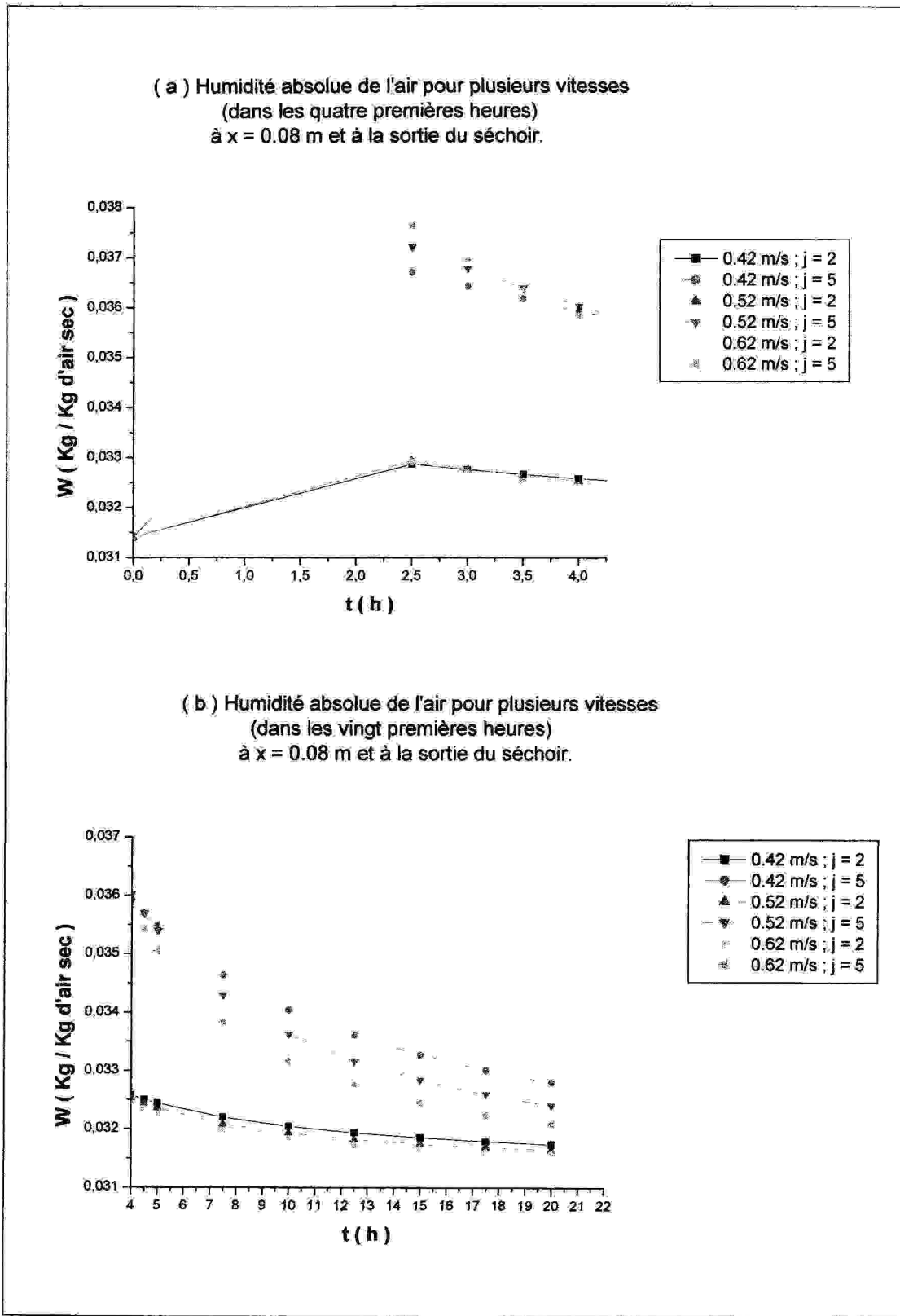
À $t = 4$ h l'effet de ce paramètre est négligeable (les trois courbes sont confondues), à partir de ce moment l'influence réapparaisse pour les dernières couches et non pas pour les premières, cela est bien vu, aussi, sur les Figures (IV-18).

Sur ces dernière figures, l'effet de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air a lieu au début du séchage, il commence à disparaître à partir de $t = 4$ h pour les dernières couches, l'augmentation de la vitesse n'est donc bénéfique que pour les dernières couches du produit ; il serait peut être préférable de jouer sur ce paramètre si l'épaisseur de la couche du produit à sécher était importante.

En examinant les Figures (IV-19) et (IV-20), se confirment les constatations précédentes, en effet la température de l'air reste presque la même au niveau des premières couches, apparemment c'est à partir de $t = 4$ h qu'apparaisse l'effet de la vitesse de l'air asséchant sur le transfert thermique, mais reste toujours un paramètre dont l'influence est inférieure à celle de la température, ce comportement est normal compte tenu de la dépendance de la pression de saturation superficielle vis-à-vis de la température.

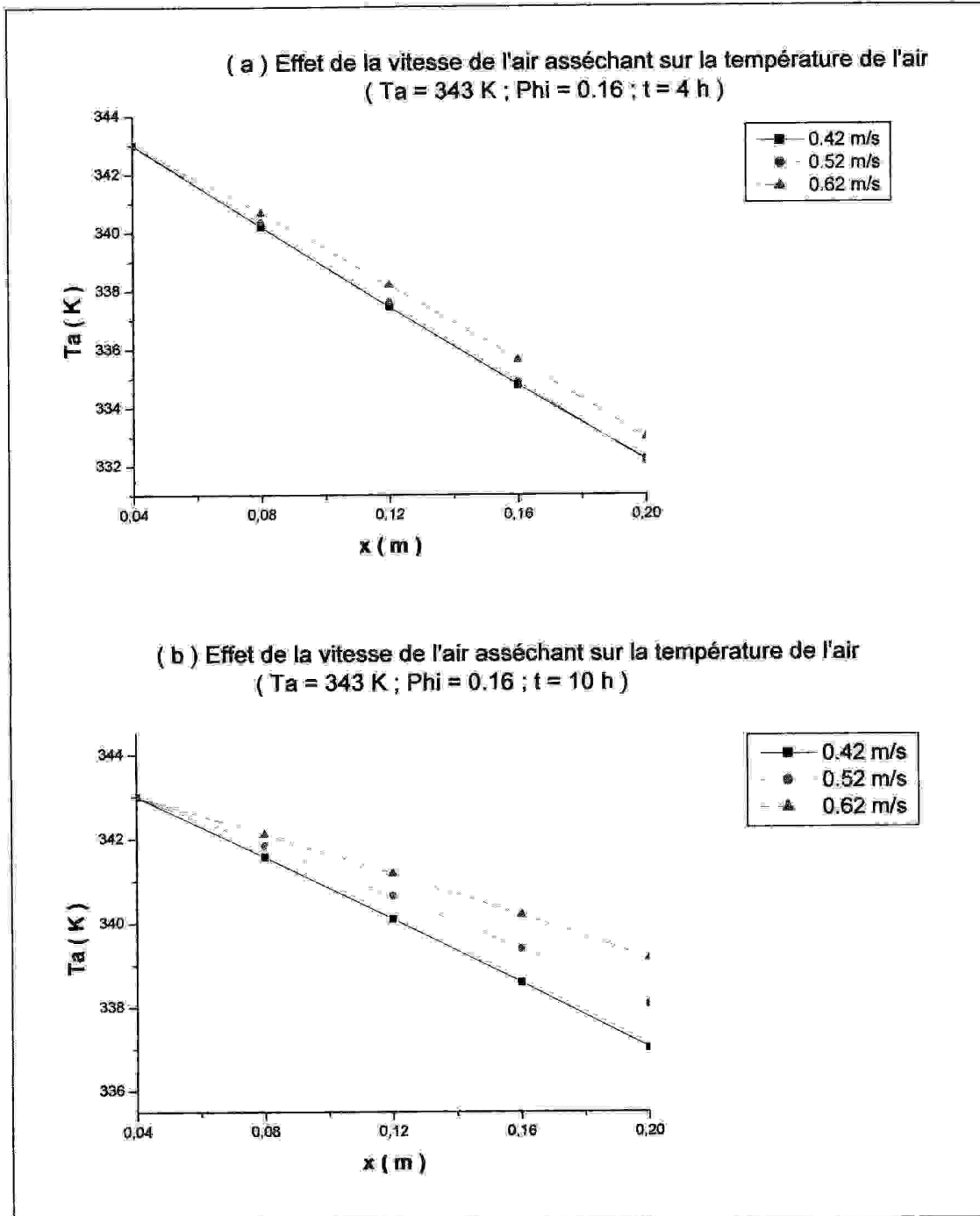
Sur la Figure (IV-21), la température du produit est presque la même pour les premières couches lorsque $v = 0.52$ m/s ou $v = 0.62$ m/s.

La Figure (IV-22), représentant l'évolution temporelle de la température des fibres à $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir pour les trois valeurs utilisées de la vitesse de l'air asséchant, montre qu'à partir $t = 12$ h la température du produit au niveau de la dernière couche pour la vitesse $v = 0.62$ m/s est bien supérieure à celle du produit au niveau de la deuxième couche pour la vitesse $v = 0.42$ m/s.



Figures (IV-18) : Humidité absolue de l'air pour plusieurs vitesses.

(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)



Figures (IV-19) : Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la température de l'air.

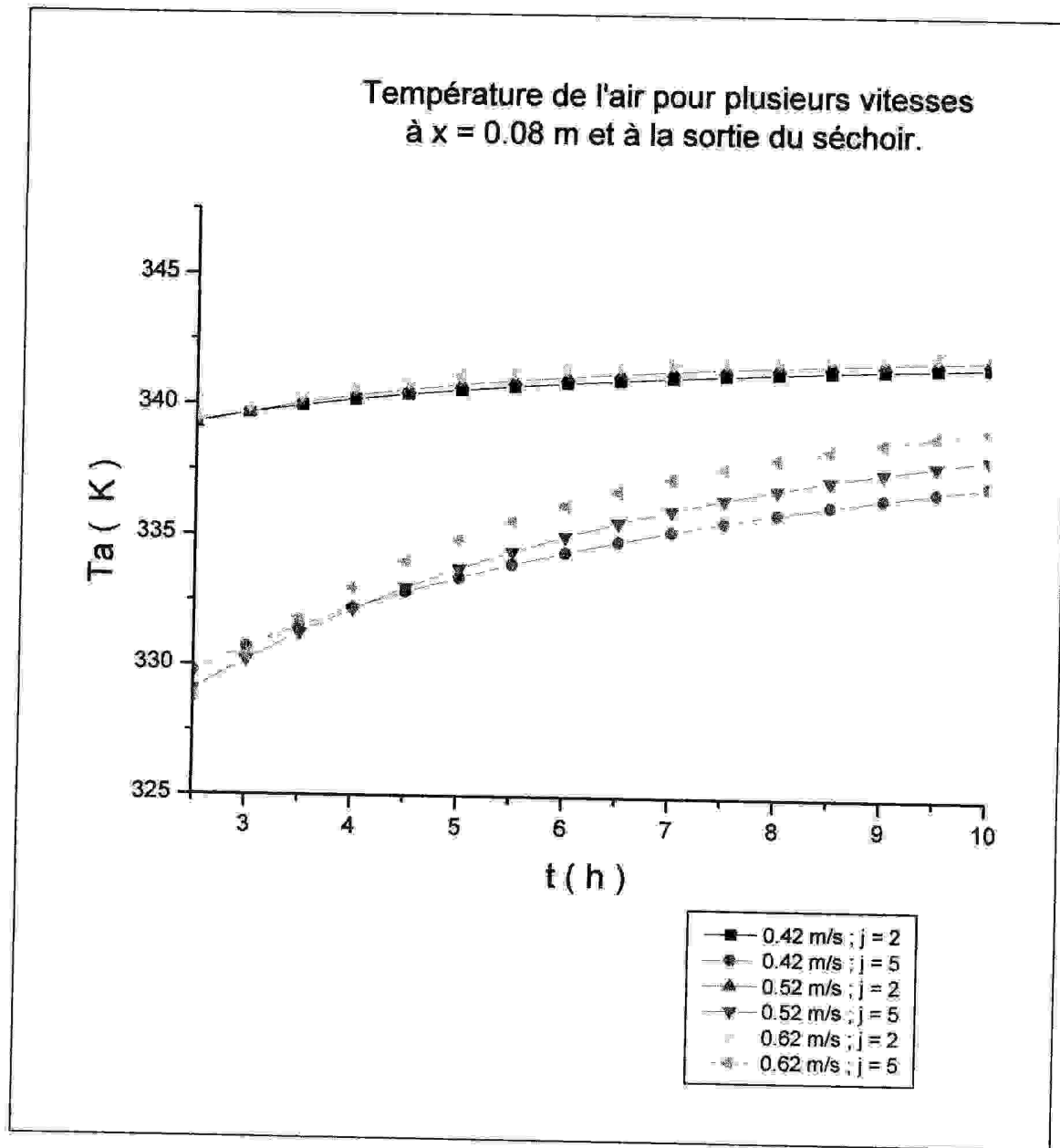
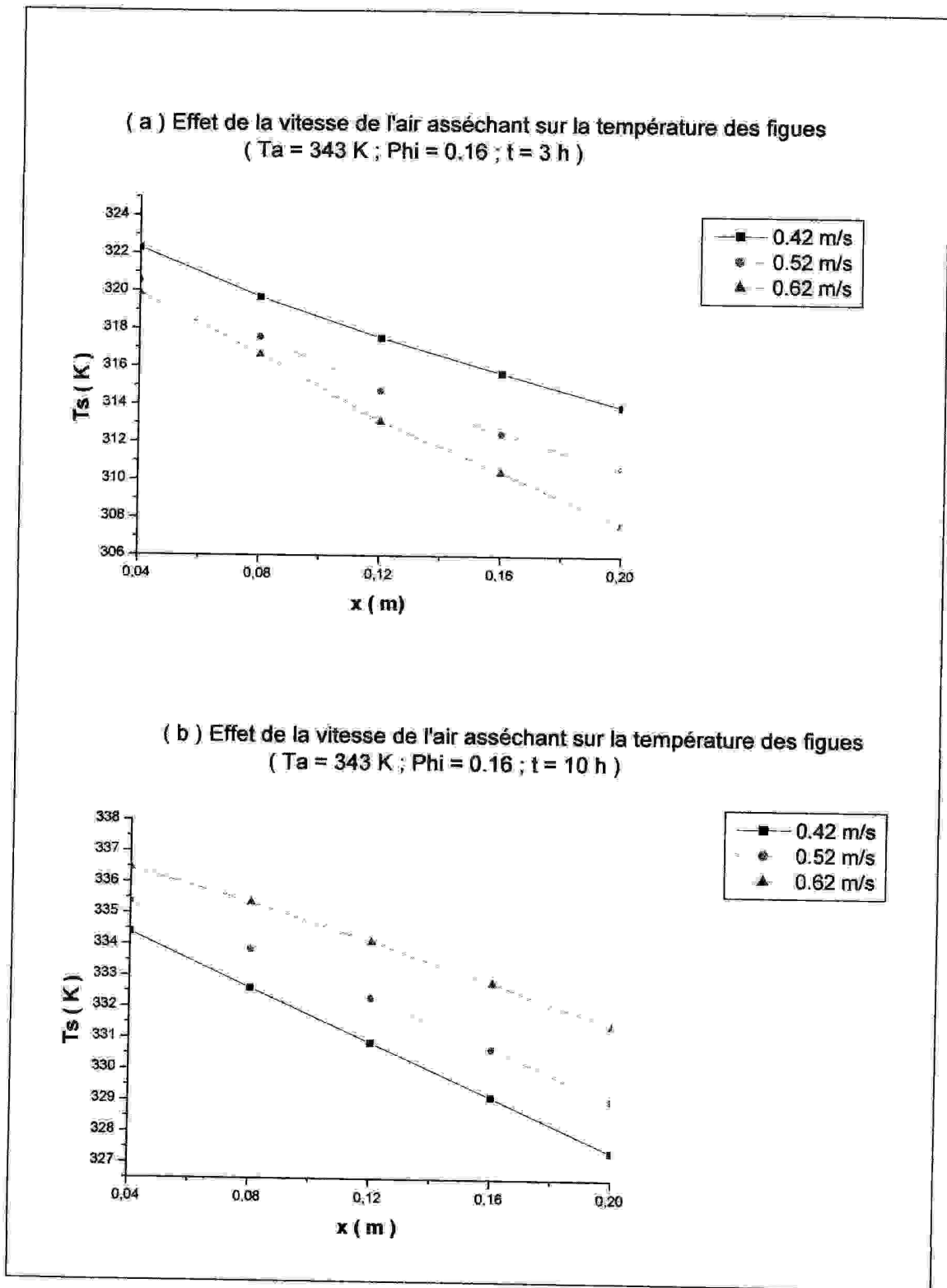


Figure (IV-20) : Température de l'air pour plusieurs vitesses à $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir.



Figures (IV-21) : Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la température des figes.

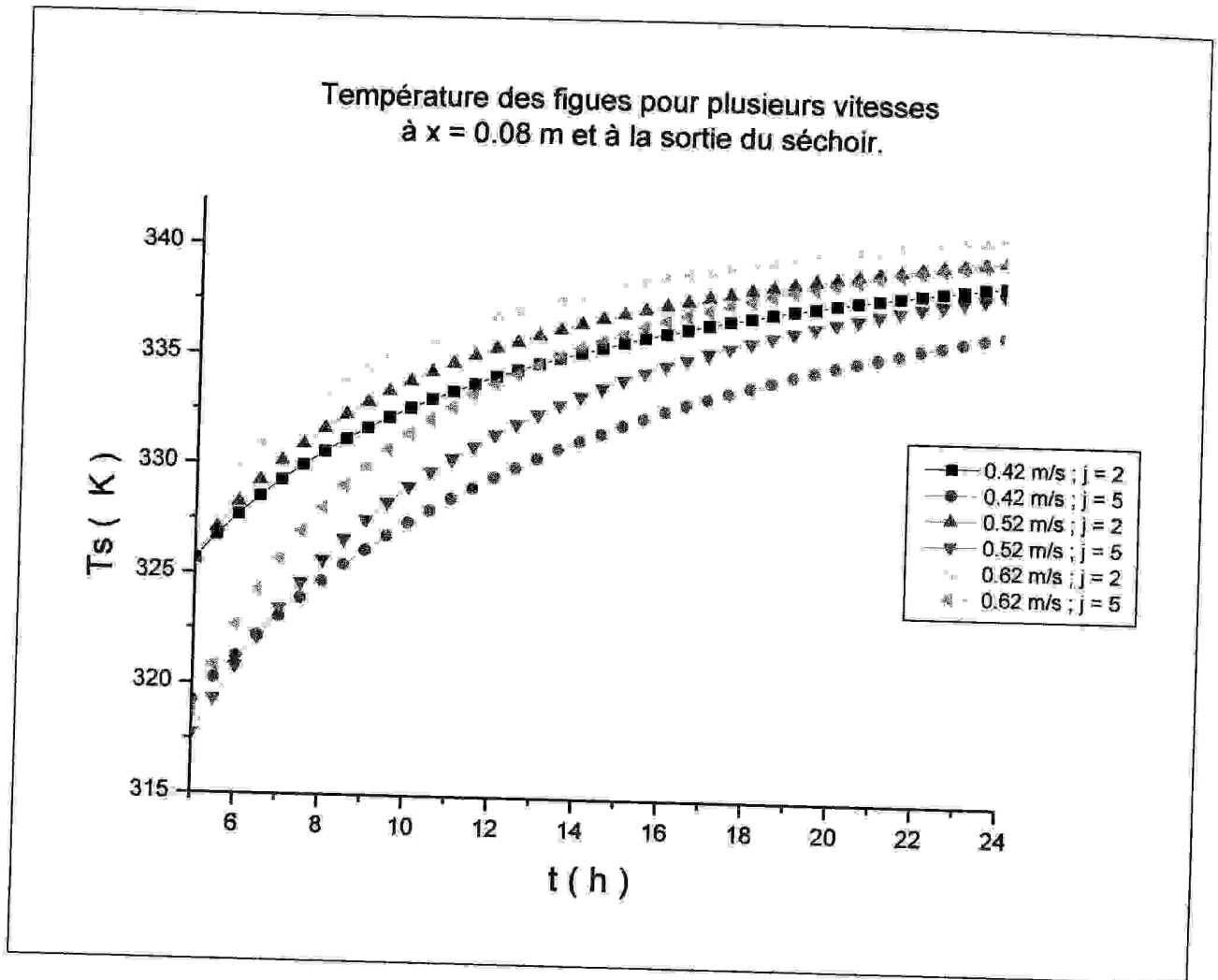


Figure (IV-22): Température des fibres pour plusieurs vitesses.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)

Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux de [16], en effet une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air asséchant accroît sensiblement la vitesse de séchage, mais le paramètre le plus influent est la température de l'air asséchant.

Les résultats obtenus sont en bonne concordance, également, avec ceux de [7], où l'effet du débit de l'air asséchant a été étudié (la vitesse étant proportionnelle au débit).

IV-2-3. EFFET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE DE L'AIR ASSÉCHANT:

En examinant les Figures (IV-23), (IV-24), (IV-25), (IV-26), (IV-27) et (IV-28), on peut dire que l'effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air, sur sa température ainsi que sur la température des figues est négligeable; d'ailleurs c'était le même résultat trouvé pour la cinétique.

Dans les travaux effectués sur le séchage, l'effet de l'humidité relative est généralement négligé [60].

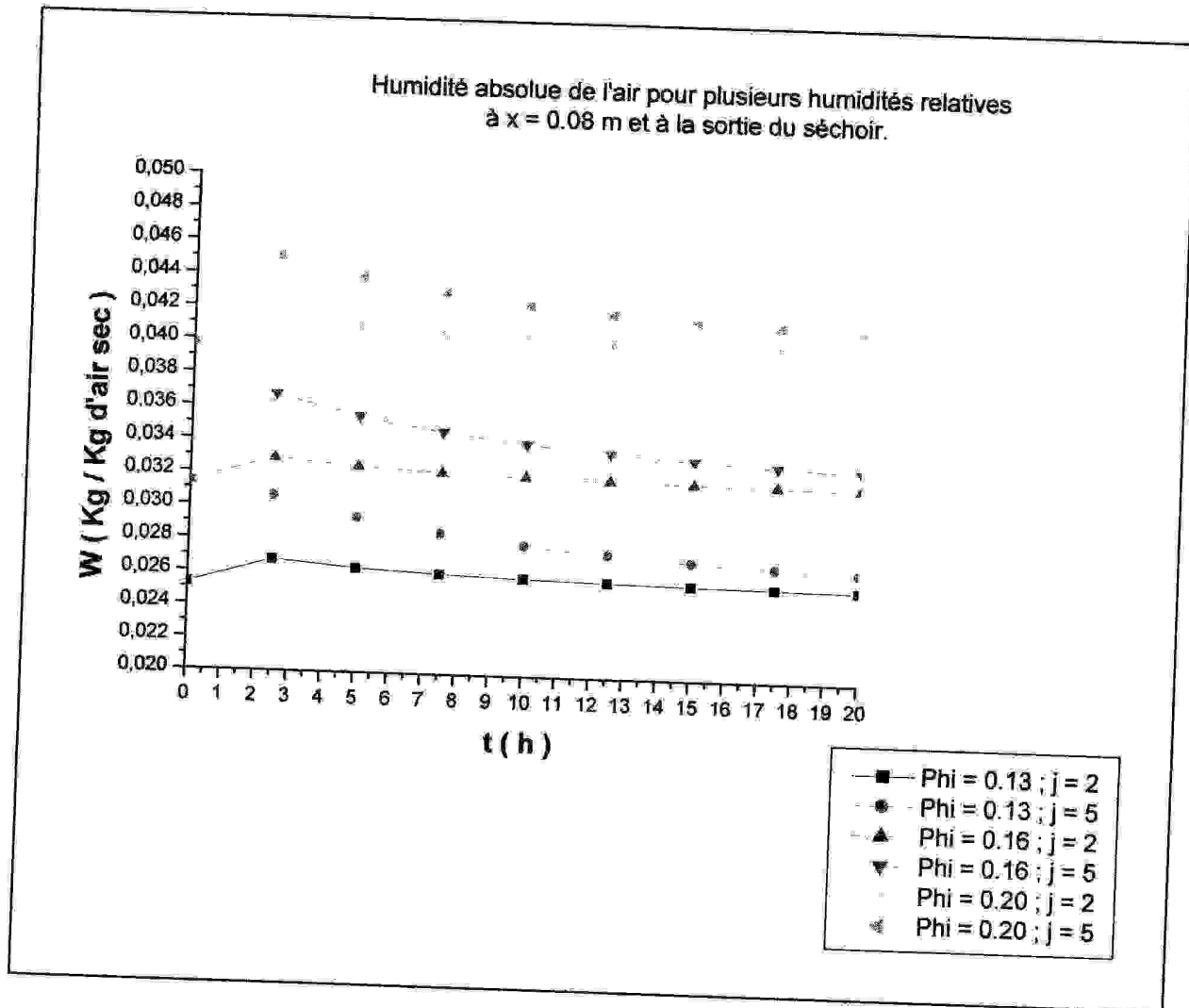
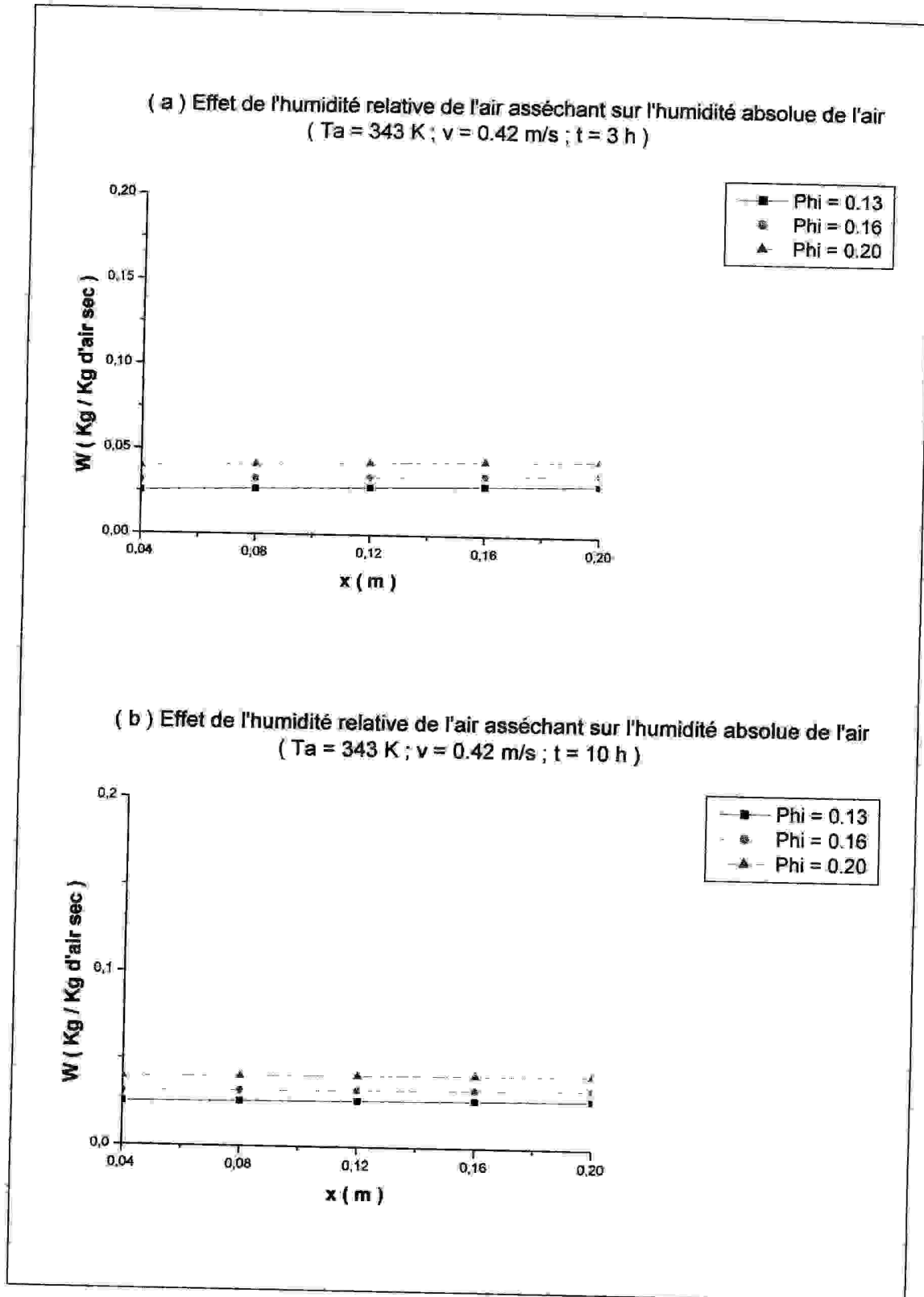
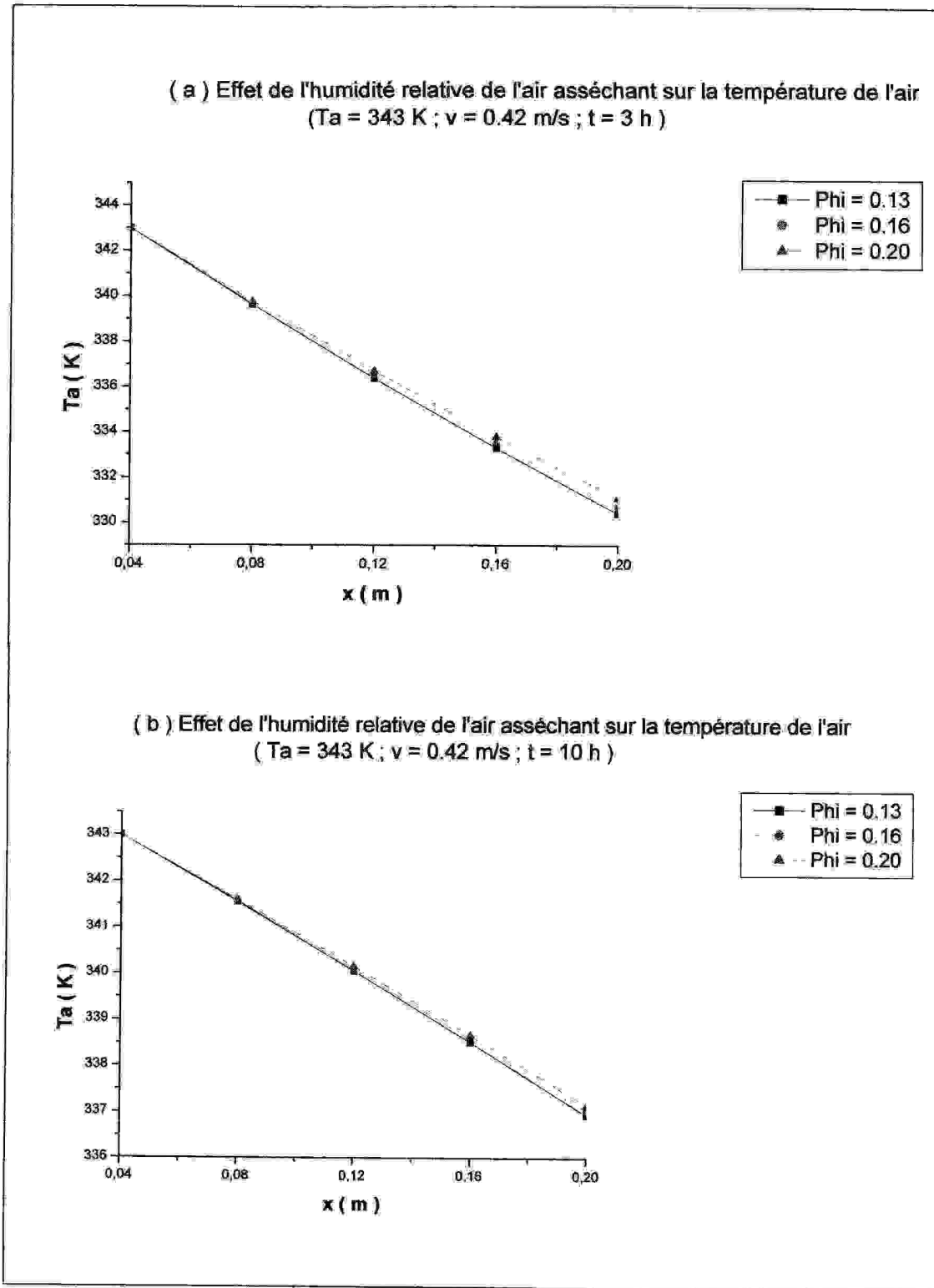


Figure (IV-23) : Humidité absolue de l'air pour plusieurs humidités relatives.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)



Figures (IV-24) : Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air.



Figures (IV-25) : Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la température de l'air.

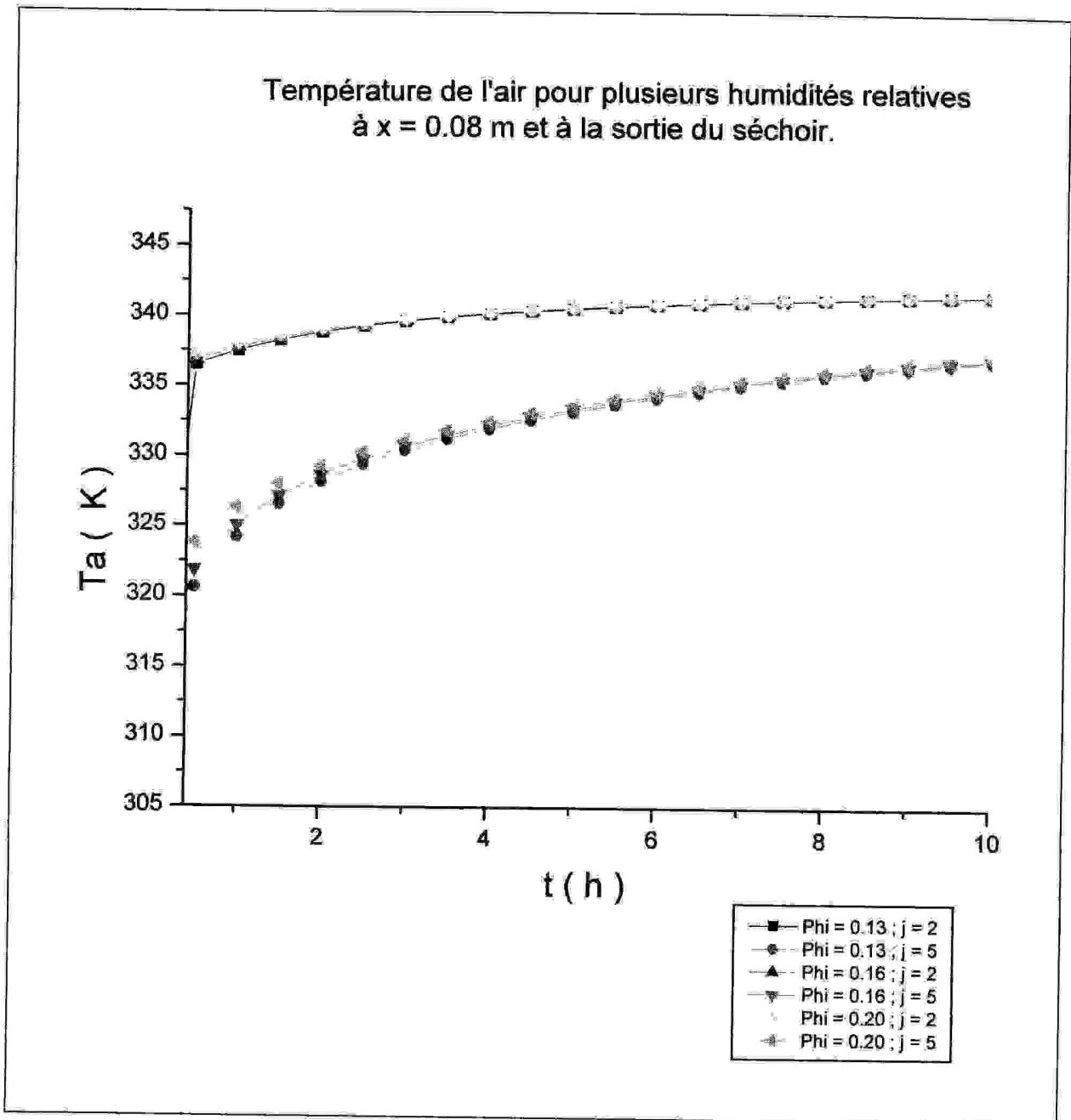
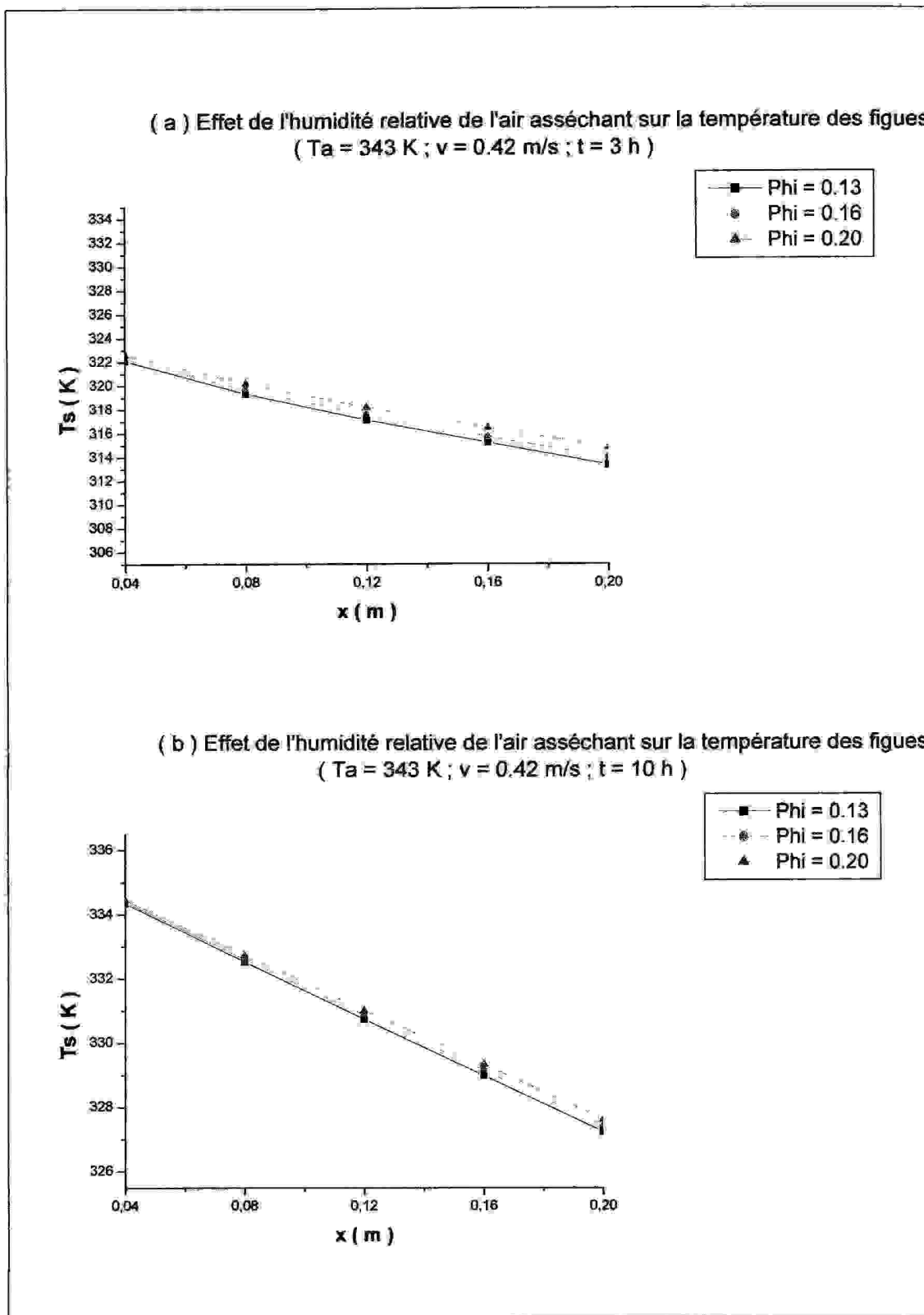


Figure (IV-26) : Température de l'air pour plusieurs humidités relatives.

(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)



Figures (IV-27) : Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la température des figes.

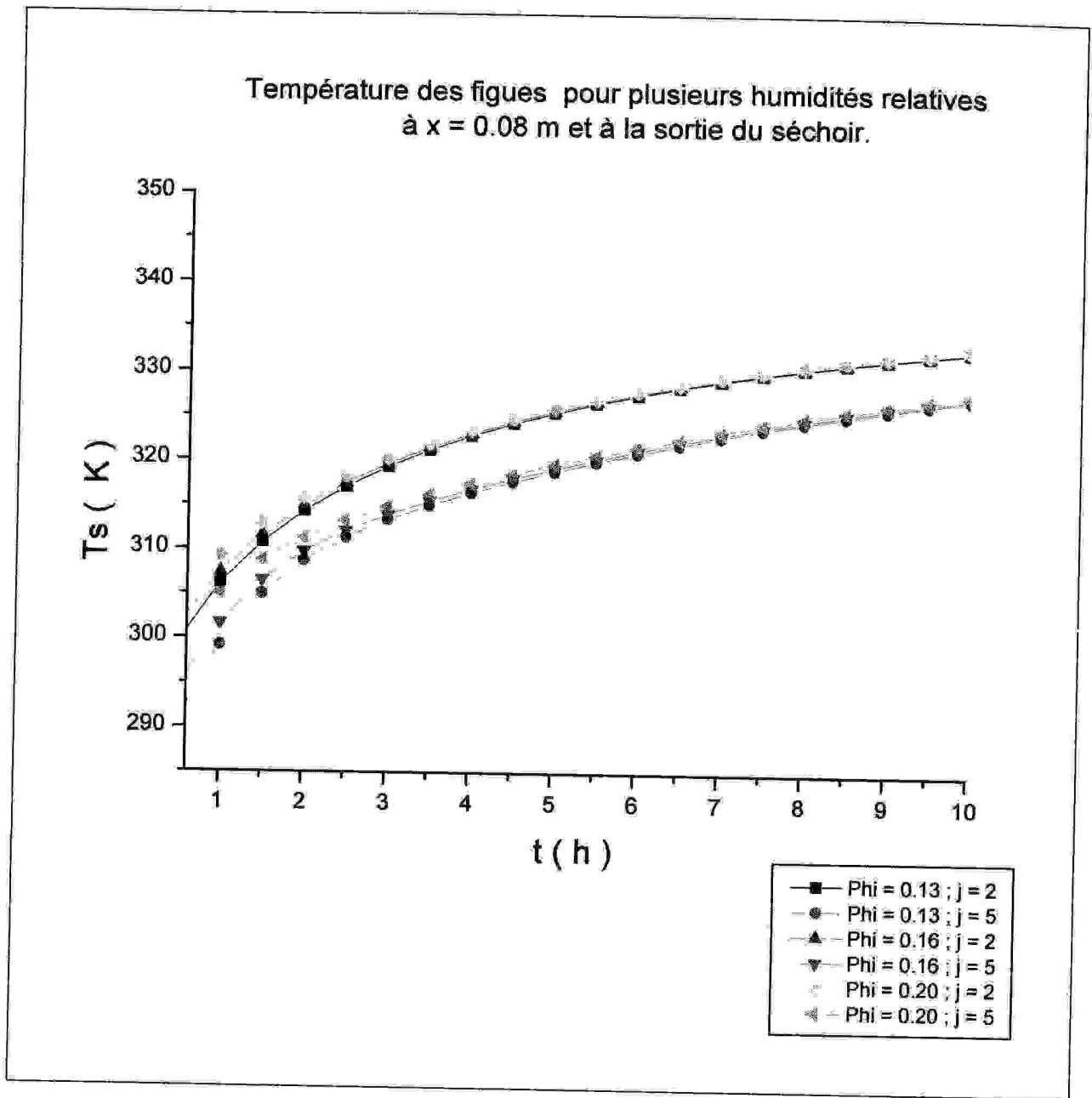
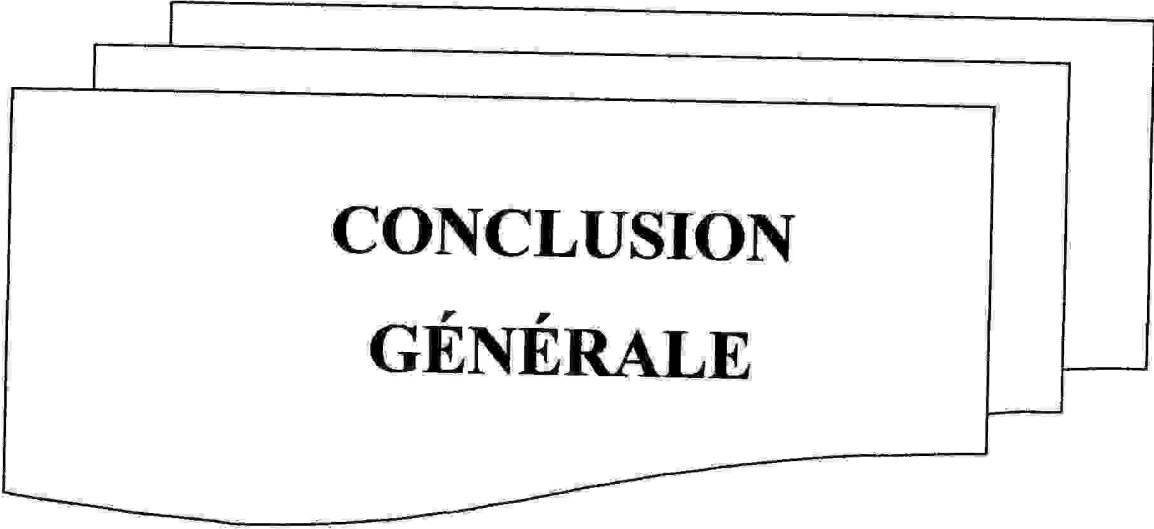


Figure (IV-28) : Température des figes pour plusieurs humidités relatives.
(À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)

IV-2-4. CONCLUSION:

L'étude paramétrique nous informe sur l'effet du changement des conditions extérieures, à savoir la température, la vitesse et l'humidité relative ; en effet l'augmentation du premier paramètre donne à l'air asséchant plus de pouvoir évaporateur se traduisant par l'accroissement des quantités d'eau évaporées surtout pour les premières couches et se traduisant également par l'élévation de la température de l'air et de celle du produit à sécher, nous avons pu voir aussi que les premières couches sont les premières à atteindre les équilibres massique et thermique. L'augmentation du deuxième paramètre (la vitesse) est très visible au début du séchage surtout pour les dernières couches en se comparant avec la température, ce qui nous a conduit à dire que la vitesse de l'air asséchant est un paramètre peu influent devant l'effet de la température et aussi après 10 h de séchage la prédominance de la variation de vitesse d'air sur le taux de séchage est devenue moins importante (la courbe de 0.62 m/s coïncide avec celle de 0.42 m/s); peut être il faudrait jouer sur ce paramètre pour des couches dont les épaisseurs sont importantes. Enfin, comme pour la cinétique, l'effet de l'humidité relative de l'air asséchant est négligeable.



**CONCLUSION
GÉNÉRALE**

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail est une contribution modeste à l'étude unidimensionnelle des phénomènes de transferts couplés de chaleur et de masse dans des milieux poreux humides traversés par des courants d'air chaud lors d'un séchage convectif de produits agro – alimentaires en couche épaisse avec une approche macroscopique.

Le produit choisi est un fruit (les figues) dont la géométrie est considérée comme sphérique mais changeant pendant le processus de séchage, ce qui a ramené à considérer le phénomène de rétrécissement qui n'est pas toujours pris en considération dans la majorité des travaux antérieurs.

L'étude de la cinétique de séchage des figues a confirmé l'importance de la prise en considération de cette hypothèse tout en faisant une comparaison entre deux calculs, l'un avec shrinkage et l'autre sans , à fin de voir l'effet de ce phénomène sur les courbes de séchage.

Le calcul de la vitesse de l'air dans le milieu poreux a pu montrer qu'elle n'est pas constante pendant le séchage.

Cette même étude a pu montrer, également, l'absence de la phase constante du séchage, en effet la déshumidification du fruit humide a lieu dans la période de chute de taux.

Par les résultats obtenus, sont tracées toutes les évolutions temporelles et spatiales possibles de la teneur en eau du produit M , du taux de séchage $\frac{dM}{dt}$, de la température du produit T_s , de l'humidité absolue de l'air W , et de sa température T_a .

L'étude paramétrique a mis en évidence l'effet des paramètres de l'air asséchant sur tout le processus de séchage en commençant par la cinétique.

Ces paramètres sont la température, la vitesse et l'humidité relative.

La température est le paramètre le plus influent en donnant à l'air, par son augmentation, un pouvoir évaporateur plus important et par conséquent, la quantité d'eau évaporée croît et le temps de séchage se réduit.

La vitesse vient en deuxième position, mais c'est un paramètre qui serait peut être préférable de le faire augmenter dès que la couche à sécher est plus épaisse, par contre l'humidité relative reste un paramètre dont l'effet et l'influence sont négligeables.

C'est, donc, une étude qui a montré que les transferts de chaleur et de matière dépendent principalement des caractéristiques de l'air asséchant, ce qui conduit à bien choisir les conditions de séchage dans le but d'une optimisation énergétique.

Pour terminer, on juge très intéressant le développement d'une étude aéraulique à l'intérieur du produit humide à sécher.



ANNEXES

ANNEXE A

CARACTÉRISATION DES GAZ DE SÉCHAGE

Le gaz de séchage le plus utilisé est l'air, d'ailleurs c'est lui-même qui a été utilisé dans ce travail ; les principales définitions et relations concernant ce dernier – dont la connaissance a été indispensable pour traiter notre problème de séchage – sont rassemblées dans cette annexe.

A-1-COMPOSITION DE L'AIR HUMIDE: [1,61]

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

Cet air humide et ses composants sont assimilés à des gaz parfaits avec une précision suffisante dans notre domaine d'utilisation. (pour la vapeur d'eau, même à l'état saturé, aux températures inférieures à 100 °C, l'erreur commise est inférieure à 1 %).

Soit une masse m_{ah} d'air humide occupant à la température T_{abs} un volume V sous une pression P . On a :

$$P = \sum_i P_i \quad \text{avec} \quad P_i = N_i \cdot \frac{R_g \cdot T}{V}$$

P_i est la pression partielle du gaz i dans le mélange (Loi de DALTON).

et

$$\rho = \sum_i \rho_i \quad \text{avec} \quad \rho_i = \frac{m_i}{V}$$

ρ_i est la masse volumique du gaz i .

où : m_i est la masse du gaz i dans le mélange;

ρ est la masse volumique du mélange;

N_i est le nombre de moles du gaz i .

En posant :

m_v : Masse de vapeur dans le volume V du mélange;

$m_{a\text{sec}}$: Masse d'air sec dans le volume V du mélange.

On a : $m_{ah} = m_v + m_{a\text{sec}}$

A-2. HUMIDITÉS DE L'AIR :**A-2-1. HUMIDITÉ RELATIVE :** [1, 5, 13,61]

En posant :

ρ_v : Masse volumique de la vapeur;

$\rho_{a\text{sec}}$: Masse volumique de l'air sec;

ρ_{vsat} : Masse volumique de la vapeur saturée.

L'humidité relative de l'air humide est, par définition, le rapport :

$$\phi = 100 \cdot \frac{\rho_v}{\rho_{vsat}}$$

ou aussi:

$$\phi = 100 \cdot \frac{\rho_v}{\rho_{vsat}} = 100 \cdot \frac{m_v \cdot V}{V \cdot m_{vsat}}$$

$$\text{avec: } P_v = N_v \cdot \frac{R_g \cdot T_{abs}}{V} = \frac{m_v}{M_v} \cdot \frac{R_g \cdot T_{abs}}{V} \quad ; \quad m_v = \frac{M_v \cdot V}{R_g \cdot T_{abs}} \cdot P_v \quad ;$$

$$\frac{m_v}{V} = \frac{P_v \cdot M_v}{R_g \cdot T_{abs}} = \rho_v$$

par suite:

$$\phi = 100 \cdot \frac{M_v \cdot V \cdot P_v}{R_g \cdot T_{abs}} \cdot \frac{R_g \cdot T_{abs}}{M_{vsat} \cdot V \cdot P_{vsat}} = 100 \cdot \frac{M_v}{M_{vsat}} \cdot \frac{P_v}{P_{vsat}} \approx 100 \cdot \frac{P_v}{P_{vsat}}$$

car $M_v \approx M_{vsat}$

avec : M_v étant la masse moléculaire de la vapeur (18.02 g) ;

M_{vsat} étant la masse moléculaire de la vapeur saturée.

P_{vsat} étant la pression de l'eau pure encore appelée pression de vapeur saturante;

d'après [1, 6, 19], P_{vsat} (pression, à une température T donnée) est donnée par la formule empirique suivante de **BERTRAND**:

$$P_{vsat} = 10^{\left(\frac{17.443}{T_{abs}} - 3.868 \cdot \log T_{abs} \right)} \quad [\text{atm}]$$

Cette formule, pour l'eau, est valable entre 0 °C et 200 °C [1]

Nota:

La valeur de l'humidité relative de l'air peut être représentée également par le rapport

$\frac{\phi}{100}$ qui n'est pas exprimé en pourcentage et en posant : $\Phi = \frac{\phi}{100}$, Φ est un

nombre décrivant l'intervalle réel $[0,1]$; il est appelé degré hygrométrique de l'air.

Pour un air humide saturé:

$$P_v = P_{vsat} \quad \text{et par conséquent} \quad \Phi = 1$$

Pour un air parfaitement sec:

$$P_v = 0 \quad \text{et par conséquent} \quad \Phi = 0$$

Pour un air humide quelconque:

$$P_v < P_{vsat} \quad \text{et par conséquent} \quad \Phi < 1$$

A-2-2. HUMIDITÉ ABSOLUE OU TENEUR EN EAU:

[1, 6, 13,19]

L'humidité absolue ou la teneur en humidité de l'air humide est, par définition, le rapport :

$$W = \frac{P_v}{P_{a \text{ sec}}}$$

Si $M_{a \text{ sec}}$ est la masse moléculaire de l'air sec (28.97 g), il vient:

$$W = \frac{P_v}{P_{a \text{ sec}}} = \frac{m_v}{m_{a \text{ sec}}} = \frac{M_v \cdot P_v}{M_{a \text{ sec}} \cdot P_{a \text{ sec}}} = \frac{18.02}{28.97} \cdot \frac{P_v}{P_{a \text{ sec}}} = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_{a \text{ sec}}} = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_{ah} - P_v}$$

soit :

$$W = 0.622 \frac{\Phi \cdot P_{vsat}}{P_{ah} - \Phi \cdot P_{vsat}}$$

$$\text{généralement : } P_{ah} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} \quad [1]$$

d'où :

$$\Phi = \frac{101325 \cdot W}{(0.622 + W) \cdot P_{vsat}}$$

A-3. CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION :

La chaleur latente de vaporisation d'eau, d'après [1, 13, 20,25], est:

$$H = 2253.43 \times 10^3 \quad [\text{J} / \text{Kg}]$$

A-4. TEMPÉRATURES : [1, 13,62]

Un des méthodes les plus anciennes et les plus connues de déterminer l'humidité d'un gaz est de mesurer sa température humide et sa température sèche.

A-4-1. TEMPÉRATURE SÈCHE :

C'est la température d'un mélange de gaz et de vapeur déterminée, comme d'habitude, par l'immersion d'un thermomètre dans le mélange.

A-4-2. TEMPÉRATURE HUMIDE:

La température humide est la température régulière atteinte par un peu de liquide s'évaporant dans une grande quantité de mélange insaturé de gaz et de vapeur en mouvement rapide, elle est mesurée en passant le gaz rapidement par une ampoule de thermomètre maintenue humide par une mèche saturée et protégée des effets du rayonnement

A-5- CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DE L'AIR :

La conductivité thermique de l'air humide a été calculée en utilisant la formule: [1,6]

$$\lambda = 0.0243 + 9.74167 \cdot 10^{-5} \cdot T_a - 0.1825 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^2 + 0.00227 \cdot 10^{-5} \cdot T_a^3 + 0.00476 \cdot \frac{C_v}{1 - C_v}$$

$$\text{avec : } C_v = \frac{W}{1 + W} \quad [1]$$

A-6- MASSE VOLUMIQUE :

La masse volumique de l'air humide a été calculée en utilisant l'équation suivante (MAAKE, ECKERT et CAUCHEPIN, 1993): [6,19]

$$\rho_{ah} = \frac{348.3}{T_{abs}} \cdot P_{ah} - \Phi \cdot P_{vsat} \cdot \frac{131.6}{T_{abs}}$$

Ensuite, on a d'après [1, 6,19]:

$$\rho_{a sec} = \frac{\rho_{ah}}{1 + W} \quad \text{et} \quad \rho_v = \rho_{ah} - \rho_{a sec}$$

A-7- VISCOSITÉ DYNAMIQUE:

La viscosité dynamique de l'air humide a été calculée en utilisant les équations suivantes (LAMPINEN et OJALA, 1993): [6,19]

$$\mu_{ah} = \frac{\mu_{a \text{ sec}} \cdot \rho_{a \text{ sec}} + \mu_v \cdot \rho_v}{\rho_{a \text{ sec}} + \rho_v}$$

$$\mu_{a \text{ sec}} = \frac{1.448 \cdot \sqrt{T_{abs}}}{1 + \frac{110.4}{T_{abs}}} \cdot 10^{-6}$$

$$\mu_v = (0.0361 T_{abs} - 1.02) \cdot 10^{-6}$$

A-8- CHALEURS SPÉCIFIQUES :

Pour l'air : d'après [1, 6, 20, 25,63]

$$CP_a = 1005 \quad [J / Kg. K]$$

Pour la vapeur d'eau : d'après [1, 20, 25,63]

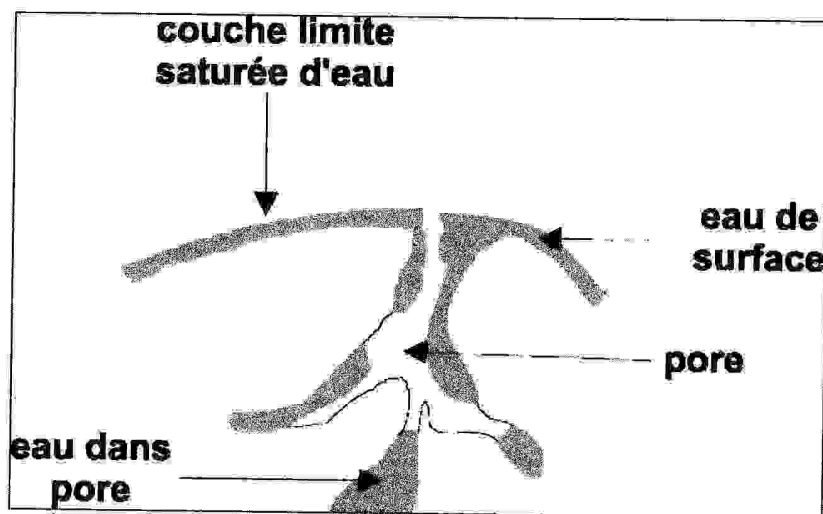
$$CP_v = 1883 \quad [J / Kg. K]$$

ANNEXE B

CARACTÉRISATION DES SOLIDES HUMIDES :

B-1. DESCRIPTION D'UN SOLIDE HUMIDE:

Avant d'être séché, un solide humide peut se schématiser comme suit :



SCHÉMATISATION D'UN SOLIDE HUMIDE [64]

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à sa périphérie est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température. On doit préciser, ici, que le séchage d'un corps consiste à enlever toute l'eau (dite humidité) autre que son eau d'hydratation dont l'enlèvement revient à détruire le corps (et on veut dire par là l'eau liée chimiquement par association moléculaire ou encore celle insérée dans un réseau cristallin).

B-2. HUMIDITÉS D'UN SOLIDE HUMIDE:

L'humidité d'un solide (ou teneur en eau) caractérise son état de siccité et est, par définition, la masse d'eau en Kg associée à 1 Kg de solide sec (c'est l'expression d'un rapport massique, noté M) ; on utilise fréquemment des pourcentages ; mais cette teneur en eau peut être, aussi, exprimée par rapport à la masse totale de produit (elle est notée M')

On a: [1, 13, 48]

$$M = m_e + m_{ssec}$$

$$M = \frac{m_e}{m_{ssec}} = \frac{m_{sh} - m_{ssec}}{m_{ssec}}$$

$$M' = \frac{m_e}{m_e + m_{ssec}} = \frac{m_{sh} - m_{ssec}}{m_{sh}}$$

$$M = \frac{M'}{1 - M'} \quad [9, 13]$$

$$M' = \frac{M}{1 + M} \quad [9, 13]$$

B-3. ACTIVITÉ DE L'EAU:

L'activité de l'eau a_w caractérise les liaisons de l'eau avec la matrice solide.

Elle dépend de :

- la composition du produit
- la teneur en eau
- la température (dans une moindre mesure)

Elle est liée à la pression de vapeur d'eau du produit humide, P_v (exprimée en Pa),

par la relation : [1,9] (a_w varie entre 0 et 1)

$$a_w = \frac{P_v}{P_{vsat}}$$

L'équilibre thermique et hydrique entre un produit et l'atmosphère qui l'entoure est défini par les deux égalités suivantes : [9,45]

$$\begin{cases} T_a = T_s \\ \Phi = a_w \end{cases}$$

B-4. HYGROSCOPICITÉ :

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit.

Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel à l'équilibre la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide si il était seul dans une enceinte).

Un solide devient hygroscopique quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1.

Ce comportement est dû principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

ANNEXE C

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES FIGUES :

C-0. DIAGRAMME DE FABRICATION DES FIGUES SÈCHES:

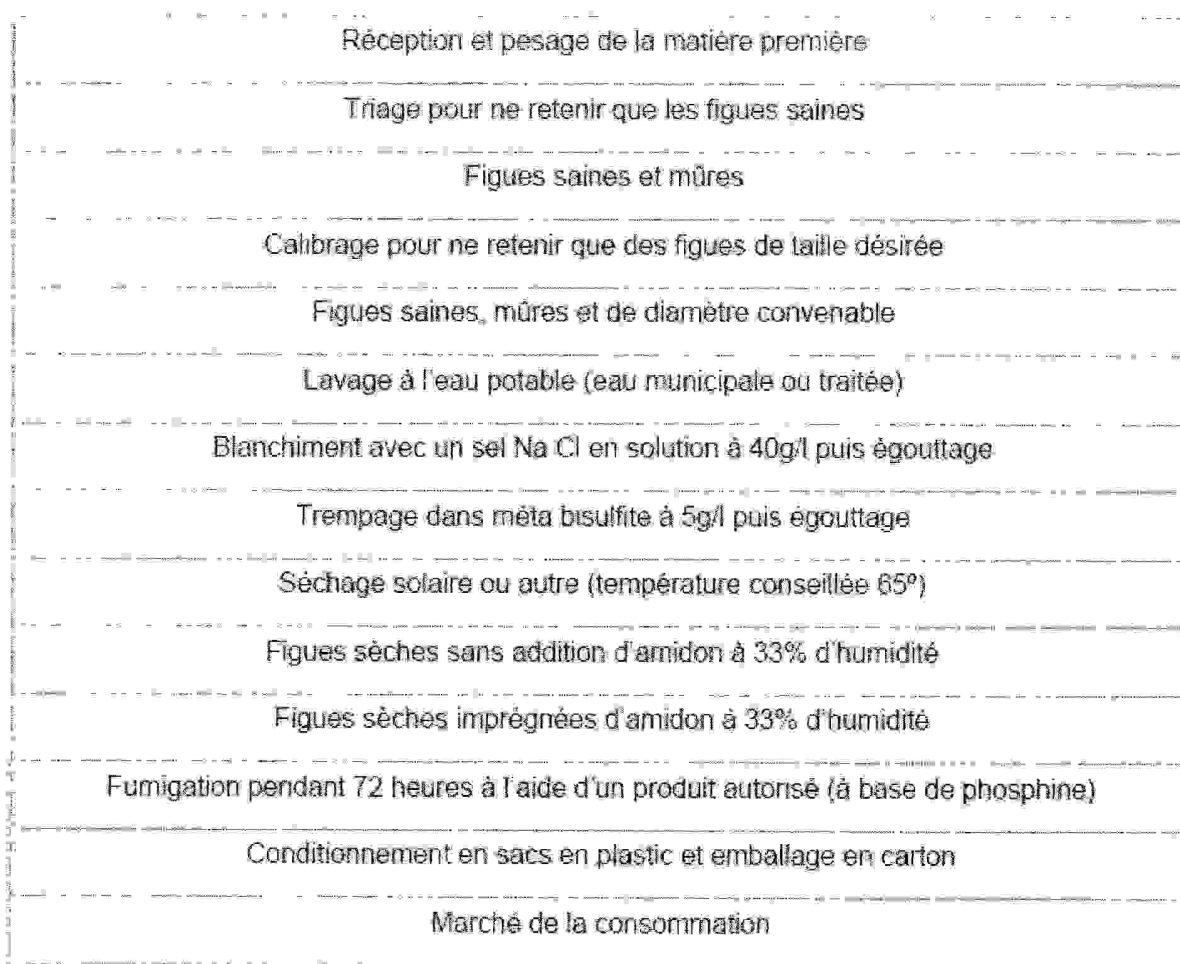


DIAGRAMME DE FABRICATION DES FIGUES SÈCHES

(D'après [65])

C-1. CHALEUR SPÉCIFIQUE DES FIGUES :

Il est important de savoir et d'étudier les caractéristiques physiques et biologiques du produit humide à sécher à cause de leurs changements pendant le processus de séchage (Les valeurs initiales concernant les figues sont données d'après [57, 65, 19] et montrées dans le tableau ci-dessous):

i	Composants d'après [57,65]	Pourcentages [%] d'après [57]	Masses volumiques ρ_i [Kg/m ³] d'après [19]
1	Eau	79.11	1000
2	Carbohydate	19.18	1500
3	Lipides	0.30	930
4	Protéines	0.75	1400
5	Autres	0.66	1850

*** La chaleur spécifique des figures a été calculée en utilisant l'expression (SINGH,1996) [18,19]

$$CP_s = 1.424 m_2 + 1.549 m_4 + 1.675 m_3 + 0.837 m_5 + 4.187 m_1$$

Pour l'eau, et d'après [1, 20,25], La chaleur spécifique est:

$$CP_e = 4187 \quad \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$$

C-2. MASSE VOLUMIQUE DES FIGURES :

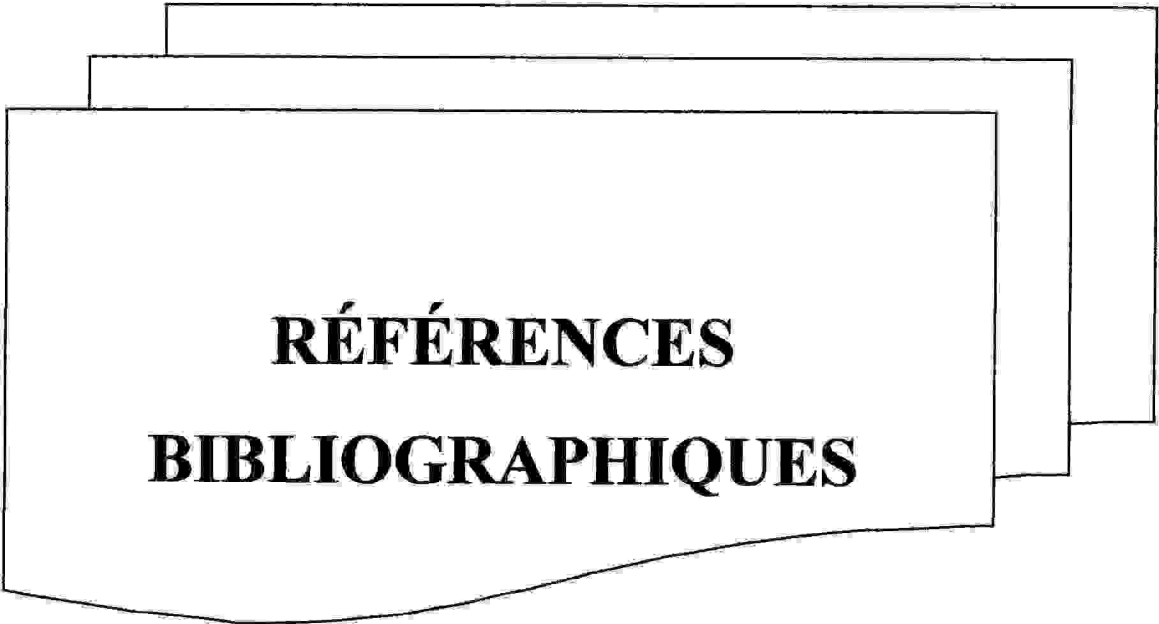
*** D'après [19], la masse volumique des figures a été exprimée en fonction de ses composants comme suit (MAY et PERRÉ, 2002):

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^5 M_i}{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{M_i}{\rho_i} \right)}$$

C-3. LA SURFACE SPÉCIFIQUE:

*** D'après [1], La surface spécifique (ou taux de surface de contact) $A1$ est (voir CHAPITRE I):

$$A1 = \frac{6 (1 - \varepsilon)}{ds}$$



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] MICHEL DAGUENET.

"Les séchoirs solaires: théorie et pratique", UNESCO (1985).

[2] P. RAZOUS.

"Théorie et pratique du séchage industriel", 6^{ème} édition Paris DUNOD (1955).

[3] CZESLAW STRUMILLO and TADEUSZ KUDRA.

"Drying: Principles, Applications and Design", Gordon and Breach Science Publishers (1986).

[4] SOTEHI NASSIMA.

"Étude des Transferts de Chaleur et de Masse dans les Milieux Poreux Humides: Application au séchage", Mémoire de Magister – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences – Département de Physique (2003).

[5] FATIMA ZEMMOURI.

"Contribution à l'étude des transferts de chaleur et de masse dans un séchoir continu", Mémoire de Magister – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences de l'ingénieur – Département de Génie Climatique (2005).

[6] LYES BENNAMOUN.

"Simulation Numérique d'un séchoir solaire – Adaptation au Climat Local", Mémoire de Magister – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences – Département de Physique (2001).

[7] LYES BENNAMOUN.

"Contribution à l'étude des transferts couplés avec changement de phase dans un milieu poreux. Influence des conditions d'air sur les cinétiques de séchage et le comportement global d'un séchoir solaire"

Thèse de Doctorat – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences de l'ingénieur – Département de Génie climatique (2006).

[8] ANDRÉ CHARREAU et ROLAND CAVAILLÉ.

"Séchage: II. Appareillage et Choix d'un Procédé", Techniques de l'ingénieur – Traité Génie et Procédés Chimiques – J 2482 (1991).

[9] CATHERINE BONAZZI et JEAN-JACQUES BIMBENET.

"Séchage des Produits Alimentaires: Principes", Techniques de l'ingénieur – Traité Agro-alimentaire – F 3000 (2003).

[10] ANDRÉ CHARREAU et ROLAND CAVAILLÉ.

"Séchage: I. Théorie et Calculs", Techniques de l'ingénieur – Traité Génie et Procédés Chimiques – J 2480 (1991).

[11] FRANÇOIS VACHET.

"Opérations Unitaires: III. Séchage dans l'Industrie Chimique", Techniques de l'ingénieur – Traité Génie des Procédés - J 2483 (1993).

[12] SERGE BORIES et MARC PRAT.

"Transferts de Chaleur dans les Milieux Poreux", Techniques de l'ingénieur – Traité Génie énergétique - B 8250 (1995).

[13] M.N ZIDOUNE.

"Le Séchage", Extrait du Cours de Génie Industriel Alimentaire (Filière Ingénieurs), Éditions de l'Université Mentouri –Constantine (2001 – 2002).

[14] ARUN S. MUJUMDAR.

"Principles, Classification, and Selection of Dryers" Part I : Fundamental Aspects (2006) by Taylor & Francis Group, LLC.

[15] J. VAN. BRAKEL.

"Mass Transfer in Convective Drying", *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing New York (1980), pp 217-265.

[16] H. AMIR , G. LE PALEC et M. DAGUENET.

"Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud:couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite", *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 30, No. 6, pp. 1149 – 1158, (1987).

[17] A. MHIMID , S. BEN NASRALLAH , J. P. FOHR .

"Heat and mass transfer during drying of granular products – simulation with convective and conductive boundary conditions", *International Journal of HEAT and MASS TRANSFER* 43 (2000) 2779 – 2791.

[18] LYES BENNAMOUN and AZEDDINE BELHAMRI.

"Design and simulation of a solar dryer for agriculture products", *Journal of Food Engineering* 59 (2003) 259 – 266.

[19] LYES BENNAMOUN and AZEDDINE BELHAMRI.

"Numerical simulation of drying under variables external conditions: Application to solar drying of seedless grapes", *Journal of Food Engineering* 76 (2006) 179 – 187.

[20] A. W. AREGBA , P. SEBASTIAN , J. P. NADEAU.

"Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model", *Journal of Food Engineering* 77 (2006) 27 – 40.

[21] G. ARNAUD and J. - P. FOHR.

"Slow drying simulation in thick layers of granular products", *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 31, No. 12, pp. 2517 – 2526 (1988).

[22] C. RATTI and A.S. MUJUMDAR .

"Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal", *Journal of Food Engineering* 26 (1995) 259 – 271.

- [23] A. R. P. KINGSLY , H. R. MEENA , R. K. JAIN , D. B. SINGH .
 "Shrinkage of ber (*Zizyphus Mauritian L.*) fruits during sun drying", *Journal of Food Engineering* 79(2007) 6 – 10.
- [24] STAMATIOS J. BABALIS et VASSILIOS 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.
- [25] A. W. AREGBA , J. P. NADEAU .
 "Comparaison of two non- equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations", *Journal of Food Engineering* 78 (2007) 1174– 1187.
- [26] A. HACHEMI , B. ABED , A. ASNOUN.
 "Theoretical and Experimental study of solar dryer", *Renewable Energy* Vol. 13 No. 4 pp. 439 – 451 (1998).
- [27] DONALD M MONRO.
 "Fortran 77", Edward Arnold (1985).
- [28] N et S TAIBI.
 "La Programmation en Fortran 77:Cours et Exercices résolus", Berti Edition (1992).
- [29] MUSTAPHA LAKRIB.
 "Cours d'Analyse Numérique", OPU (2005).
- [30] A. GORDIN et M. BOUMAH RAT.
 "Méthodes Numériques Appliquées avec nombreux problèmes résolus en Fortran 77", OPU (1991).
- [31] F. COURTOIS , A. LEBER , J. C. LASSERAN and J. J. BIMBENET .
 "Simulation of industriel dryers: solving numerical and computer problems", *Drying '92*, edited by A. S. MUJUMDAR , pp.1268 – 1277, 1992 Elsevier Science Publishers B. V.

[32] JOSEF JILEK.

"Drying Lucerne in a thick layer", Drying ' 91, edited by A. S. MUJUMDAR and I. FILKOVA , pp.435 – 446, (1991) Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

[33] GUY CHAVENT.

"Approximation des Équations Différentielles Partielles", Techniques de l'ingénieur – Traité Sciences Fondamentales – A 550 (1993).

[34] LATIF M. JIJL

"Heat Convection", Library of Congress Control Number: 2005937166
City University of New York / School of Engineering, Dept. of Mechanical Engineering / Convent Avenue at 138th Street 10031 New York, NY USA E-Mail: jijl@ccny.cuny.edu / Library of Congress Control Number: 2005937166 (2006).

[35] PATRICE LIGNELET.

"Fortran", Techniques de l'ingénieur – Traité Informatique – H 2 120 (1993).

[36] PIERRE SPITERI.

"Algorithmes Numériques pour la résolution des grands systèmes", Techniques de l'ingénieur – Traité Sciences Fondamentales – AF 502 (2002).

[37] STAMATIOS J. BABALIS , ELIAS PAPANICOLAOU , NIKOLAS KYRIAKIS , VASSILIOS G. BELESSIOTIS .

"Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*)", Journal of Food Engineering 75 (2006) 205 – 214.

[38] OSMAN YALDIZ, CAN ERTEKIN, H. IBRAHIM UZUN.

"Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana", Energy 26 (2001) 457–465

[39] IBRAHIM DOYMAZ.

"Sun drying of figs: an experimental study", Journal of Food Engineering 71 (2005) 403 – 407.

[40] EBRU KAVAK AKPINAR.

"Determination of suitable thin-layer drying curve model for some vegetables and fruits", *Journal of Food Engineering* 73 (2006) 75 – 84.

[41] A. A. EL- SEBAII , S. ABOUL-ENEIN , M. R. I. RAMADAN ,
H. G. EL- GOHARY .

"Empirical correlation for drying kinetics of some fruits and vegetables", *Energy* 27 pp. 845 – 859 (2002).

[42] GIKURU MWITHIGA , JOSEPH OCHIENG OLWAL.

"The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer"
Journal of Food Engineering 71 (2005) 373 – 378.

[43] G. XANTHOPOULOS , N. OIKONOMOU , G. LAMBRINOS .

"Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs", *Journal of Food Engineering* 81 (2007) 553 – 559.

[44] S. AZZOUZ , A. GUIZANI , W. JOMAA , A. BELGHITH,

"Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes",
Journal of Food Engineering 55 (2002) 323–330.

[45] A. VEGA , P. FITO , A. ANDRES , R. LEMUS.

"Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo);
Journal of Food Engineering 79 (2007) 1460–1466.

[46] INCI TÜRK TOĞRUL , DURSUN PEHLIVAN.

"Modeling of drying kinetics of single apricot", *Journal of Food Engineering* 58
(2003) 23–32.

[47] OUALID CHOUGIAT.

"Étude d'un procédé de séchage agro-alimentaire. Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un séchoir continu"

Mémoire de Magister – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences de l'ingénieur – Département de Génie Climatique (2004).

[48] R.B. KEEY.

"Drying of Loose and Particulate Materials", Hemisphere Publishing Corporation (1992).

[49] M. FORTES and M. R. OKOS.

"Drying theories: Their bases and limitations as applied to foot and grains", Advances in Drying, Hemisphere Publishing New York (1980), pp.119-151.

[50] P. M. CHAUHAN, C. CHOUDHURY and H. P. GARG.

"Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air – heater – cum – rockbed storage", Applied Thermal Engineering Vol. 16, pp. 475 – 486 (1996).

[51] S. TRICHAİYAPORN, D. STEINMETZ, J. L. BAXERRES, D. BARRETEAU, C. LAGUERIE.

"Cane sugar drying in fluized bed", Drying '92, edited by A. S. MUJUMDAR, pp.827 – 833, (1992) Elsevier Science Publishers B. V.

[52] V. T. KARATHANOS and V. G. BELESSIOTIS.

"Sun and Artificial air drying kinetics of some Agricultural products", Journal of Food Engineering 31 (1997) 35 – 46.

[53] S. YOUCEF – ALI, N. MOUMMI, J.Y. DESMONS, A. ABENE, H. MESSAOUDI and M. LE RAY.

"Numerical and experimental study of dryer in forced convection", International Journal of Energy Research. (2001); 25:537-553 (DOI: 10.1002 / er.707).

[54] S. SIMAL, C. ROSSELLÓ, A. BERNA and A. MULET.

"Drying of shrinking cylinder-shaped bodies", Journal of Food Engineering 37 (1988) 423–435.

- [55] L. MAYOR , A.M. SERENO .
 "Modelling shrinkage during convecting drying of food material: a review", *Journal of Food Engineering* 61 (2004) 373–386.
- [56] S. YOUCEF – ALI , H. MESSAOUDI , J.Y. DESMONS , A. ABENE , M. LE RAY.
 "Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices", *Journal of Food Engineering* 48 (2001) 95–101.
- [57] "Figs, raw"
 USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 19 (2006).
- [58] J.C. LAGUERRE , A. LEBERT , G. TRYSTRAM , J.J. BIMBENET.
 "A compartmental model to describe drying curves of foodstuffs under variable conditions" , *Drying* 91, edited by A.S. MUJUMDAR and I. FILKOVÁ , Elsevier Science Publishers , Amsterdam.
- [59] A. BERNA , C. ROSSELLO , J. CAÑELLA et A. MULET .
 "Drying kinetics of a majorcan seedless grape variety" , *Drying* 91 , edited by A.S.MUJUMDAR and I. FILKOVA , Elsevier Science Publishers , Amsterdam.
- [60] C.T. KIRANOUDIS , Z.B. MAROULIS , D. MARINOS-KOURIS.
 "Drying kinetics onion and green pepper, *Drying Technology*, 10 (4), 995-1011 (1992).
- [61] MAURICE BAILLY.
 "Thermodynamique technique – 2a. Production et transfert de la chaleur, écoulements", *Collection études –Série scientifique sous la direction de J. L. BOURSIN – Bordas Paris—Montréal (1971)*.
- [62] Y. BRENIER et J. P. HENNART .
 "Introduction to numerical hyperbolic equations. Cours IIMAS – UNAM.Mexico DF, Mexique (1983).

[63] MAURICE BAILLY.

"Thermodynamique technique – 2b. Machines thermiques et frigorifiques, tables numériques", Collection études –Série scientifique sous la direction de J. L. BOURSIN – Bordas Paris—Montréal (1971).

[64] M.LONCIN.

"Les opérations unitaires du génie chimique : séchage des solides"

[65] A. OUAOUICH et H. CHIMI.

"Guide du sécheur de figues", Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (ONUDI) - première édition (2005).



**LISTE DES FIGURES
PRINCIPALES**

LISTE DES FIGURES PRINCIPALES

Figures	Titres	Pages
(III-17)	Variation de la teneur en eau des figues en fonction du temps au milieu de la couche épaisse $M = f(t)$.	63
(III-18)	Variation du taux de séchage des figues au milieu de la couche épaisse en fonction du temps $\frac{dM}{dt} = f(t)$	64
(III-19)	Variation du taux de séchage des figues mises en couche épaisse en fonction de la teneur en humidité $\frac{dM}{dt} = f(M)$ (Courbe de KRISCHER)	65
(III-20)	Variation de la teneur en eau des figues mises en couche épaisse $M = f(t)$	66
(III-20)	Variation de la teneur en eau des figues mises en couche épaisse $M = f(t)$	67

(III-21)	<p>Variation du taux de séchage des figues mises en couche épaisse en fonction de la hauteur</p> $\frac{dM}{dt} = f(x)$ <p>($T_a = 343 \text{ K}$; $v = 0.52 \text{ m/s}$; $\phi = 16 \%$)</p>	69, 70, 71
(III-22)	<p>Variation du taux de séchage des figues mises en couche épaisse.</p> $\frac{dM}{dt} = f(t)$	72
(III-23)	<p>Effet du rétrécissement sur les calculs de la teneur en eau des figues</p>	74
(III-24)	<p>Effet du rétrécissement sur la porosité et le diamètre des figues.</p>	75
(III-25)	<p>Effet du rétrécissement sur la masse volumique et le diamètre des figues.</p>	76
(III-26)	<p>Effet de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues.</p>	78

<p>(III-27)</p>	<p>Effet de la température de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.</p>	<p>79</p>
<p>(III-28)</p>	<p>Effet de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues à travers la couche épaisse.</p>	<p>80</p>
<p>(III-29)</p>	<p>Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues.</p>	<p>84</p>
<p>(III-30)</p>	<p>Effet de la vitesse de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.</p>	<p>85</p>
<p>(III-30)</p>	<p>Effet de la vitesse de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.</p>	<p>86</p>
<p>(III-31)</p>	<p>Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues à travers la couche épaisse pour trois temps différents</p>	<p>87</p>

(III-32)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues.	88
(III-33)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur le taux de séchage des figues.	89
(III-34)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la teneur en eau des figues à travers la couche épaisse pour trois temps différents.	90
(IV-1)	Variation de l'humidité absolue de l'air dans le temps et pour plusieurs hauteurs.	94
(IV-2)	Variation de l'humidité absolue de l'air dans le temps. (Au milieu et à la sortie du séchoir)	95
(IV-3)	Variation de la température de l'air dans le temps pour plusieurs hauteurs.	96
(IV-4)	Variations temporelles de l'humidité absolue de l'air et de sa température.	97

(IV-5)	<p>Variation de la température de l'air pour plusieurs hauteurs. (À quatre temps différents)</p>	98
(IV-6)	<p>Variation de la température de l'air dans le temps, au milieu et à la sortie du séchoir</p>	99
(IV-7)	<p>Variation de la température des figues et pour plusieurs hauteurs</p>	101
(IV-8)	<p>Variation de la température de figues pour plusieurs hauteurs (À quatre temps différents)</p>	102
(IV-9)	<p>Variation de la température des figues dans le temps. (À l'entrée, au milieu et à la sortie du séchoir)</p>	103 , 104
(IV-10)	<p>Variations temporelles de la teneur en eau du produit et de sa température.</p>	105
(IV-11)	<p>Effet de la température de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air.</p>	107

(IV-12)	Humidité absolue de l'air pour plusieurs températures. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	108
(IV-13)	Effet de la température de l'air asséchant sur la température de l'air. (À trois temps différents)	110
(IV-14)	Température de l'air pour plusieurs températures. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	111
(IV-15)	Effet de la température de l'air asséchant sur la température des figues.	113
(IV-16)	Température des figues pour plusieurs températures. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	114
(IV-17)	Effet de la vitesse de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air. (À quatre temps différents)	115
(IV-18)	Humidité absolue de l'air pour plusieurs vitesses. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	117

(IV-19)	Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la température de l'air.	118
(IV-20)	Température de l'air pour plusieurs vitesses à $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir.	119
(IV-21)	Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la température des figues.	120
(IV-22)	Température des figues pour plusieurs vitesses. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	121
(IV-23)	Humidité absolue de l'air pour plusieurs humidités relatives. (À $x = 0.08$ m et à la sortie du séchoir)	122
(IV-24)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur l'humidité absolue de l'air.	123
(IV-25)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la température de l'air.	124

(IV-26)	Température de l'air pour plusieurs humidités relatives. (À $x = 0,08$ m et à la sortie du séchoir)	125
(IV-27)	Effet de l'humidité relative de l'air asséchant sur la température des figues.	126
(IV-28)	Température des figues pour plusieurs humidités relatives. (À $x = 0,08$ m et à la sortie du séchoir)	127



RÉSUMÉS

RÉSUMÉ

Le processus du séchage industriel est étroitement lié à la connaissance et à la maîtrise des phénomènes de transferts couplés de chaleur et de masse se produisant entre l'air asséchant et le produit humide à sécher.

Sécher des matériaux humides est un processus compliqué impliquant toujours ces phénomènes simultanés et couplés.

Ce mémoire est une contribution modeste à l'analyse de ces phénomènes complexes, il s'intéresse au séchage d'un fruit (**les figues**) déposé en couche épaisse et exposé à une convection forcée d'air. Le milieu se comporte comme étant poreux et ce sont, par conséquent, les équations de transferts dans un milieu poreux qui décrivent le transfert couplé de chaleur et de masse.

L'étude est développée à l'échelle macroscopique avec un empilement de sphères du fruit et le phénomène du rétrécissement (Shrinkage) est pris en considération au cours du processus de séchage **dont l'importance n'est perçue que par les spécialistes dans le domaine.**

Le modèle utilisé est un **modèle de séchage (E.D.P) (Équations aux Dérivées Partielles)** basé sur les équations des bilans massique et énergétique et notamment sur l'utilisation des corrélations proposées pour la constante de séchage **K** avec **l'hypothèse du Non Équilibre Thermique Local (N.L.T.E).**

L'analyse théorique du séchage du lit statique mène à un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui sont discrétisées par la méthode des différences finies.

Pour la résolution de ce système d'équations, la méthode itérative de **Gauss-Seidel** est utilisée grâce aux avantages qu'elle présente et un code de calcul en **Fortran** est ensuite développé.

L'ensemble des résultats obtenus montre l'absence de la phase constante de séchage et permet de mettre en évidence l'effet du rétrécissement sur les résultats de la cinétique de séchage d'une part et celui des conditions extérieures sur le processus de séchage tout entier d'autre part lors d'une étude paramétrique.

Mots clés:

Le séchage - les figues - l'air asséchant - le milieu poreux - l'échelle macroscopique - la convection forcée - la couche épaisse - les transferts de chaleur et de masse - le modèle E.D.P.

ABSTRACT

The process of industrial drying is closely related on the knowledge and the control of the phenomena of coupled transfers of heat and mass occurring between the draining air and the wet product to dry.

To dry of wet materials is a complicated process always implying these simultaneous and coupled phenomena.

This memoir is a modest contribution to the analysis of these complex phenomena, it is interested in drying of a fruit (**figs**) deposited in thick layer and exposed to a forced convection of air. The medium behaves as being porous and they are, consequently, the equations of transfers in a porous media which describe the coupled transfer of heat and mass.

The study is developed on a macroscopic scale with a stacking of spheres and the phenomenon of the contracting (Shrinkage) is taken into account during the process of drying **whose importance is perceived only by the specialists in the field.**

The model used is **a model of drying (P.D.E) (Partial Differential Equations)** based on the equations of the assessments mass and energy and in particular on the use of the correlations suggested for the constant of drying **K** with **the assumption of Non Local Thermal Equilibrium (N.L.T.E).**

The theoretical analysis of the drying of the static bed leads to a whole of partial differential equations which are discretized by the finite differences method.

For the resolution of this system of equations, the iterative method of **Gauss-Seidel** is used thanks to the advantages which it has and a computer code in **FORTRAN** is then developed.

The whole of the results obtained shows the absence of the constant phase of drying and makes it possible to highlight the effect of the shrinkage on the results of the kinetics of drying on the one hand and that of the external conditions on the process of entire drying on the other hand in a parametric study.

Key words:

The drying - the figs - the draining air - the porous media - the macroscopic scale - the forced convection - the thick layer - the heat and mass transfer - the E.D.P model.

ملخص

إنّ عمليّة التّجفيف الصّناعي مرتبطة ارتباطاً دقيقاً بمعرفة ظاهريّ الانتقال المزدوج للحرارة و الكتلة اللتين تحدثان بين الهواء المجفف و المادّة المبلّلة المزمع تجفيفها كما هي مرتبطة بالتّحكّم فيهما.

تجفيف الموادّ المبلّلة هو عمليّة معقّدة تستلزم دائماً هاتين الظاهرتين المتزامنتين والمزدوجتين.

إنّ هذه المذكرة إسهام متواضع في تحليل هاتين الظاهرتين المعقدتين فهي تتناول تجفيف فاكهة (التّين) موضوعة في طبقة سميكة و معرضة لحمل حراريّ قسريّ من قبل الهواء. يتصرّف الوسط كوسط مساميّ و عليه فإنّ معادلات الانتقال داخل وسط مساميّ هي الكفيلة بوصف الانتقال المزدوج للحرارة و الكتلة.

و لقد أنجزت الدراسة وفق سلّم عيانيّ و باعتبار تكدّس لكرات الفاكهة كما أنّه قد أخذت بعين الاعتبار ظاهرة التقلّص خلال عمليّة التّجفيف و التي لا يقدر أهميتها إلاّ المتخصّصون.

التمودج المستعمل هو نموذج التّجفيف (م.م.ج) (معادلات ذات المشتقات الجزئية) المرتكز أساساً على معادلات الموازنات الكتليّة و الطاقويّة و لاسيّما على استعمال الارتباطات المقترحة فيما يخصّ ثابت التّجفيف K مع فرضيّة عدم التّوازن الحراريّ المحليّ (ع.ت.ح.م).

يؤدّي التحليل النظريّ للتّجفيف إلى مجموعة من المعادلات ذات المشتقات الجزئية و التي تحلّ بطريقة الفوارق المنتهية. لحلّ جملة المعادلات استعملت طريقة غوص- سيدال لما تقدّمه من مزايا و بعدها تمّ إنجاز برنامج حساب بالفر ترون.

إنّ مجموعة النتائج المتحصّل عليها تبين غياب الطور الثابت للتّجفيف كما توضّح تأثير التقلّص على النتائج من جهة و تأثير السّروط الخارجيّة على عمليّة التّجفيف بأكمله من جهة أخرى و ذلك من خلال دراسة تغيّر العوامل.

كلمات مفتاحية :

التّجفيف- التّين- الهواء المجفف- الوسط المساميّ- السلّم العيانيّ- الحمل الحراريّ القسريّ- الطبقة السميكة- انتقال الحرارة و الكتلة- التمودج (م.م.ج).

RÉSUMÉ

Le processus du séchage industriel est étroitement lié à la connaissance et à la maîtrise des phénomènes de transferts couplés de chaleur et de masse se produisant entre l'air asséchant et le produit humide à sécher.

Sécher des matériaux humides est un processus compliqué impliquant toujours ces phénomènes simultanés et couplés.

Ce mémoire est une contribution modeste à l'analyse de ces phénomènes complexes, il s'intéresse au séchage d'un fruit (**les figues**) déposé en couche épaisse et exposé à une convection forcée d'air. Le milieu se comporte comme étant poreux et ce sont, par conséquent, les équations de transferts dans un milieu poreux qui décrivent le transfert couplé de chaleur et de masse.

L'étude est développée à l'échelle macroscopique avec un empilement de sphères du fruit et le phénomène du rétrécissement (Shrinkage) est pris en considération au cours du processus de séchage **dont l'importance n'est perçue que par les spécialistes dans le domaine.**

Le modèle utilisé est un **modèle de séchage (E.D.P) (Équations aux Dérivées Partielles)** basé sur les équations des bilans massique et énergétique et notamment sur l'utilisation des corrélations proposées pour la constante de séchage **K** avec **l'hypothèse du Non Équilibre Thermique Local (N.L.T.E).**

L'analyse théorique du séchage du lit statique mène à un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui sont discrétisées par la méthode des différences finies.

Pour la résolution de ce système d'équations, la méthode itérative de **Gauss-Seidel** est utilisée grâce aux avantages qu'elle présente et un code de calcul en **Fortran** est ensuite développé.

L'ensemble des résultats obtenus montre l'absence de la phase constante de séchage et permet de mettre en évidence l'effet du rétrécissement sur les résultats de la cinétique de séchage d'une part et celui des conditions extérieures sur le processus de séchage tout entier d'autre part lors d'une étude paramétrique.

Mots clés:

Le séchage - les figues - l'air asséchant - le milieu poreux - l'échelle macroscopique - la convection forcée - la couche épaisse - les transferts de chaleur et de masse - le modèle E.D.P.