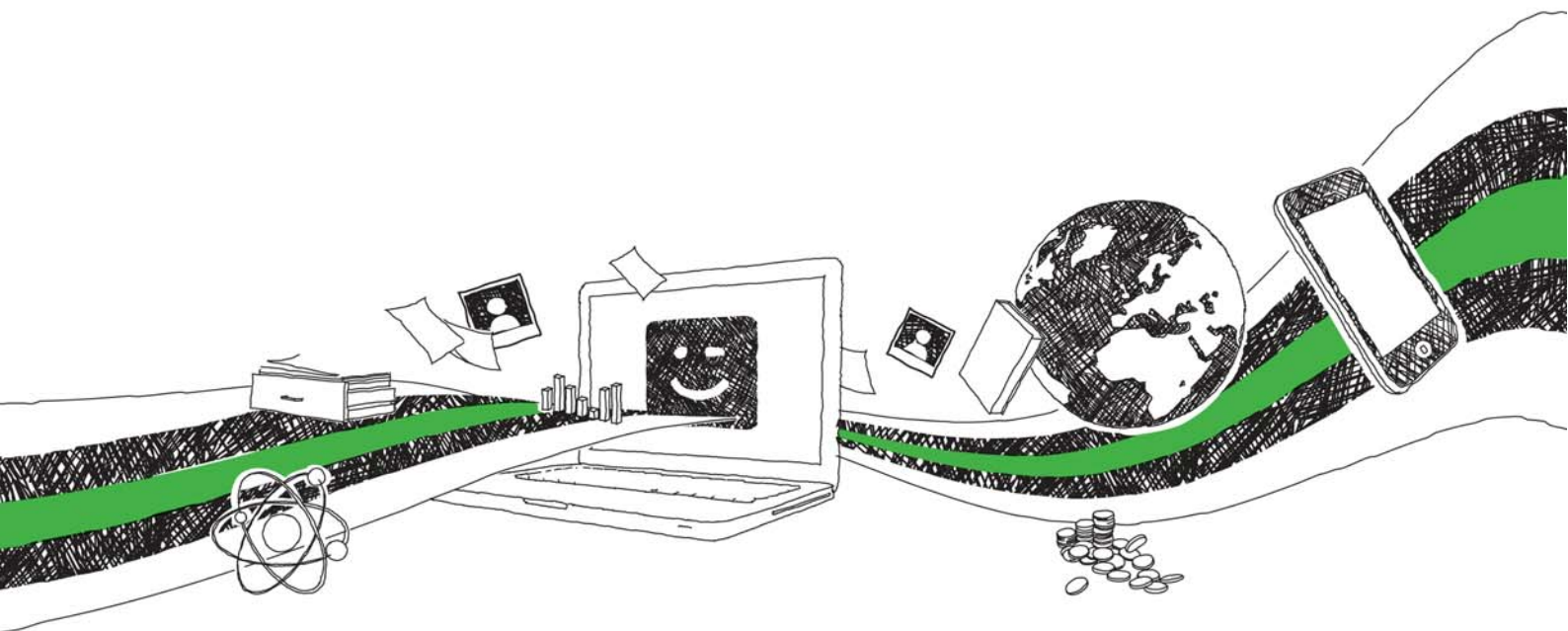


**Harmel Obami-Ondon**

Le palmier raphia hookeri. Effet des conditions de sechage sur la cinetique de sechage du rachis

**Thèse de Master**

# SUR GRIN VOS CONNAISSANCES SE FONT PAYER



- Nous publions vos devoirs et votre thèse de bachelor et master
- Votre propre eBook et livre – dans tous les magasins principaux du monde
- Gagnez sur chaque vente

Téléchargez maintenant sur [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com)  
et publiez gratuitement



**Bibliographic information published by the German National Library:**

The German National Library lists this publication in the National Bibliography; detailed bibliographic data are available on the Internet at <http://dnb.dnb.de> .

This book is copyright material and must not be copied, reproduced, transferred, distributed, leased, licensed or publicly performed or used in any way except as specifically permitted in writing by the publishers, as allowed under the terms and conditions under which it was purchased or as strictly permitted by applicable copyright law. Any unauthorized distribution or use of this text may be a direct infringement of the author's and publisher's rights and those responsible may be liable in law accordingly.

**Imprint:**

Copyright © 2015 GRIN Verlag  
ISBN: 9783346527912

**This book at GRIN:**

<https://www.grin.com/document/1130781>

**Harmel Obami-Ondon**

**Le palmier raphia hookeri. Effet des conditions de sechage sur la cinetique de sechage du rachis**

## **GRIN - Your knowledge has value**

Since its foundation in 1998, GRIN has specialized in publishing academic texts by students, college teachers and other academics as e-book and printed book. The website [www.grin.com](http://www.grin.com) is an ideal platform for presenting term papers, final papers, scientific essays, dissertations and specialist books.

### **Visit us on the internet:**

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

[http://www.twitter.com/grin\\_com](http://www.twitter.com/grin_com)

**UNIVERSITE MARIEN NGOUABI**

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
POLYTECHNIQUE**

**CHAIRE UNESCO EN SCIENCES  
DE L'INGENIEUR**

**MEMOIRE**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Mention : **Sciences de l'Ingénieur**

Parcours : **Mécanique, Énergétique et Ingénierie**

Spécialité /Option : **Mécanique des matériaux et Ingénierie**

Présenté et Soutenu publiquement

Le 16 décembre 2015

par

**OBAMI-ONDON Harmel**

Titulaire du Diplôme d'Ingénieur en Métallurgie

TITRE

**EFFET DES CONDITIONS DE SECHAGE SUR LA CINETIQUE  
DE SECHAGE DU RACHIS DU PALMIER RAPHIA *HOOKERI*.**

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration des maisons en rachis du palmier raphia hookeri.....	3
Figure 2: Schéma simplifié d'une installation micro-ondes monomode progressive.....	14
Figure 3 : Schéma simplifié de la méthode adoptée.....	26
Figure 4 : Cinétique de séchage du rachis n°1 à 126W .....	31
Figure 5 : Cinétique de séchage du rachis n°1 à 406W.....	32
Figure 6 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 40°C .....	33
Figure 7 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 50°C.....	33
Figure 8 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 90°C.....	34
Figure 9 : Cinétique de séchage à l'air libre.....	35
Figure 10 (a, b, c, d, e, f): Modélisation des courbes à 126W.....	37
Figure 11 (a, b, c, d, et e): Modélisation des courbes à 406W.....	40
Figure 12 (a, b, c, d, et e): Modélisation des courbes à 40°C.....	43
Figure 13 - 1 (a, b, c, d, e et f): Modélisation des courbes à 50°C.....	45
Figure 13 - 2 (a, b, c, d, e et f): Modélisation des courbes à 90°C.....	48
Figure 14 (a, b, c et d): Modélisation des courbes de la cinétique de séchage à l'air libre.....	63

## LISTE DES TABLEAUX

Tableaux I : Caractéristique des échantillons.....	23
Tableau II : Noms et équations des modèles.....	28
Tableau III : Le récapitulatif des temps de séchage à l'étuve, au four à Micro-onde et à l'air libre.....	36
Tableau IV : Valeurs des coefficients de Détermination ( $R^2$ ) et Chi-carré ( $X^2$ ) des modèles utilisés à l'air libre, à 40, 50 et 90°C.....	52
Tableau V : Valeurs des coefficients de Détermination ( $R^2$ ) et Chi-carré ( $X^2$ ) des modèles utilisés au four à micro-ondes.....	53
Tableau VI: Valeurs des différents paramètres des modèles utilisés à l'air libre et l'étuve (40, 50 et 90°C).....	54
Tableau VII: Valeurs des différents paramètres des modèles utilisés au four à micro-ondes.....	55

# DEDICACE

Je dédie ce travail à :

- toute ma famille ;
- mon fils aîné OBAMI Harmel El Rey V ;
- ma très chère épouse ONDELE Diane Irène ;
- mes sœurs et frères ;
- mes grands parents ;
- la mémoire de tous ceux qui nous ont laissé ;
- tous mes amis de Masolo ;
- tous ceux qui me sont chers.

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Mécanique, Energétique et Ingénierie (L.M.E.I.) et au Laboratoire de physique de la Faculté des Sciences et Techniques.

Je remercie vivement :

Mes parents, je leur dois tout ce que je suis.

**M. MABIALA Bernard**, Maître de Conférences, Université Marien Ngouabi, pour m'avoir reçu de son laboratoire.

**M. ELENGA Raymond Gentil**, Maître de conférences, Université Marien Ngouabi, pour m'avoir confié ce travail et d'accepter de m'encadrer et pour me diriger ainsi que pour ses discussions enrichissants, qu'il trouve ici ma reconnaissance et mon respect.

**Pr Désiré LILONGA BOYENGA**, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de presider mon jury.

**Dr MASSAMBA Daniel** pour avoir honorer ce travail en acceptant de l'examiner.

**M. Léon VOUMBO MATOUMONA** et **Alfred Raoul MISSETETE** pour leurs conseils, et surtout pour m'avoir orienter vers ce programme.

Je tiens à remercier aussi le professeur **Luis MATOS** responsable de la **Chaire UNESCO** en Science de l'Ingénieur et **Désiré LILONGA BOYENGA** Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique (ENSP), sans votre accueil je n'aurais pas eu l'opportunité de suivre ce programme.

J'exprime toute ma gratitude aux enseignants du laboratoire de Mecanique Energetique et Ingenierie, pour leur serieux et abnegation durant l'année academique 2014-2015.

Je remercie aussi tous ce qui ont contribué de près ou de loin à la realisation de ce travail.

# RESUME

## **RESUME**

Dans ce travail, des résultats expérimentaux relatifs à la cinétique de séchage du rachis du palmier raphia hookeri sont présentés. Les expériences sont effectuées dans un four à micro-ondes à différentes puissance (126W, 256W et 406W) à un cycle de 60 secondes, à l'étuve à différentes température (40, 50, 60 et 90°C) avec un pas de 05 minutes et à l'air libre en faisant la pesée chaque 6h. Pour chaque essai, le produit est séché jusqu'à la stabilisation de masse. En suivant le séchage le long du rachis par rapport à la position de l'échantillon sur le bambou et dans les différentes conditions, les résultats montrent que la cinétique de séchage du bambou, n'est pas homogène. La vitesse du séchage des échantillons, dépendrait de la position de celui-ci sur le bambou et aussi de la variation des conditions de travail (température à l'étuve et puissance au four à micro-ondes).

Les résultats expérimentaux à l'ambiante, au four micro-ondes et à l'étuve sont modélisés à l'aide d'un logiciel professionnel OriginPro8. Pour le 1er rachis séché au four à micro-ondes, le modèle de Khazaei présente les meilleurs résultats à différentes puissance avec un coefficient de détermination égal à 0.9997 et un khi-carré égal à 3,11895E-5 à 126W (le tableau V). Cependant, pour le 2ème et le 3<sup>ème</sup> bambou, étudié à l'étuve et à l'ambiante, le même modèle de Khazaei simule mieux les courbes de cinétique de séchage à différentes températures (tableau IV).

**Mots-clés :** Rachis du palmier raphia, Bambou, modélisation et la cinétique de séchage.

## **SUMMARY**

In this work, of the relative experimental results to the kinetics of drying of the spine of the palm raffia hookeri is presented. The experiences have been done in a microwave oven to different power (126W, 256W and 406W) to a cycle of 60 seconds, to the steam room to different temperature (40, 50, 60 and 90°C) with a step of 05 minutes and to the free air as making weighed it every 6h. For every test, the product is dried until the stabilization of mass. While following the drying along the spine in relation to the position of the sample on bamboo and in the different conditions, the results showed that the kinetics of bamboo drying, is not homogeneous. The speed of the drying of the samples, would depend on the position of this one on bamboo and also of the variation of the handling conditions (temperature to the steam room and power to the microwave oven).

The experimental results to the ambient, to the oven microwave and to the steam room were modelling with the help of a software professional OriginPro8. For the 1st spine dried at the microwave oven, the model of Khazaei presented the best results to different power with a coefficient of determination equal to 0.9997 and a khi-square equal to 3,11895E-5 to 126W ( table V). However, for the 2nd and the 3eme bamboo, studied to the steam room and to the ambient, the same model of Khazaei simulates the curves of drying kinetics better to different temperatures (table IV).

**Keys words:** Spine of palm raffia, Bamboo, modelling and the kinetics of drying.

# INTRODUCTION

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **Contexte**

Pour préserver l'environnement et les ressources naturelles il y a une tendance mondiale à utiliser préférentiellement les ressources renouvelables et à faible impact environnemental. C'est ainsi que des matériaux comme le bambou chinois, le bois, la terre trouvent de plus en plus d'utilisations dans de domaines variés et à grande valeur ajoutée (composites, textile technique, automobile, aviation, etc.).

### **Justification**

Le rachis du palmier raphia (bambou) est « renouvelable », biodégradable et a beaucoup d'utilisations traditionnelles. En Afrique en générale et au Congo en particulier il est utilisé comme matériau de construction des maisons (fig.1). Sa structure ressemble fortement à celle du bambou chinois. A l'instar de ce dernier, de nouvelles applications du rachis du palmier pourraient être développées, comme les textiles techniques, les revêtements, etc. Mais aujourd'hui encore l'utilisation du rachis repose entièrement sur un savoir empirique. Pour son utilisation, le rachis est séché au soleil, mais la durée de séchage était estimée au jugé. De plus, très souvent, il présente des fissures. Pour une production plus intensive, il importe de maîtriser toutes les étapes de la production dont le séchage. En effet, la connaissance de la durée de séchage, permettrait de mieux gérer les temps d'exposition et une maîtrise des conditions de séchage pourrait permettre d'éviter l'apparition de fissures.

## Problématique

A notre connaissance, très peu d'études ont porté sur le séchage du rachis du palmier raphia.



**Figure 1 : Illustration des maisons en rachis du palmier raphia hookeri.**

Contrairement aux travaux relatifs au séchage des produits agroalimentaires et le bois qu'ont été développés au cours des dix (10) dernières années, il n'en est pas de même pour certains produits tropicaux, en particulier le rachis du palmier raphia Hookeri pour lequel très peu d'articles existent à notre connaissance.

## Objectifs




En tenant compte des aspects mentionnés plus haut et pour une meilleure connaissance de sa cinétique de séchage, nous nous proposons dans le cadre de ce travail mener une étude sur les effets des conditions de séchage sur la cinétique de séchage du palmier raphia.

**L'objectif général**, étude de mettre en évidence l'impact des conditions de séchage sur la cinétique de séchage du rachis du palmier raphia hookeri.

### Objectifs spécifiques :

- ✚ Etudier la cinétique de séchage le long du rachis (bambou) du palmier au four à micro-onde, à l'étuve et à l'air libre ;
- ✚ Modéliser la cinétique de séchage.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

-  Le chapitre I : présente les généralités;
-  Le chapitre II : porte sur le matériel et méthodes ;
-  Le chapitre III présente les résultats et discussion.

# CHAPITRE I

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SECHAGE ET PALMIER**

### **RAPHIA.**

#### **1.1- Introduction**

Sécher un produit, quelle que soit sa nature, consiste à extraire de l'eau par vaporisation. Ce procédé est utilisé dans un large domaine d'application. Outre le séchage de produits alimentaires on peut citer des études sur le séchage d'autres produits, tels que le séchage de laine (A. Hachimi, & al. 1998), les sècheurs à rouleaux qui traitent le papier (S. A.Reardon, & al. 1998) et le pilotage de séchoirs à bois à haute température (M. Martin, & al. 1995). Une application au séchage d'un empilement de planchettes de bois, a permis (P. Sébastien & al., 1993a) l'introduction du concept d'unités de transfert thermique et massique (outils rapides de simulation de séchoirs) et aussi les réseaux de modules d'unités de transferts (séchoir multi-tapis) (P. Sébastien & al. 1993b).

Le séchage des produits alimentaires a fait l'objet de très nombreuses recherches sur divers produits. Citons, sans être exhaustif le maïs et le hareng (A. Ahmed-Zaid, 1999), la tomate (M. N. A. Hawlader, & al., 1991), les carottes (O. Techasena, & al., 1994), l'oignon (V. K. Sharma, & al., 1995), grains de colza (P. G. Patil, & al., 1989), les noix (E. Lavialle/Prelois, 1993), la pomme (B. Zeghmati, 1981), le riz (M. A. Du Peuty-Charbonnier, 1995), la pulpe de betterave et manioc (M. A. Salgado Cervantes, 1988), manioc, gingembre, gombo et piment rouge (C. Ahouannou, 2001), la pomme de terre (S. Youcef-Ali, 2001), et beaucoup d'autres produits.

Ce chapitre, nous donne un aperçu sur les différentes méthodes de séchage.

#### **1.2 - Description du palmier raphia**

Au cours de sa croissance végétative, le palmier à raphia peut atteindre une hauteur de 20 mètres. Couvert par les restes des vieilles palmes, le stipe de 1 à 3 mètres de diamètre est droit et bien élancé. Pennées, les feuilles persistantes de

couleur verte ont une longueur pouvant atteindre 20 mètres, avec une largeur de 3 mètres.

Ce palmier produit un grand fruit ovoïde, semblable à des poires au niveau de la forme, caractérisé par une grosseur analogue à celle d'un œuf de poule. De couleur brune rougeâtre, ce fruit de 5 à 15 cm de long est écailleux et pointu. A l'intérieur de ce fruit, il y a une pulpe jaune qui enveloppe une grosse graine dure. Le palmier à raphia produit une grande inflorescence avec des fleurs vertes claires, fructifie une seule fois et meurt : le tronc se dessèche mais les racines survivent et émettent de nouveaux drageons.

### 1.2.1 - Espèces

Le palmier à raphia appartient au genre *Raphia* qui comprend environ 30 espèces au nombre desquelles figurent :

- ✚ Le raphia Australis a une hauteur de 2 à 10 mètres et un stipe d'un mètre de diamètre. Les feuilles peuvent atteindre une longueur de 18 mètre;
- ✚ Le raphia Sudanica, d'une hauteur de 4 à 8 mètres, possède un stipe annelé et des feuilles d'une longueur d'environ 6 mètres ;
- ✚ Le raphia Hookeri, avec des feuilles de 12 mètres de long, ce palmier a une hauteur de 10 mètres.

### 1.2.2 - Culture

Le palmier à raphia qui croît en milieu naturel au bord des cours d'eau et dans les zones marécageuses, a une préférence pour les sols frais, humides, humifères, le climat tropical et une exposition mi- ombragée.

Le mode de multiplication est le semis. Les graines sont disposées sur le sol chaque 40 cm, puis recouvertes d'une terre et d'une palme de raphia, avant d'être arrosées. La durée moyenne de la germination est d'un à deux mois. Au moins 6 mois plus tard, les pousses sont transplantées lorsqu'elles ont une

hauteur de 30 cm environ. Les plants sont mis en terre dans des trous de 40 cm de longueur, de largeur et de profondeur et espacés de 2 mètres.

### **1.2.3 - Entretien cultural**

Avant l'enracinement des plants, quand les pluies sont rares, l'arrosage régulier est nécessaire afin de maintenir le sol constamment humide. Lorsqu'il n'y a pas un apport suffisant d'eau, les racines ont tendance à se dessécher avec pour conséquence le flétrissement de la plante. Les racines pourrissent lorsqu'elles bénéficient d'un excès d'eau. Le désherbage et le sarclage autour de chaque pied doivent intervenir pour éviter une colonisation de la terre de culture par les mauvaises herbes. La fertilisation doit être adaptée à la taille et à l'âge des plants en tenant compte également de la nature du sol pour appliquer la quantité requise d'éléments nutritifs nécessaires.

### **1.2.4 - Récolte**

Plusieurs constituants du palmier raphia peuvent être récoltés, les fruits, les pétioles et les nervures, les feuilles entières Les folioles sont cueillies lorsqu'elles ne sont pas encore épanouies. Pour ce faire, elles sont détachées du rachis. La période de récolte s'étend d'octobre à mai. La sève peut être également récoltée en rabattant les feuilles avant la floraison et en effectuant une entaille dans la partie centrale du tronc.

### **1.2.5 - Utilisations**

En plus de servir à l'extraction d'huile, les fruits du palmier à raphia peuvent être consommés cuits. Quant aux feuilles, elles servent à la fabrication des enclos et fournissent une fibre végétale qui est utilisée dans le domaine du textile, de la construction des habitations. Cette fibre végétale dénommée raphia, sert de revêtement pour la toiture des habitations et est utilisée pour la

fabrication de chapeaux, de tapis décoratifs, de paniers et pour le tissage de sacs, de nattes.

Le sagou qui est une farine alimentaire, riche en amidon, est extrait à partir de la moelle du tronc du palmier à raphia. La sève contient du sucre et sert à la préparation du vin de raphia, une boisson d'une couleur blanchâtre appelé «tsam en mbochi ».

### **1.3 - Le séchage**

#### **1.3.1- Méthodes de séchage**

##### **1.3.1.1 - Séchage convectif**

La chaleur est apportée par convection au produit, c'est à dire à l'aide d'un gaz vecteur. C'est en général de l'air sec chaud. Il vient au contact du produit et lui transmet de la chaleur. En pharmacie c'est le mode de séchage le plus utilisé. Il existe différents matériels utilisant ce mode de transfert d'énergie Rankelli et coll les divisent en deux groupes selon que l'apport de chaleur se fait sur des produits statiques ou sur des produits mis en mouvement (Rankelli, 1986).

On peut citer comme exemple de sécheur statique les étuves et comme exemple de sécheur avec produit en mouvement les tunnels de séchage ou les lits d'air fluidisés.

Les sécheurs mettant en mouvement le produit à sécher sont plus efficaces que les sécheurs statiques. En effet ils permettent une augmentation de la surface d'échange entre le gaz vecteur chaud et le produit à sécher et donc optimisent le transfert de chaleur.

Le séchage par convection nécessite un apport énergétique important et demande pour être efficace une température relativement élevée quand on élimine de l'eau (60-80°C), ce qui peut poser des problèmes avec les produits thermosensibles dégradables à ces niveaux de température.

Pour y remédier, ce mode d'apport de chaleur peut être couplé au séchage sous pression réduite afin d'abaisser la température des produits.

Le séchage convectif est le mode de séchage le plus répandu aujourd'hui. Néanmoins nous retiendrons que l'apport de chaleur est surfacique, ce qui peut dans le cas de produit épais entraîner une hétérogénéité de séchage (croûtage, apparition d'un film en surface, voire d'une couche isolante).

### **1.3.1.2 - Séchage par conduction**

Il s'agit d'un séchage par contact direct du produit à traiter avec la source de chaleur à l'aide d'une surface conductrice de chaleur. Ce phénomène est couramment utilisé en pharmacie.

Toutefois la conduction est peu utilisée comme mode de séchage seul mais plutôt comme une aide au séchage-chauffage.

Une des applications les plus importantes se trouve dans les mélangeurs granulateurs sécheurs sous vide qui utilisent les avantages combinés du séchage sous vide et de l'apport d'énergie thermique par conduction.

Les deux modes de séchage décrits ci-dessus apportent l'énergie thermique à la surface du produit à sécher. Les durées de séchage sont souvent longues, les températures élevées et la qualité du produit pas toujours optimale (croûtage).

Ainsi un intérêt grandissant pour un apport de chaleur volumique a permis le développement du séchage par rayonnement thermique ou chauffage diélectrique.

### **1.3.1.3 - Séchage par rayonnement thermique**

Ce mode de séchage est basé sur le rayonnement de chaleur à partir d'une source infrarouge (IR) ou une paroi chaude vers la surface du produit à sécher (Baillon, 1996).

Le domaine IR concerne les rayonnements de longueur d'onde compris entre 760 et 15000nm.

Trois types d'IR sont définis:

- IR courts (IRC) :  $760 < 2000$  nm
- IR moyens (IRM) :  $2000 < 4000$  nm
- IR longs (IRL) :  $4000 < 15000$  nm

La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde du rayonnement: elle augmente lorsque la longueur d'onde diminue. Les IRC sont donc plus pénétrants que les IRM, eux-mêmes plus pénétrants que les IRL.

Le rayonnement est absorbé sur une profondeur pouvant atteindre, pour certains produits, plusieurs millimètres en IRC. Mais il n'est quasiment pas absorbé en IRL.

Par ailleurs dans le cas de produit peu absorbant, c'est à dire de forte réflectivité et transmittivité, de géométrie complexe non plane, l'application du séchage peut être limitée. En effet l'apport de chaleur n'est plus dans ce cas que surfacique.

Le séchage par IR permet un apport de chaleur beaucoup plus puissant que le séchage convectif et permet un séchage rapide. C'est d'ailleurs cette technique qui est utilisée dans l'industrie papetière ainsi que dans l'industrie automobile pour le séchage des peintures.

Compte tenu de la puissance fournie, les températures atteintes par le produit peuvent devenir rapidement très élevées. C'est pourquoi le séchage par IR est peu employé en pharmacie ou les produits sont souvent thermosensibles.

Toutefois des travaux entrepris ces dernières années y ont fait appel pour le séchage d'enductions pharmaceutiques dans le cadre de la fabrication de dispositifs transdermiques.

Une utilisation bien gérée des IR a permis un séchage efficace d'enductions (Le Person, 1996).

#### **1.2.3.4- Séchage par chauffage diélectrique**

On entend par chauffage diélectrique le chauffage par apport d'énergie électromagnétique à un produit qui absorbe cette énergie grâce à ses propriétés diélectriques.

Les sources de cette énergie sont les hautes fréquences ou les micro-ondes. Nous aborderons le chauffage par micro-ondes, qui trouve des applications dans l'industrie pharmaceutique et dans d'autres secteurs.

### **1.4 - Micro-ondes**

#### **1.4.1- Configuration d'une installation micro-ondes**

Une installation micro-ondes est constituée de 2 éléments:

- le générateur avec son alimentation ;
- l'applicateur.

Le générateur micro-ondes ou magnétron est un tube électronique hyperfréquences qui, à partir d'un courant électrique 50Hz, utilise la modulation de vitesse pour transformer un faisceau continu d'électrons émis à la cathode vers une anode concentrique, en une onde électromagnétique (Vialard-Goudou A, Maupas P, Carlier A, Mothiron JC, 1976).

L'applicateur est la surface conductrice nécessaire au confinement des ondes (four, enceinte, cavité, cage de Faraday, guide d'ondes). Il doit assurer une distribution stationnaire des champs électriques et magnétiques adaptée au produit en question (Berteaud AJ, Delmotte M, 1993).

L'applicateur est la structure dans laquelle se trouve le produit à traiter.

Il est conçu de manière à ce que le maximum d'énergie micro-ondes soit absorbé par le produit et à éviter toute fuite d'énergie micro-ondes vers l'extérieur.

Il existe deux grands types d'installation micro-ondes selon le type d'applicateur, monomode ou multimode :

- dans le cas d'une installation de type monomode (voir figure 2), le transport de l'énergie rayonnée par le magnétron se fait grâce à des conducteurs creux appelés guides d'ondes. Dans la continuité du guide d'onde se trouve le produit à sécher.

A la sortie d'un guide d'onde monomode, il n'existe qu'un seul mode de propagation de l'onde. La répartition du champ électrique est parfaitement calculable et celui-ci se trouve dans un plan défini connu.

Un guide monomode peut fonctionner suivant deux principes:

- ✚ en ondes progressives. L'énergie micro-ondes non consommées par le matériau est absorbée par une charge à eau. L'applicateur fonctionne sans onde de retour ;
- ✚ en ondes stationnaires. Une plaque métallique, en bout d'enceinte, induit une réflexion totale des ondes non absorbées. On parle alors de cavité résonnante.

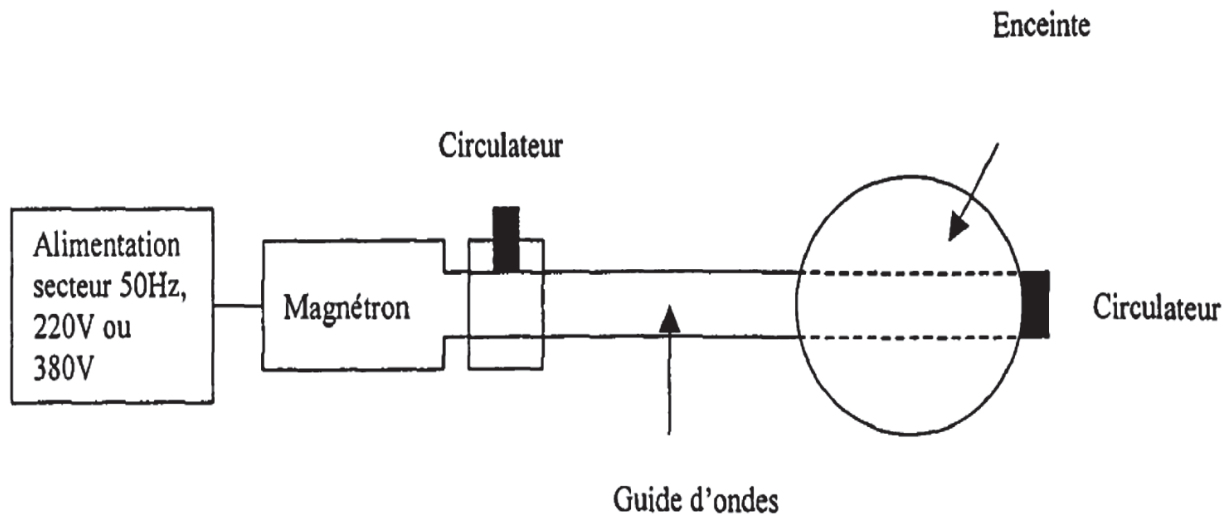


Figure 2 : Schéma simplifié d'une installation micro-ondes monomode progressive (Xavier Gauthier 1977).

✚ s'il existe plusieurs modes de propagation de l'onde à l'intérieur de l'applicateur, celui-ci est dit multi-mode. Il est dans ce cas difficile de connaître la répartition spatiale instantanée du champ électromagnétique. La propagation des ondes s'effectue dans toutes les directions de l'espace, l'objectif étant de créer un champ de micro-ondes distribuées avec la meilleure répartition possible dans le volume du produit.

Les installations industrielles sont de type multimode.

## 1.5 - Cinétique de séchage et courbes caractéristiques

### 1.5.1-Introduction

Le séchage consiste à diminuer l'activité de l'eau des produits sèches jusqu'à une valeur assurant leur conservation. Le processus doit respecter certains critères de qualité liés au produit tout en garantissant, pour la chaîne de production, une cadence et un coût raisonnable. De nombreux modèles mathématiques empiriques ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage en couche mince des produits végétaux et cela pour divers produits tels que le poivre vert, le haricot et la courge verte (O. Yaldiz, & al., 2001), les

abricots (T.I Togrul, D. Pehlivan, 2002, R. Al Hodali, 1997), l'Eucalyptus globulus (M. Kouhila & al., 2002), la menthe, la verveine, et la sauge (M. Kouhila, 2001), la pistache (A.Midilli, & H. Kucuk, 2003a, A Midilli, 2001), fruit du cactus (S Lahsasni, & al.,2004a), la carotte, les feuilles de menthe, les tranches du potiron et tomate (I. Doymaz, 2004, I. Doymaz, 2006 et I. Doymaz, 2007a et 2007b), les feuilles de Citrusaurantium (L. Ait Mohamed, & al., 2005) et des tartes d'olives (N. A. Akgun, & I.Doymaz, 2005).

Le but de mener une étude de l'influence des différents paramètres tels que la température sur le processus du séchage et déterminer les courbes caractéristiques de séchage, nous avons étudié la cinétique de séchage du palmier raphia hookeri.

## 1.5.2- Modelisation des cinétiques de séchage

### 1.5.2.1- Courbes de séchage

On entend par courbes de séchage soit les courbes représentant les variations de la teneur en eau  $X$  en fonction du temps  $t$ , soit celles donnant la vitesse de séchage en fonction du temps  $t$  ou de la teneur en eau.

La courbe obtenue expérimentalement s'obtient en suivant l'évolution de la masse humide du produit  $M_h$  en cours de séchage par pesées successives jusqu'à atteindre la teneur en eau finale  $X$  indice :

$$\bar{X}(t) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1.1)$$

La masse sèche  $M_s$  du produit, est obtenue à la fin de chaque essai.

Cette courbe contient l'ensemble des informations expérimentales. (M. Belahmidi, & al. 1993 et B. C. Boutaleb, 1997).

Pour chaque produit, il est possible de définir une valeur optimale de  $X$  fin pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et

organoleptiques (forme, texture, odeur et huiles essentielles) (T. Rocha Mier, 1993, S. Dwivedi, & al. 2004 et Encyclopédie d'épices, 2007).

L'installation et les conditions de séchage doivent impérativement permettre d'atteindre cette valeur optimale d'humidité.

### 1.5.2.2- Modèle de séchage

La modélisation des courbes de séchage solaire consiste à définir une fonction vérifiant l'équation :  $X^* = f(t)$  dite équation caractéristique de séchage.

On a relevé dans la littérature une abondance de modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de cinétiques de séchage.

Les diverses équations donnent l'évolution au cours de séchage de la teneur en eau déduite en fonction du temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder par les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies (S. Lahsasni, & al. 2004b et 2004c et S. Simal, & al. 2005).

### 1.5.2.3- Paramètres statistiques utilisés

Le coefficient de corrélation ( $r$ ) est l'un des critères pour analyser la précision de l'équation qui décrit les courbes de séchage.

En plus de  $r$ , les paramètres statistiques ki-carré réduits ( $x^2$ ) et l'erreur systématique moyenne ESM sont utilisés pour étudier la précision du lissage (T. L. Togrul, & D. Pehlivan, 2003 [33]). Ces paramètres statiques sont calculés comme suit :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - \bar{X}_{eqexp,i}) * (X_{eqpre,i} - \bar{X}_{eqpre,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - \bar{X}_{eqexp,i})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqpre,i} - \bar{X}_{eqpre,i})^2}} \quad (1.2)$$

avec :

$$\bar{X}_{eqexp,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eqexp,i} \quad (1.3)$$

$$\bar{X}_{eqpre,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eqpre,i} \quad (1.4)$$

et :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - X_{eqpre,i})^2}{d_f} \quad (1.5)$$

$$ESM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - X_{eqpre,i})^2} \quad (1.6)$$

ou :

$X_{eqexp,i}$  est la  $i^{\text{ème}}$  teneur en eau expérimentale d'équilibre,

$X_{eqpre,i}$  est la  $i^{\text{ème}}$  teneur en eau d'équilibre prédite par chaque modèle,

$N$  est le nombre de point expérimentaux et  $d_f$  est le degré de liberté de régression du modèle ( $d_f = N - n$  où  $n$  désigne le nombre des constantes de chaque modèle).

### 1.5.3 - Modèle de courbes caractéristiques de séchage

La méthode a été proposée et développée par D. A. Van Meel en 1958. Le modèle

CCS n'est valable que pour des échantillons non massifs et a couche mince permettant de négliger les gradients de diffusion. Plusieurs auteurs (A. Belghit & al. 2000, N. Kechaou, 2000, A. A. El-Sebaï, & al. 2002 et C. Ertekin, & O. Yaldiz, 2004) ont exploité la notion de (CCS) dans le but de déterminer l'expression de la vitesse de séchage d'un produit.

Les mesures expérimentales permettent d'obtenir un ensemble de courbes de séchage. La courbe caractéristiques de séchage (CCS) représente la vitesse de

séchage normée par rapport a la vitesse de séchage dans la première phase en fonction de la teneur en eau réduite  $(X(t)-X_{eq})/(X_0-X_{eq})$ .

avec :

X(t) teneur en eau a l'instant t (% MS)

X<sub>0</sub> teneur en eau initiale (% MS)

X<sub>eq</sub> teneur en eau à l'équilibre (kg eau /kg MS) donnée par la relation de G.A.B:

$$X_{eq} = \frac{C * K * X_M * a_w}{(1 - K * a_w) * (1 - K * a_w + C * K * a_w)} \quad (1.7)$$

C et K sont deux constantes de G.A.B définies par :

$$C(T) = C_0 * \exp\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right) \quad (1.8)$$

où :  $\Delta H_1 = H_m - H_n$

$$K(T) = K_0 * \exp\left(\frac{H_1 - H_n}{RT}\right) \quad (1.9)$$

où :  $\Delta H_2 = H_1 - H_n$

C<sub>0</sub>, K<sub>0</sub> constantes

H<sub>1</sub> enthalpie de condensation de la vapeur d'eau pure (kJ.mol<sup>-1</sup>)

H<sub>m</sub> enthalpie intégrale de sorption des premières molécules d'adsorbat sur tous

les sites primaires (kJ/mol)

H<sub>n</sub> enthalpie intégrale de sorption des couches d'eau supplémentaires (kJ.mol<sup>-1</sup>)

R constante des gaz parfaits (J /mol.K)

T température (K)

X<sub>M</sub> teneur en eau a la saturation de la monocouche de Brunauer (kg eau. (kg MS)<sup>-1</sup>)

Il faut noter que la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  est déduite des isothermes de désorption du produit (B.Touati & al. 2006 et 2007).

### **I.3 Conclusion du chapitre I**

Les études et investigations réalisées antérieurement, ne nous offrent pas une solution intégrale sur l'effet des conditions de séchage sur la cinétique de séchage du rachis du palmier raphia hookeri.

# CHAPITRE II

## **CHAPITRE II : MATERIEL ET MÉTHODES**

### **2.1 - Introduction**

Les matériels et méthodes utilisées seront décrits à continuation. Cette manipulation nous permettra de sécher le rachis du palmier hookeri jusqu'à stabiliser la masse et de tracer les courbes de cinétique de séchage.

### **2.2 - Principaux matériels initiaux et équipements utilisés**

#### **2.2.1 - Matériel végétal**

Pour le développement expérimental, nous avons utilisé trois (03) Rachis du palmier raphia hookeri, en provenance des forêts marécageuses de Bilolo sur la route nationale n°2, dans la banlieue de Brazzaville Nord. Dont le rachis n°1 mesure 11,42m de long et un diamètre de 84,7mm ; le rachis n°2 10,50m de long et un diamètre de 60,11mm et le rachis n°3 de 6,82m de long et un diamètre de 61,85mm.

L'analyse de ces données a nécessité l'utilisation d'un logiciel professionnel OriginPro 8, afin de tracer les courbes et de modéliser le mécanisme de séchage.

#### **2.2.2 - Equipements employés**

Le matériel utilisé comporte :

- Un four à micro-ondes ;
- Une étuve ;
- Une décimètre ;
- Une scie électrique ;
- Une balance électronique ;
- une fiche de mesure vierge ;
- un crayon et
- un pied à coulisse digital.

### **2.3 - Description du milieu**

Les travaux se sont déroulés à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Marien Ngouabi dans le laboratoire de physique.

### **2.4 - Description du déroulement de la collecte des données**

La masse humide du produit est pesée par intervalles de temps successifs. Au fur et à mesure que la variation de la masse devient petite, jusqu'à l'obtention d'une masse fixe indiquant l'atteinte de l'équilibre hygroscopique. Dès que les masses des échantillons deviennent stationnaires, on arrête l'expérience. L'objectif de cette opération est de déterminer les masses sèches des échantillons.

La connaissance de la masse humide et de la masse sèche du produit avant et après le séchage dans l'étuve, au four à micro-ondes et l'air libre, nous permet d'avoir la teneur en eau à l'équilibre. Le tableau 2.1, présente la répartition et le découpage des échantillons utilisés.

**Tableaux I : Caractéristique des échantillons**

RACHIS 1 : Echantillons utilisés au four à micro-onde.				RACHIS 2 : Echantillons utilisés à l'étuve.			
	Position (m)	Longueur (cm)	Diamètres (mm)		Position (m)	Longueur (cm)	Diamètres (mm)
<b>B1</b>	2,73	7	53,8	<b>I1</b>	1,24	7	49,84
<b>B2</b>	2,8	7	53,1	<b>I2</b>	1,31	7	48,44
<b>B3</b>	2,87	7	51,52	<b>I3</b>	1,38	7	46,37
<b>C1</b>	3,94	7	50,9	<b>J1</b>	2,36	7	46,35
<b>C2</b>	4,01	7	49,46	<b>J2</b>	2,43	7	46,11
<b>C3</b>	4,08	7	48,75	<b>J3</b>	2,5	7	45,21
<b>E1</b>	5,25	7	48,45	<b>K1</b>	3,27	7	43,91
<b>E2</b>	5,33	7	48,43	<b>K2</b>	3,34	7	43,41
<b>E3</b>	5,4	7	47,41	<b>K3</b>	3,41	7	43,02
<b>F1</b>	6,3	7	47,25	<b>L1</b>	4,22	7	42,52
<b>F2</b>	6,37	7	46,93	<b>L2</b>	4,29	7	42
<b>F3</b>	6,44	7	46,64	<b>L3</b>	4,36	7	41,97
<b>G1</b>	7,18	7	43,45	<b>M1</b>	5,15	7	41,17
<b>G2</b>	7,25	7	43,34	<b>M2</b>	5,22	7	40,57
<b>G3</b>	7,32	7	42,74	<b>M3</b>	5,29	7	39,91
<b>H1</b>	7,92	7	39,47	<b>N1</b>	5,87	7	39,74
<b>H2</b>	7,99	7	38,99	<b>N2</b>	5,94	7	39,7
<b>H3</b>	8,06	7	38,5	<b>N3</b>	6,01	7	39,55

<b>RACHIS 3 : Echantillons utilisés à l'ambiante et à l'étuve.</b>			
	<b>Position (m)</b>	<b>Longueur (cm)</b>	<b>Diamètres (mm)</b>
<b>O1</b>	0,87	7	54,59
<b>O2</b>	0,94	7	54,53
<b>O3</b>	1,01	7	54,21
<b>O4</b>	1,15	7	54,07
<b>P1</b>	1,74	7	53,73
<b>P2</b>	1,81	7	53,7
<b>P3</b>	1,88	7	53,46
<b>P4</b>	1,95	7	53,31
<b>Q1</b>	2,59	7	51,08
<b>Q2</b>	2,66	7	50,77
<b>Q3</b>	2,73	7	50,18
<b>Q4</b>	2,8	7	50,18
<b>R1</b>	3,45	7	47,64
<b>R2</b>	3,52	7	47,59
<b>R3</b>	3,59	7	47,56
<b>R4</b>	3,66	7	47,01
<b>S1</b>	4,32	7	46,88
<b>S2</b>	4,39	7	46,87
<b>S3</b>	4,46	7	46,51
<b>S4</b>	4,53	7	45,66
<b>T1</b>	5,19	7	43,5
<b>T1</b>	5,26	7	42,94
<b>T3</b>	5,33	7	42,91
<b>T4</b>	5,4	7	42,31

Le rachis n°1 utilisé pour l'étude au four à micro-ondes, a constitué les échantillons avec la notation alphabétique B, C, E, F, G et H (chaque échantillon contient l'indice 1,2 et 3, qui correspondent à trois sous-échantillons de 7 cm de long) en allant de la base vers le sommet.

Le rachis 2 et 3 par contre ont été étudiés à l'étuve, dont la notation des échantillons varie de I à N et de O à T respectivement. Une partie des échantillons du rachis 3, a fait l'objet de séchage à l'air libre.

## **2.5 - Plans expérimentaux**

Le traitement expérimental des rachis, qui constitue l'objet du travail a été réalisé conformément à ceux rapportés dans la littérature, et se présente comme suit :

1. préparation des installations et les échantillons ;
2. pesée et mesure de l'échantillon avant la mise en œuvre ;
3. mise en marche des appareils ;
4. séchage par micro-onde ou Etuve ou à l'air libre ;
5. par rapport au pas, à la fin on pèse et on mesure l'échantillon jusqu'à stabiliser la masse ;
6. masse stable, fin des opérations.

▪ Etapes du séchage

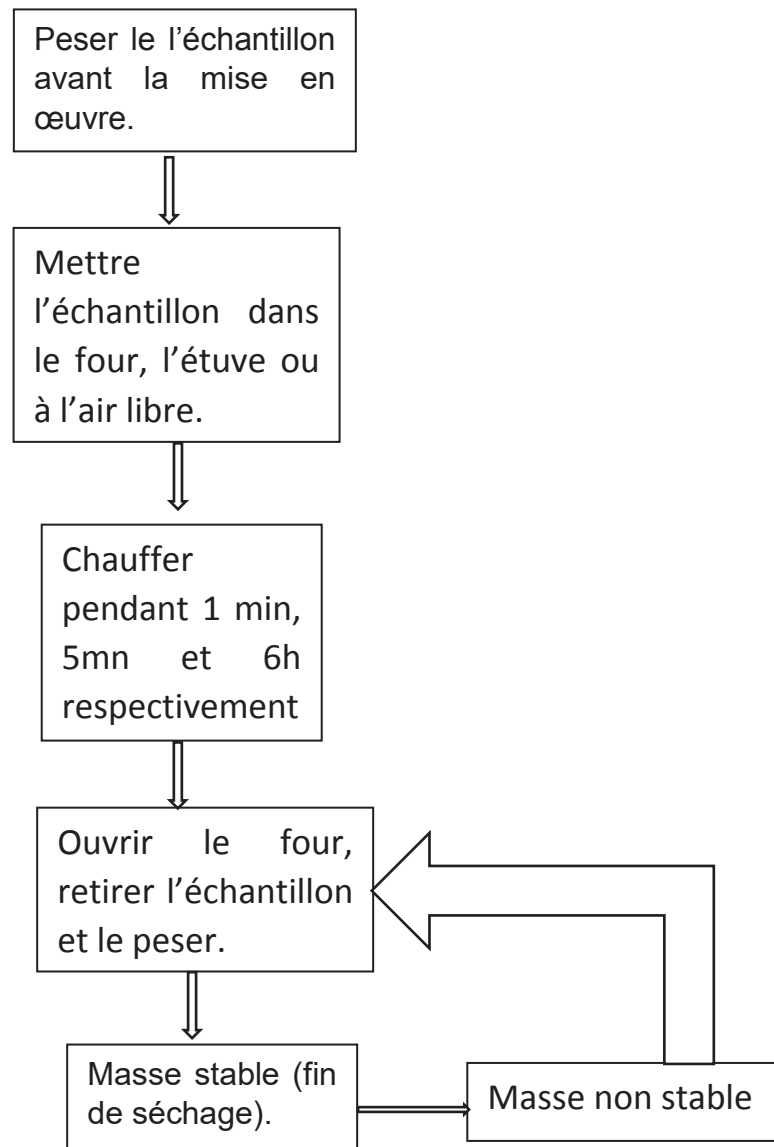


Figure 3 : Schéma simplifié de la méthode adoptée

2.6 - Méthodes d'analyse des données

Ce travail est basé sur une méthodologie progressive qui rassemble les techniques nécessaires à la conduite des problèmes de recherche, elle nous permet de mener des études avec une grande sûreté et une grande économie de moyens. Cette stratégie, doit nous faciliter l'organisation progressive de l'acquisition des connaissances, minimiser le plus possible le nombre

d'expériences et nous donner une meilleure précision possible des résultats, avec des représentations graphiques qui illustrent les résultats obtenus.

### Séchage par micro-ondes

Les expériences de séchage ont été effectuées dans un four micro-ondes, sous une puissance maximale de 900W, à trois niveaux de puissances (126, 252 et 406 W) pour un cycle de 60 secondes, soit une minute le pas. A chaque puissance, six (06) échantillons ont été séchés.

✚ Critère de Fin = Masse finale constante ;

✚ Répétabilité: Expériences en triple.

Les cinétiques de séchage sont présentés par :

$$X_{red} = f(\text{temps}) \text{ et } V_i = f(X_{red}) \quad (3.1)$$

### Séchage à l'étuve

Les expériences de séchage ont été effectuées dans l'étuve à différentes températures (40, 50, 60, 70, 80 et 90°C) pour un cycle de 5 minutes le pas. A chaque température six (06) échantillons ont été séchés.

✚ Critère de Fin = Masse finale constante ;

✚ Répétabilité: Expériences en triple.

### Séchage à l'air libre

Les expériences ont été effectuées à la température ambiante avec un pas de six heures (6h).

✚ Critère de Fin = Masse finale constante ;

✚ Répétabilité: Expériences en triple.

Les cinétiques sont présentées par les équations 3.1

#### 2.6.1 - Ajustement des modèles

La modélisation cherche l'application mathématique qui peut simuler au mieux les différentes courbes de cinétique de séchage. De nombreuses corrélations

empiriques existent dans la littérature. Parmi lesquels, on peut citer les modèles de : Peleg, Avrami, Khazaei et Diffusion. Les équations représentatives de ces modèles sont consignées dans le tableau II.

**Tableau II : Noms et équations des modèles**

Nom du modèle	Equations
Peleg (Peleg, 1988)	$Mr = 1 - \frac{t}{a + b * t}$
Avrami (Melvin Avrami, de 1939 à 1941)	$Mr = \exp(-a * t^n)$
Khazaei (Elenga et al., 2011)	$Mr = (1 - a) + a * \exp\left(-\left(\frac{t}{k}\right)^n\right) - b * t$
Diffusion (Yaldiz et al. 2001)	$Mr(t) = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-kbt)$

- Pour le modèle de Peleg, **a** est un paramètre qui représente l'inverse de la vitesse de séchage, donnée par la formule :  $a^{-1} = -\left(\frac{dM_r}{dt}\right)$  à  $t = 0$ .
- Dans le modèle d'Avrami, la constante **n** est un nombre entier ou demi-entier dont la valeur dépend du mode de nucléation de la nouvelle phase. Le coefficient **a** dépend du mode de germination.
- Par contre le modèle de Khazaei décrit **a** comme un paramètre qui représente l'inverse du taux de séchage et est approximativement donné par la formule  $(1 - M_t(t))^{-1}$ . **k** est un paramètre de temps, il représente le temps au bout duquel on évapore 63.2% d'eau du matériau et **b** le taux de séchage proche de l'équilibre.

- Ce modèle de diffusion, définit  $k$  comme un paramètre proportionnel au coefficient de diffusion.

Le logiciel ORIGINPRO8, est celui qui, nous a permis de tracer les courbes de cinétique de séchage et de faire une analyse statistique des résultats de notre modélisation.

### **2.6.2 - Choix du modèle le plus adapté**

Le choix du modèle s'est fait par la comparaison des données statistiques des modèles utilisés, à partir du coefficient de détermination  $R^2$  et de Khi-carré( $\chi^2$ ).

### **2.7 - Conclusion du chapitre II**

Par rapport à la méthodologie mise en place, on peut étudier la cinétique de séchage des rachis par Micro-ondes, à l'étuve et à l'air libre. On peut aussi modeler, afin de choisir le modèle le plus adapté à partir du coefficient de détermination  $R^2$  et de Khi-carré( $\chi^2$ ).

# CHAPITRE III

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 - Séchage au four à Micro-Ondes.

La figure 4, présente les courbes de séchage du rachis n°1, en allant de la base (B3, C3 et E3) jusqu'au sommet (F3, G3 et H3). Le constat serait que la vitesse de séchage varie lorsqu'on passe des échantillons (B3, C3 et E3) de la base et des échantillons du sommet (F3, G3 et H3). Il est donc à noter que, le séchage sur la longueur du rachis, dépend de la position de l'échantillon sur le rachis (tableau I). On pourrait donc dire que, la cinétique le long du rachis n'est pas la même. Ceci pourrait être dû à l'effet de masse, aux diamètres, à la structure interne ou à la surface d'évaporation d'eau.

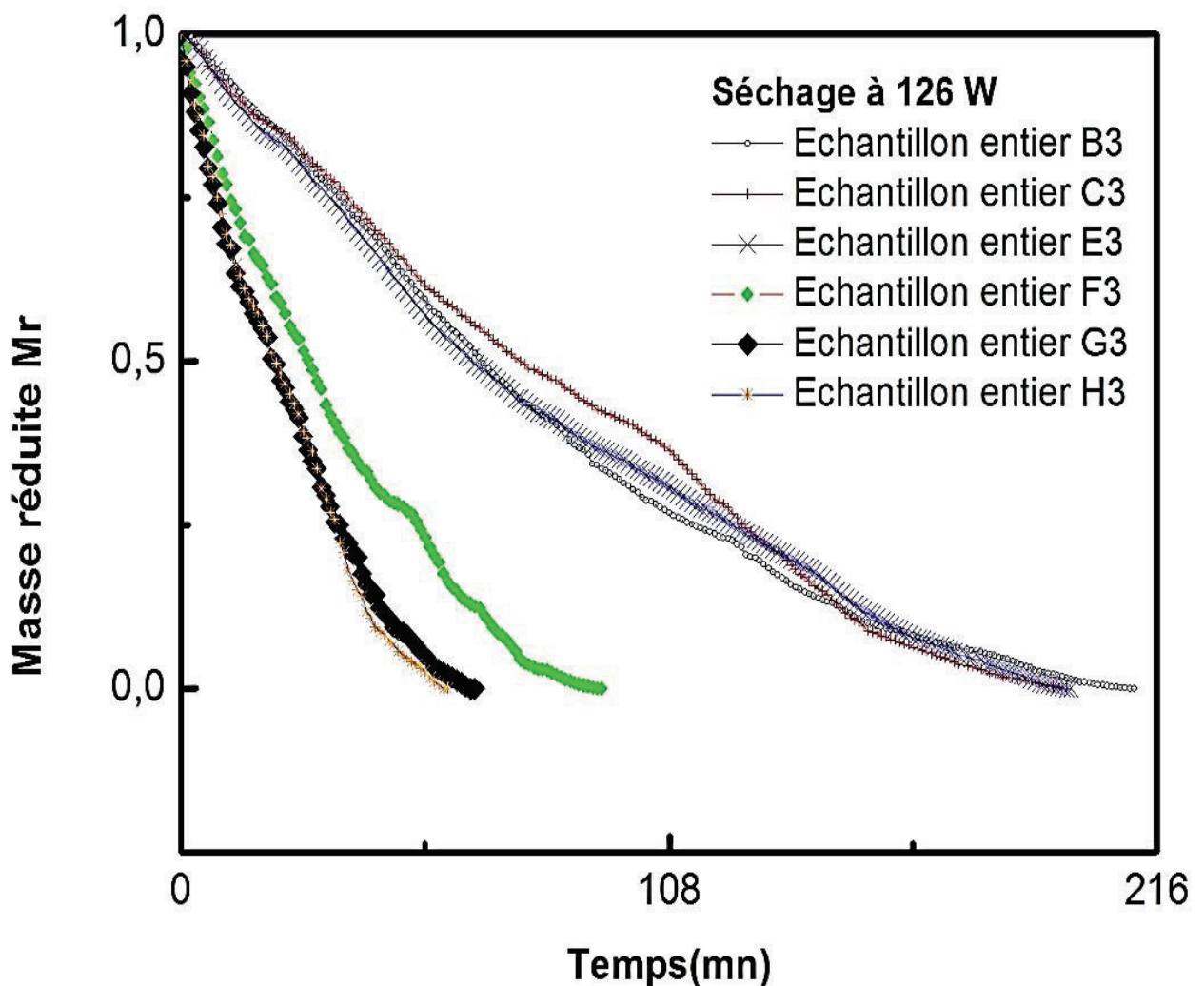


Figure 4 : Cinétique de séchage du rachis n°1 à 126W.

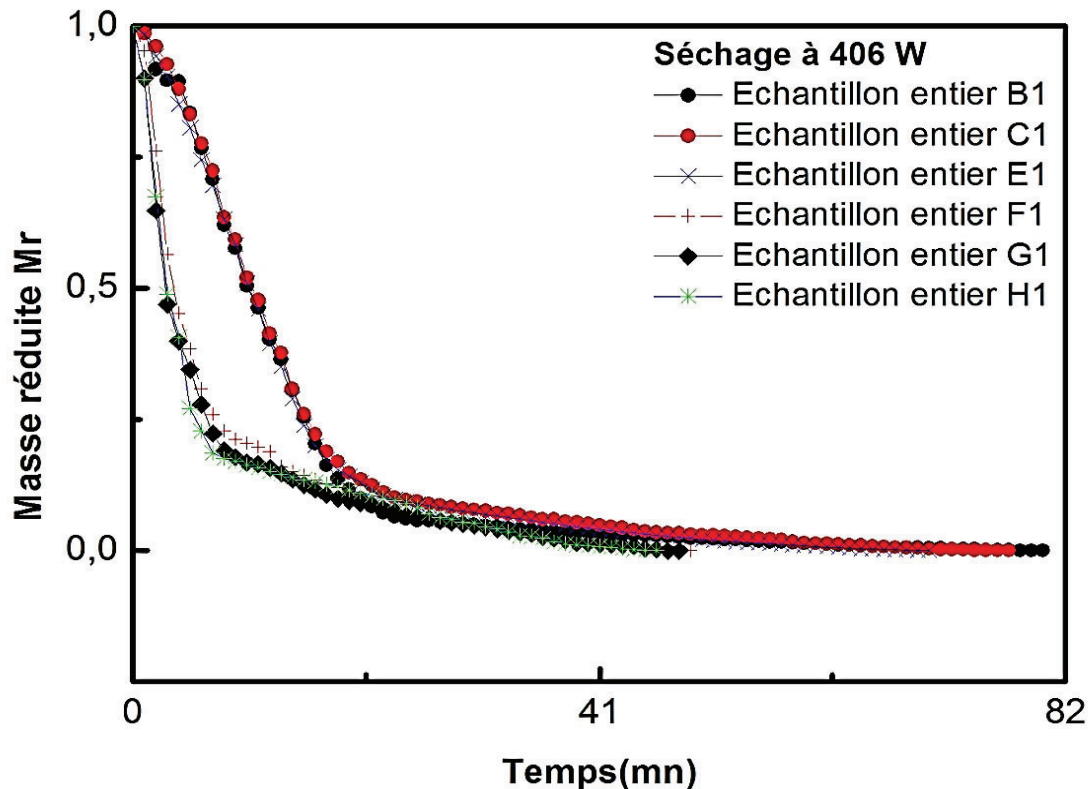


Figure 5 : Cinétique de séchage du rachis n°1 à 406W.

Les essais des expériences réalisés à 406W de la figure 5, représentent la cinétique de séchage du rachis n°1. On constate que, les échantillons de la base, représentés par les lettres B1, C1 et E1 sèchent moins vite que ceux du sommet du rachis F1, G1 et H1. Bien qu'on passe à une autre puissance, on remarque que, la cinétique le long du bambou, n'est pas homogène. Elle subit une influence de la position de l'échantillon sur le rachis. Cependant on observe que, la vitesse de séchage augmente.

### 3.2- Séchage à l'étuve.

Les figures 6 à 8 représentent les courbes de la cinétique de séchage réalisées à l'étuve à 40, 50 et 90°C. Par rapport aux résultats obtenus, le constat serait le même qu'au four à micro-ondes. C'est-à-dire la vitesse de séchage des échantillons O, P, Q et I, J, K de la base et du sommet R, S, T et L, M, N ; séchés respectivement à 40, 50 et 90°C varie lorsqu'on passe d'un échantillon de la base à un échantillon du sommet. On constate aussi, lorsqu'on augmente la température, la vitesse de séchage augmente, toutefois la cinétique ne dépend que de la position de l'échantillon sur le rachis. D'où, les échantillons de base sèchent moins vite que ceux et du sommet du bambou. La variation de la durée de séchage en fonction de la

température s'explique peut-être par le fait que l'élévation de température entraîne une augmentation de l'intensité du transfert de chaleur.

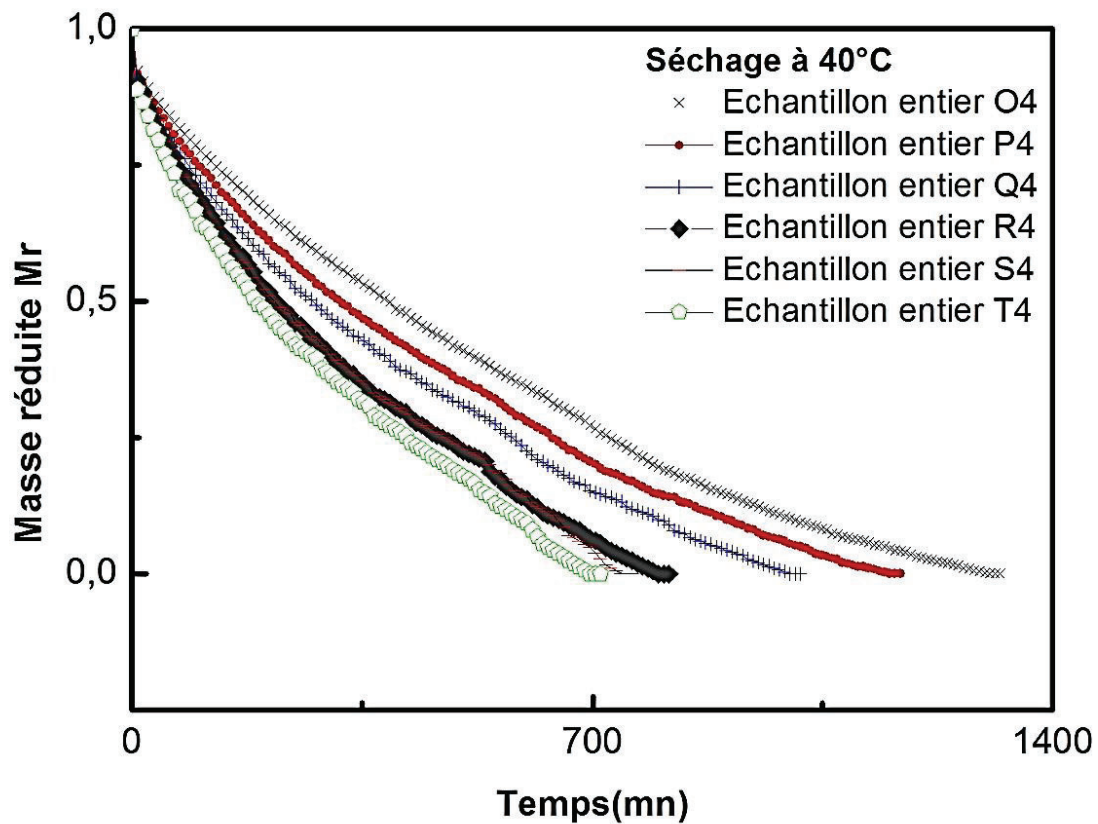


Figure 6 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 40°C

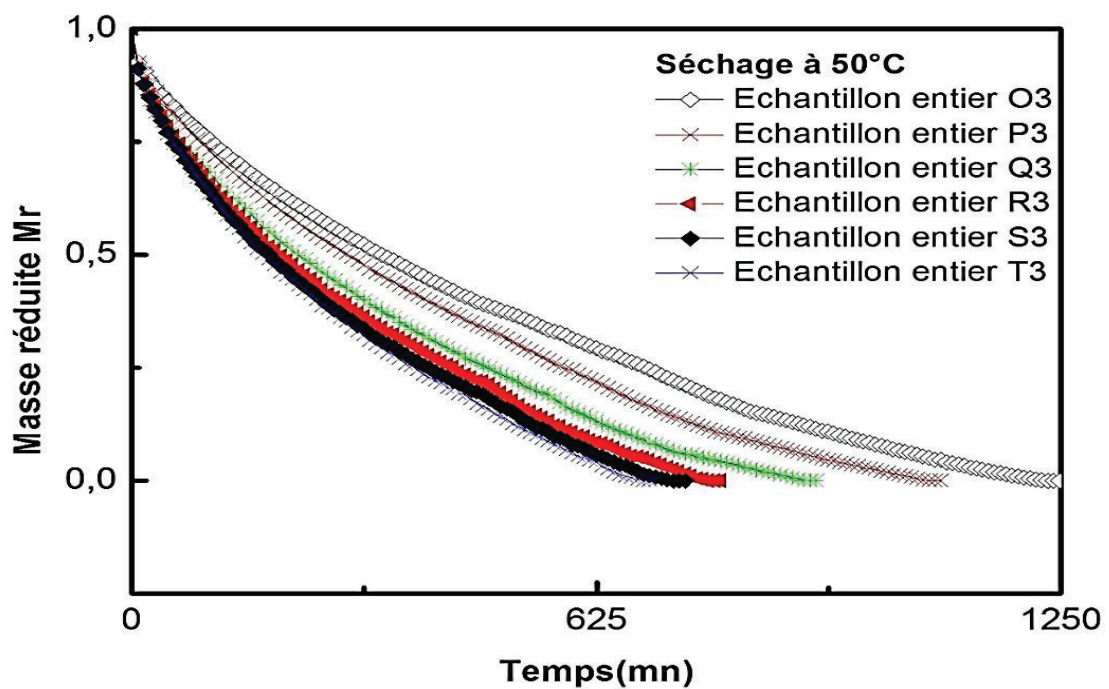


Figure 7 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 50°C

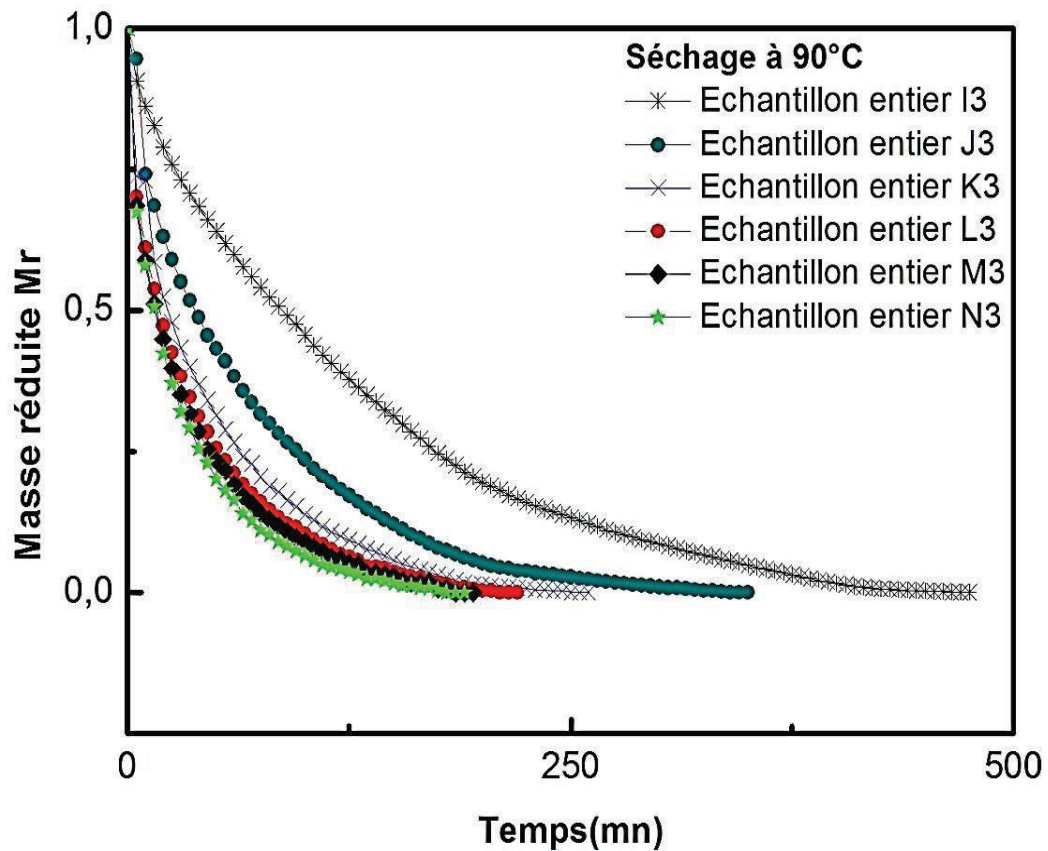


Figure 8 : Cinétique de séchage du rachis n°3 à 90°C

Les figures 6-8 montrent que la température a une influence sur l'évolution de la teneur en eau au cours du séchage. L'influence de la température sur la cinétique de séchage est importante, une augmentation de la température résulte en une diminution de la teneur en eau.

Ces échanges sont de moins en moins importants au fur et à mesure que le séchage

se fait, car la quantité d'eau que l'on peut retirer du rachis est plus faible et la différence de teneur en eau. Donc les échanges se font plus difficilement (Bimbenet et al.,2002).

La durée de séchage n'est pas la même pour les six températures, le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la température (Sacilik, 2007). Cette différence résulte certainement dans les liaisons qui se forment avec l'eau dans le rachis et l'accessibilité de celle-ci. Le rachis à 40°C retient plus d'eau que dans le cas de 50, et 90°C. Il est donc plus difficile de leur retirer de l'eau. Inversement, il sera plus facile de les réhydrater.

La perte de masse du rachis en fonction du temps de séchage a été déterminée en mesurant toutes les 5 minutes le poids à l'aide d'une balance de précision à 0,001g près; nous remarquons que la perte en eau de ces échantillons augmente rapidement lorsqu'on élève la température.

### 3.3 - Séchage à l'ambiante.

La figure 9 représente les courbes de la cinétique de séchage réalisées à l'ambiante et le séchage s'est fait après 18 jours environ. Les résultats obtenus montrent que, la vitesse de séchage varie d'un échantillon à un autre par rapport à la position de l'échantillon (tableau II) sur le rachis. Les échantillons R1, S1 et T1 du sommet sèchent plus vite que ceux de la base O1, P1 et Q1. On pourrait donc dire que, la position de l'échantillon à une grande influence sur la cinétique de séchage du bambou.

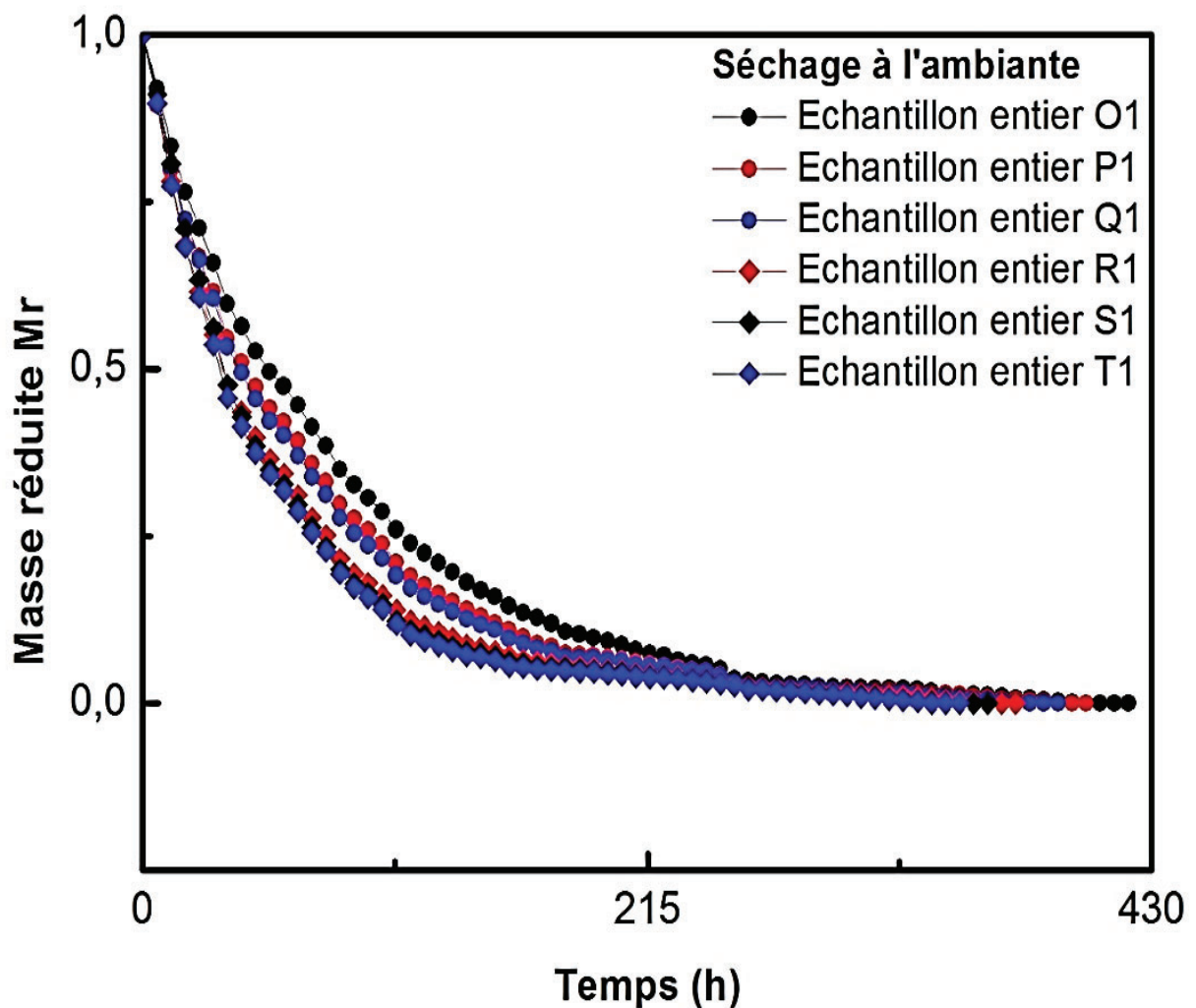


Figure 9 : Cinétique de séchage à l'air libre.

**Tableau III : Le récapitulatif des temps de séchage à l'étuve, au four à micro-onde et à l'air libre.**

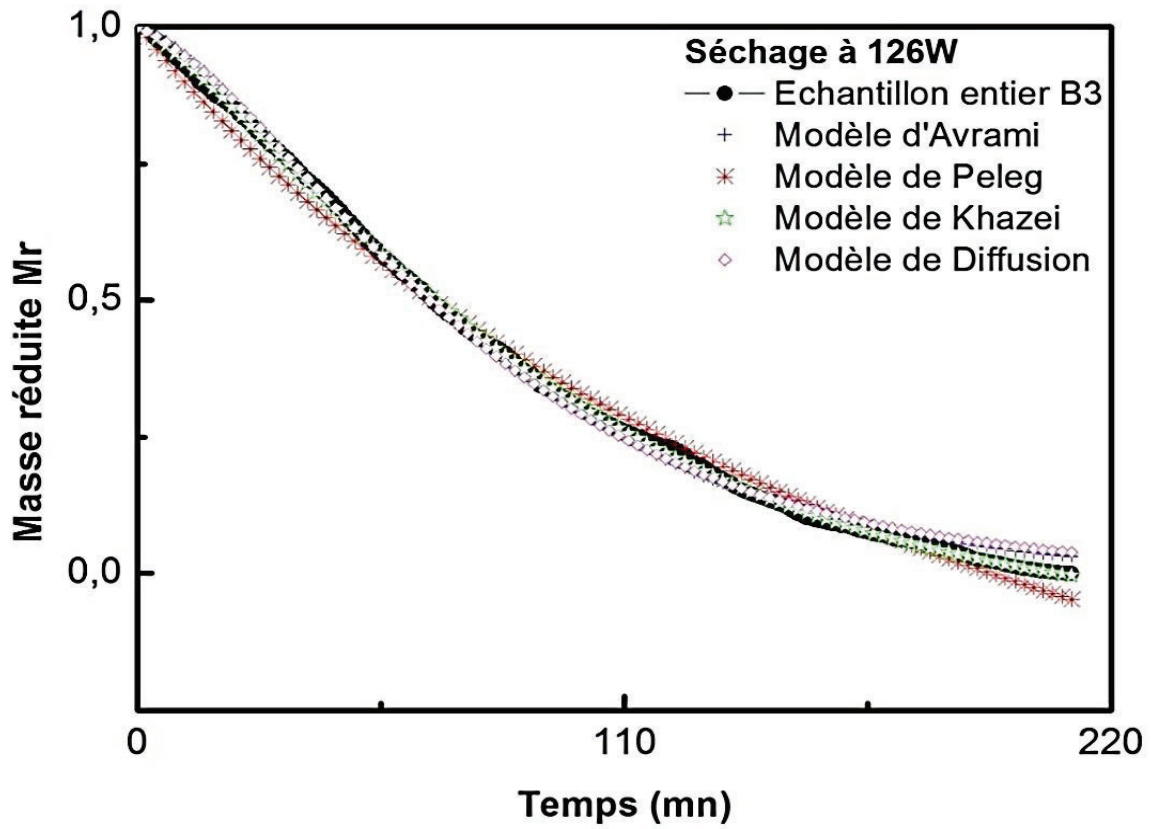
ETUVE			MICRO-ONDES			A L'AIR LIBRE	
°C	Minutes	Heures	W	Minutes	Heures	Minutes	Heures
40	1400	23,33	126	216	3,6	25800	430
50	1250	20,83	252	136	2,26		
60	1150	19,16	406	82	1,36		
70	820	13,33					
80	750	12,5					
90	500	8,33					

Le tableau III, nous récapitule le temps de la cinétique de séchage dans les différentes conditions. On a constaté qu'à l'Etuve, plus la température (°C) augmente, plus le rachis sèche vite et le temps de séchage diminue. Au four micro-ondes, quand la puissance (W) augmente, la vitesse de séchage augmente et le temps de séchage diminue aussi.

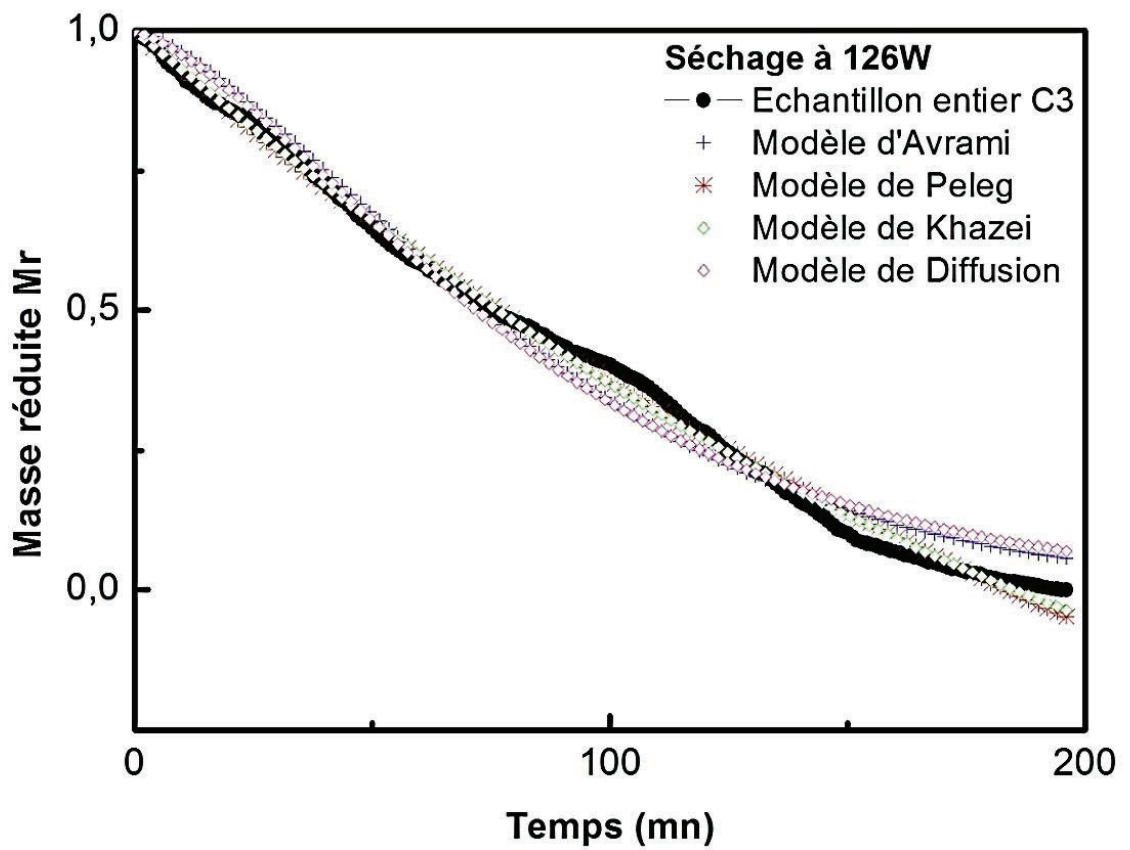
### 3.4 - Modélisation de la cinétique de séchage

#### 3.4.1 - Au four à micro-onde

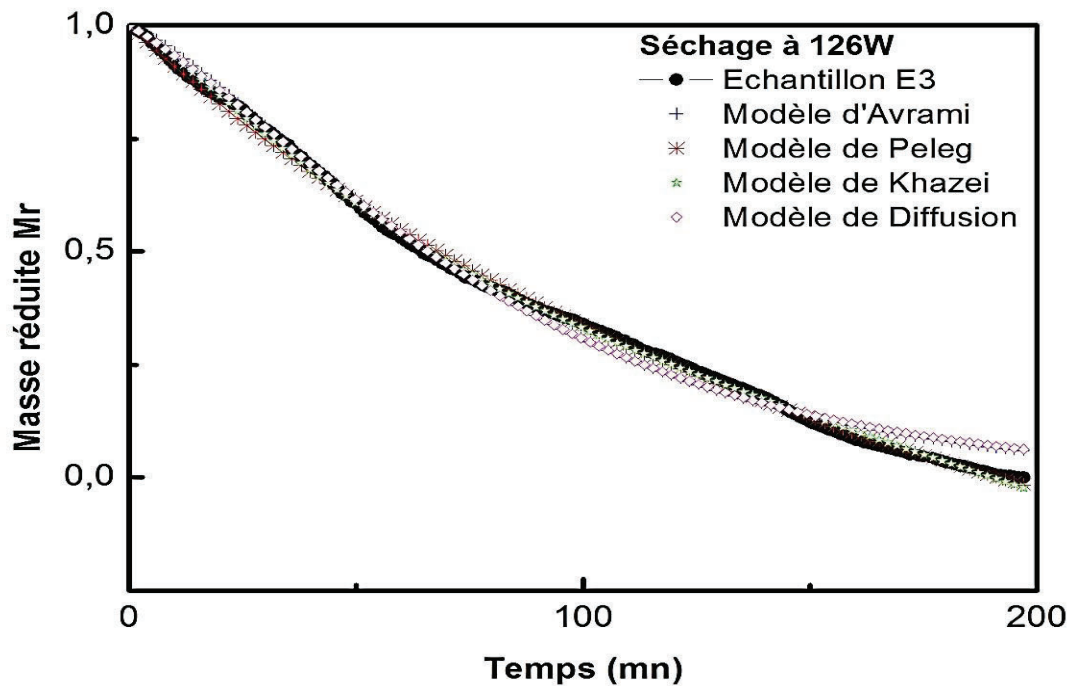
Les figures 10 et 11 représentent les courbes de la cinétique de séchage au four à micro-ondes à 126, 252 et 406W modélisées des échantillons du rachis.



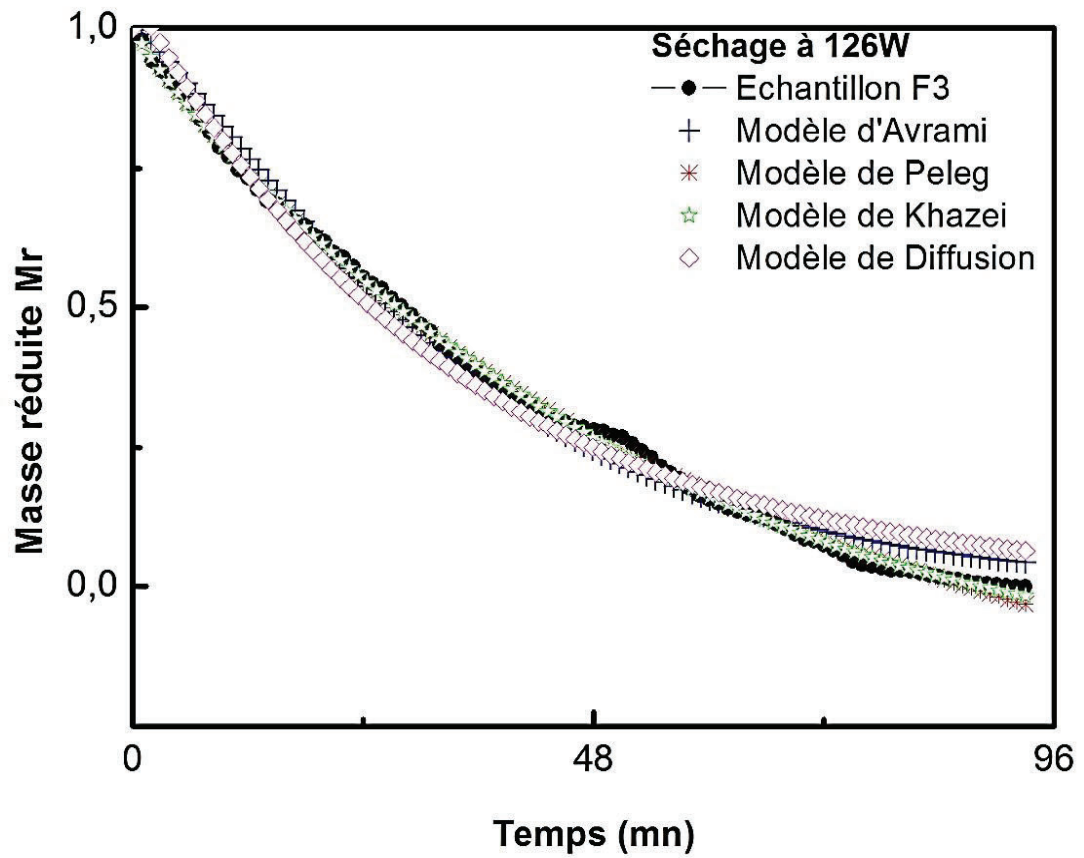
(a)



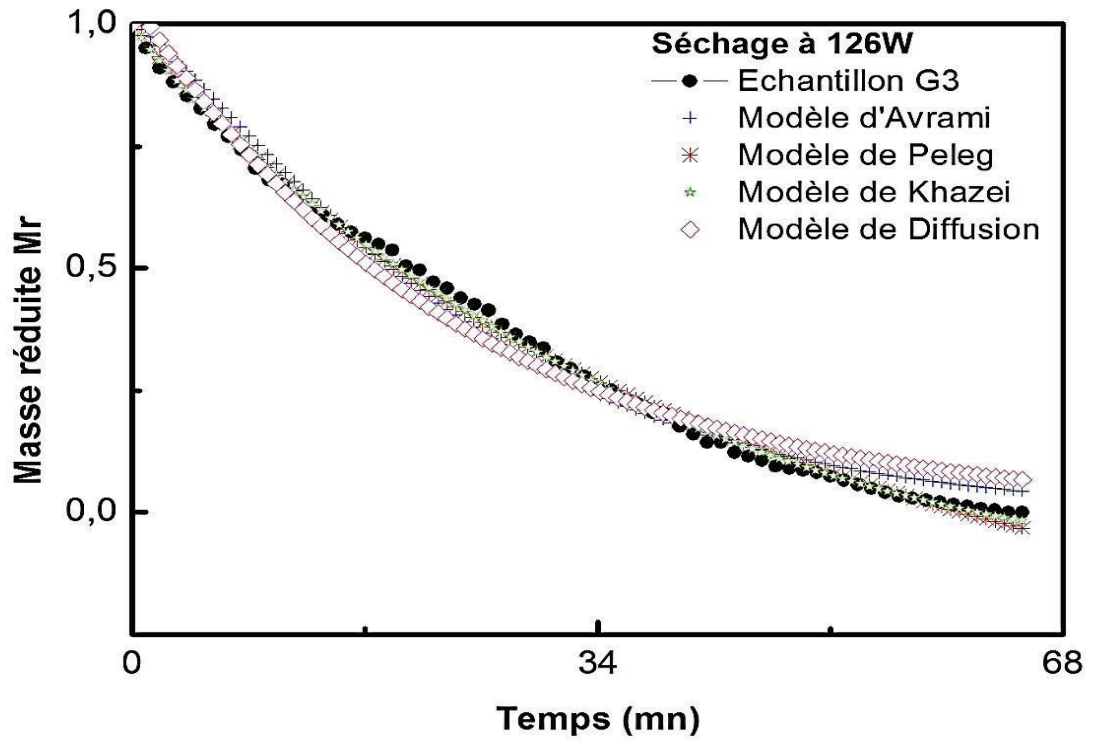
(b)



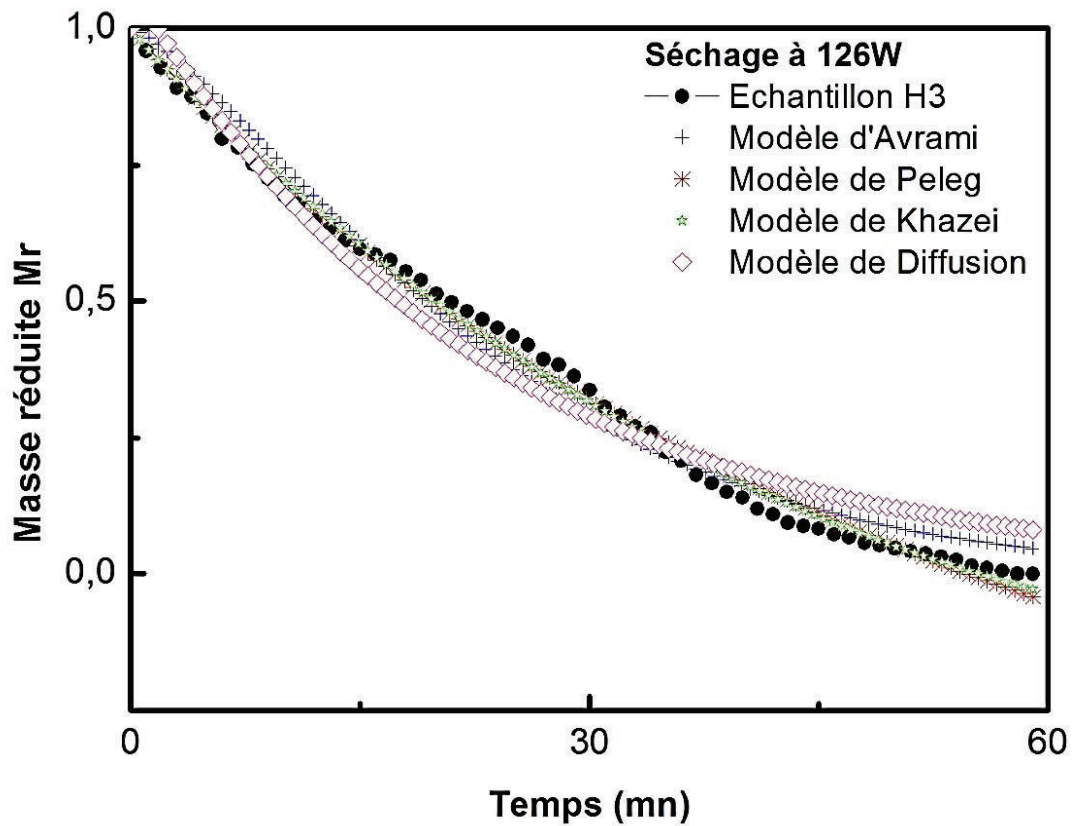
(c)



(d)

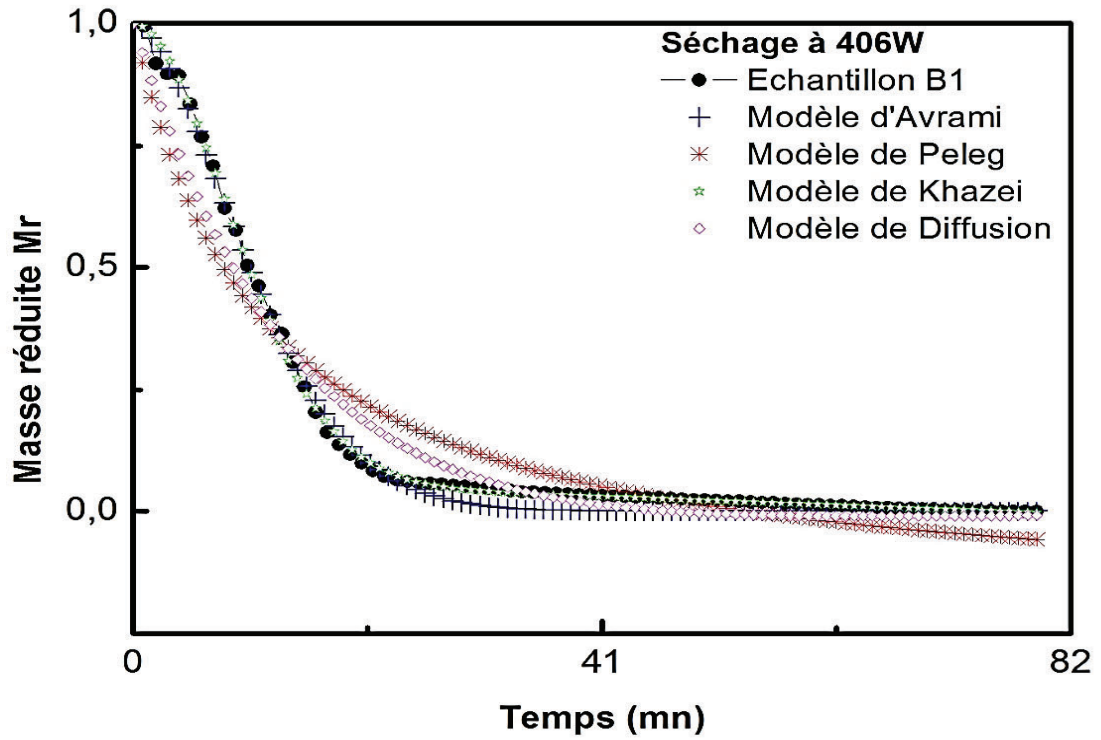


(e)

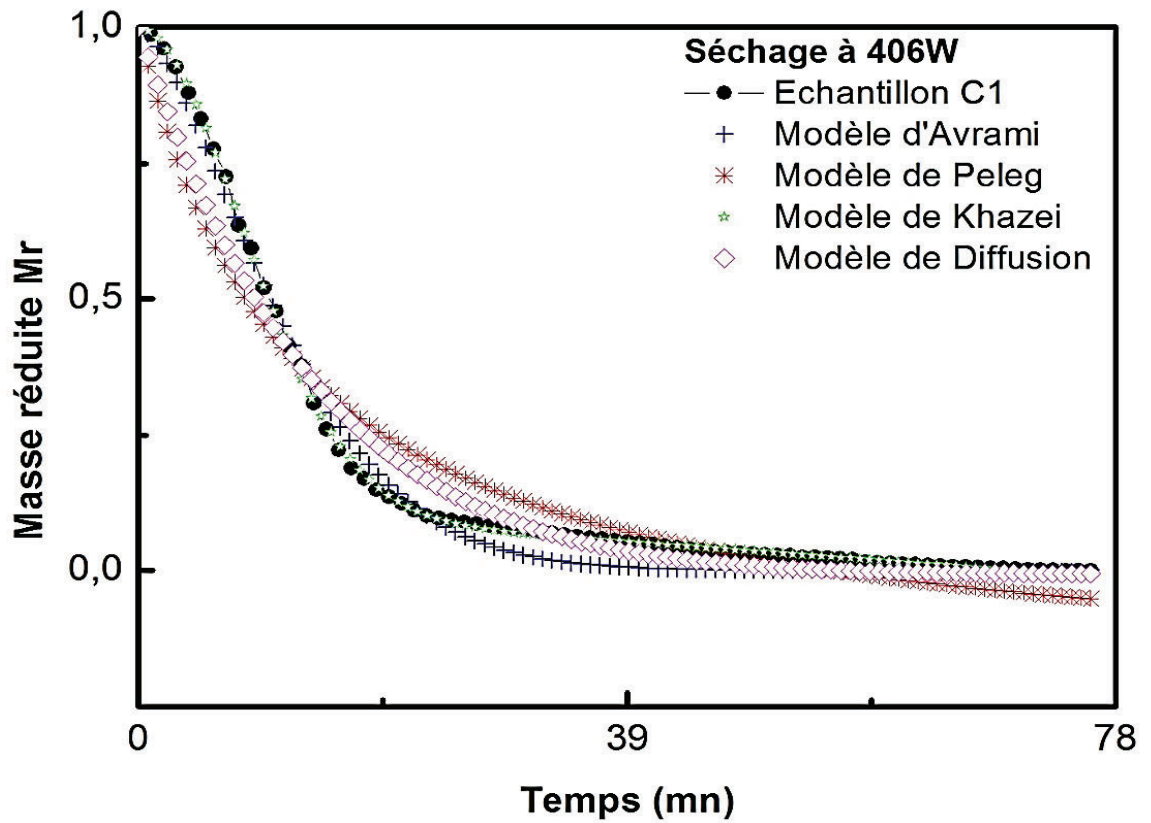


(f)

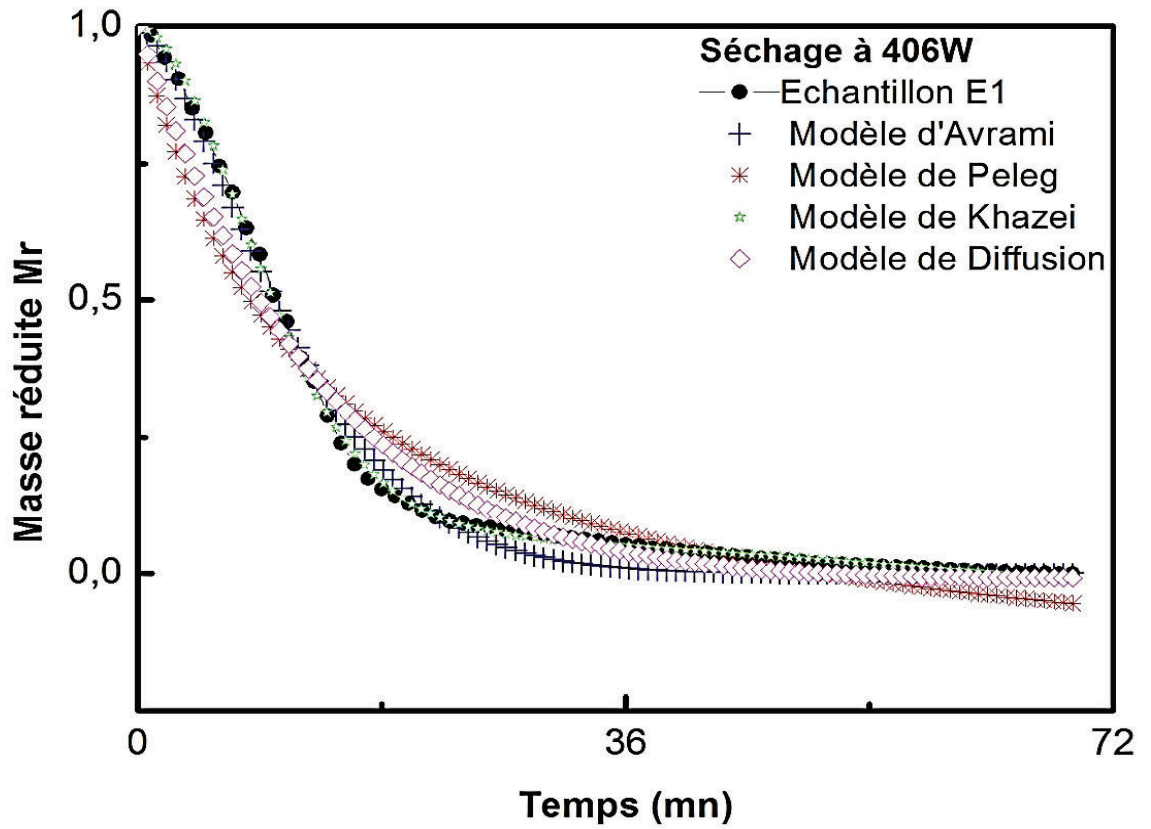
Figure 10 (a, b, c, d, e, f): Modélisation des courbes à 126W.



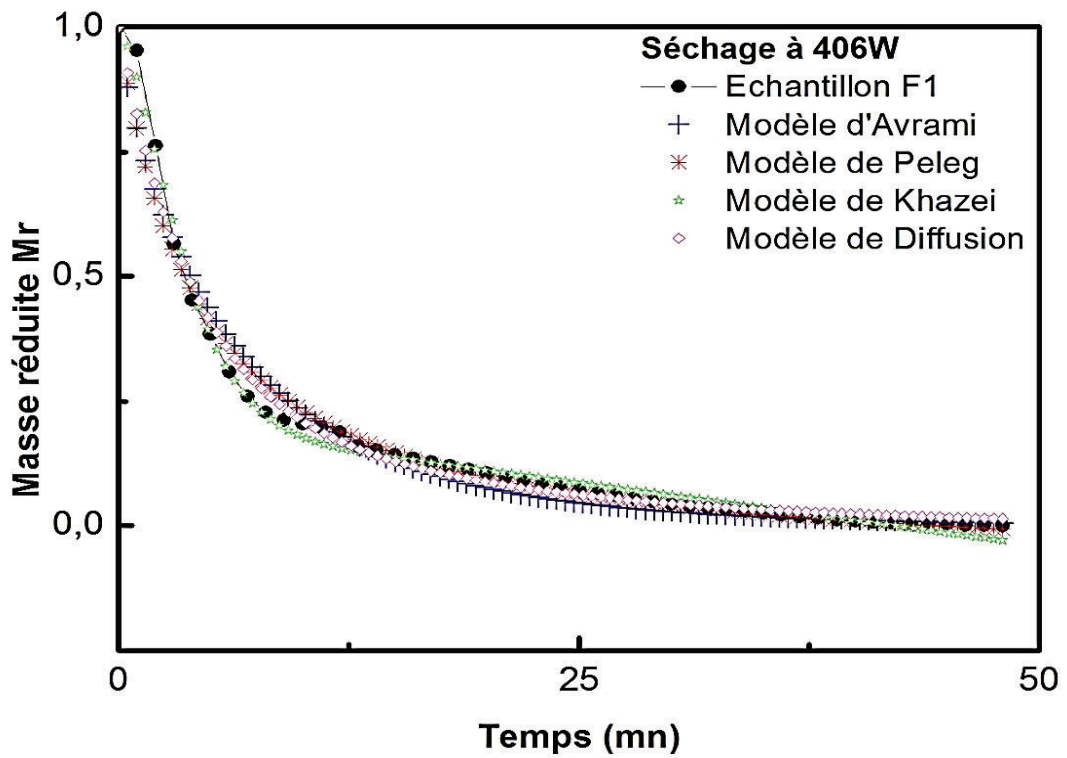
(a)



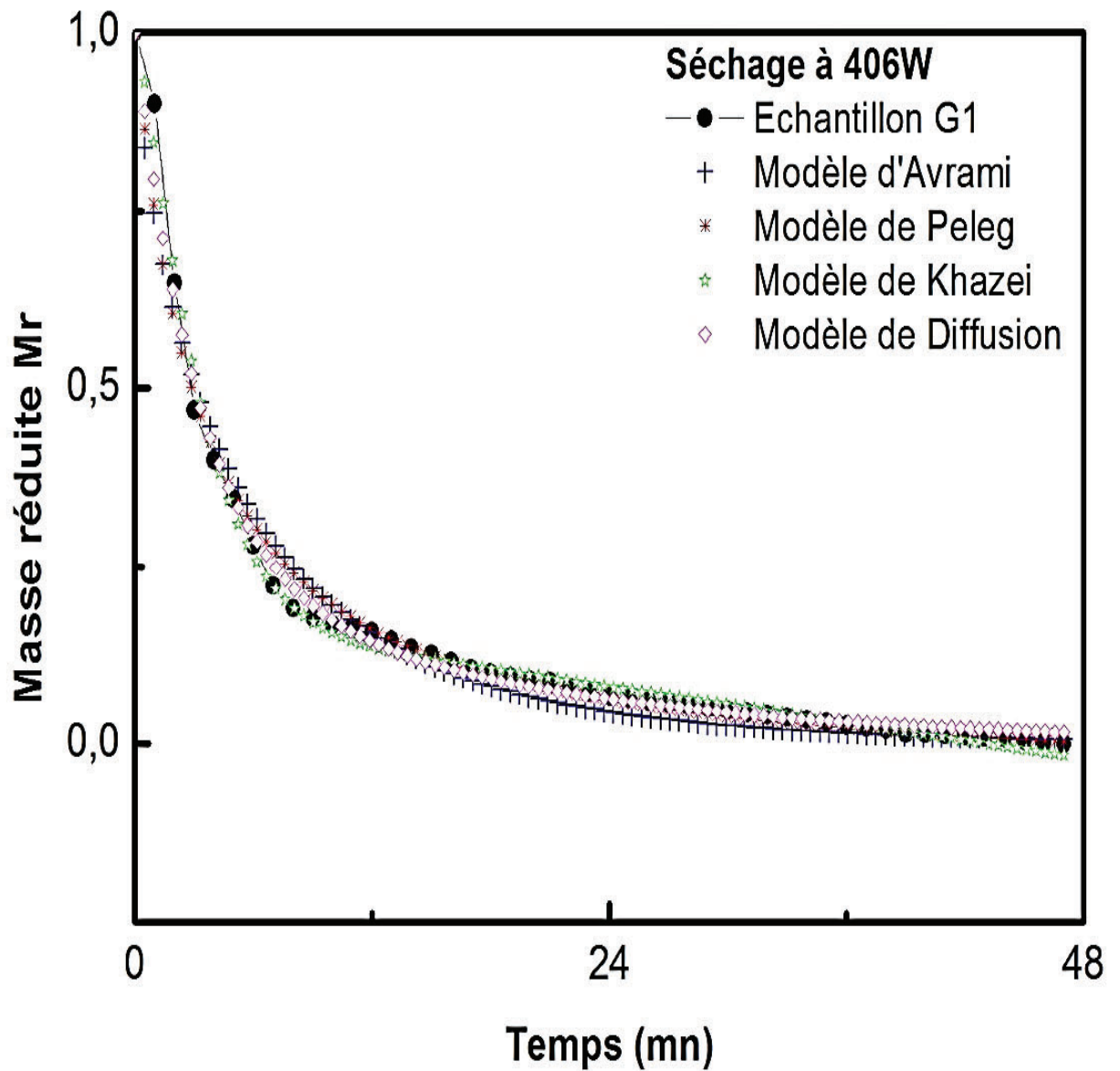
(b)



(c)



(d)

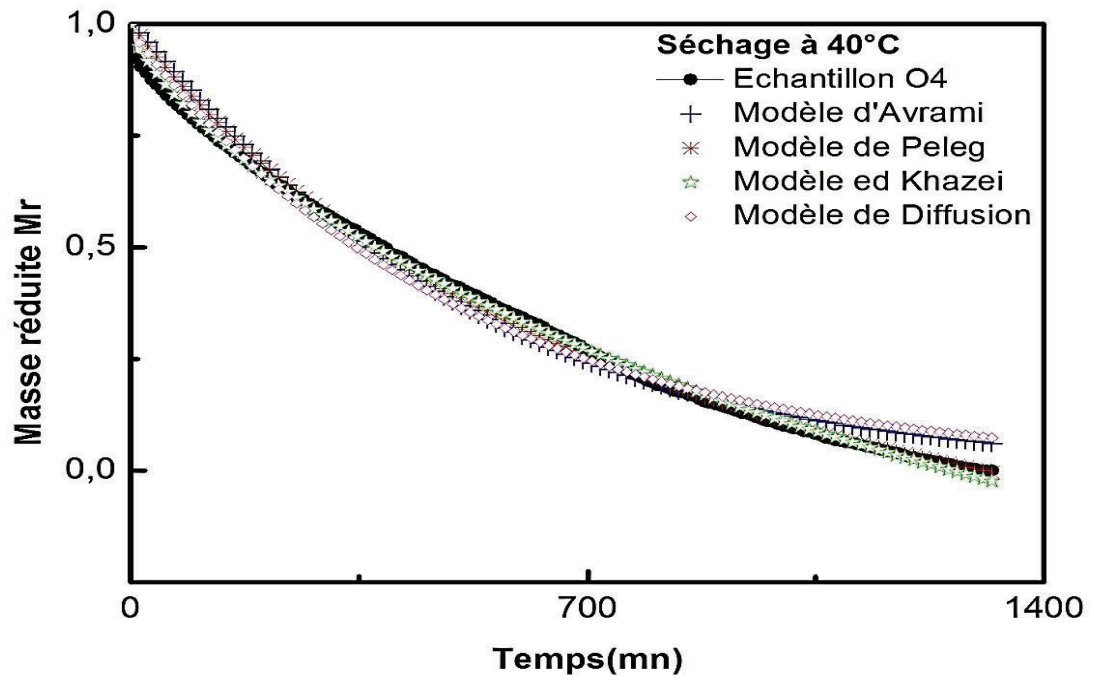


(e)

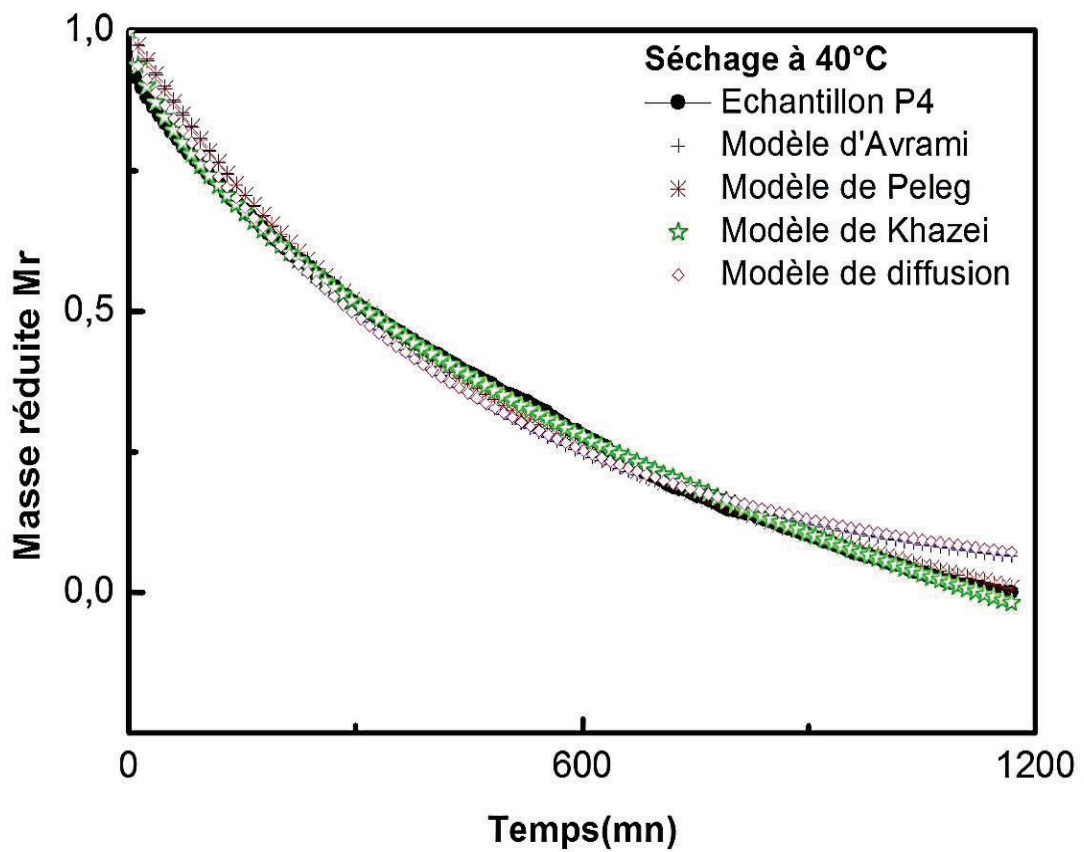
Figure 11 (a, b, c, d, et e): Modélisation des courbes à 406W.

### 3.4.2 A l'Etuve.

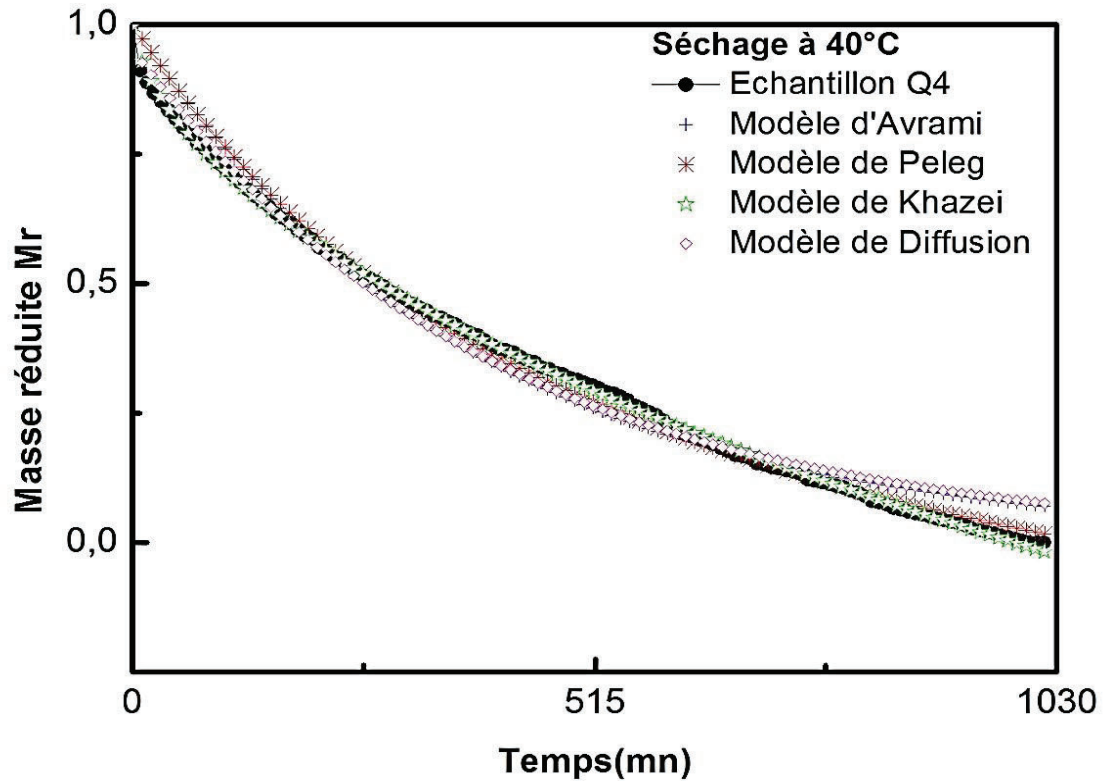
Les figures 12, 13 et 14 représentent les courbes de la cinétique de séchage à l'étuve à 40, 50 et 90°C modélisées des échantillons du rachis.



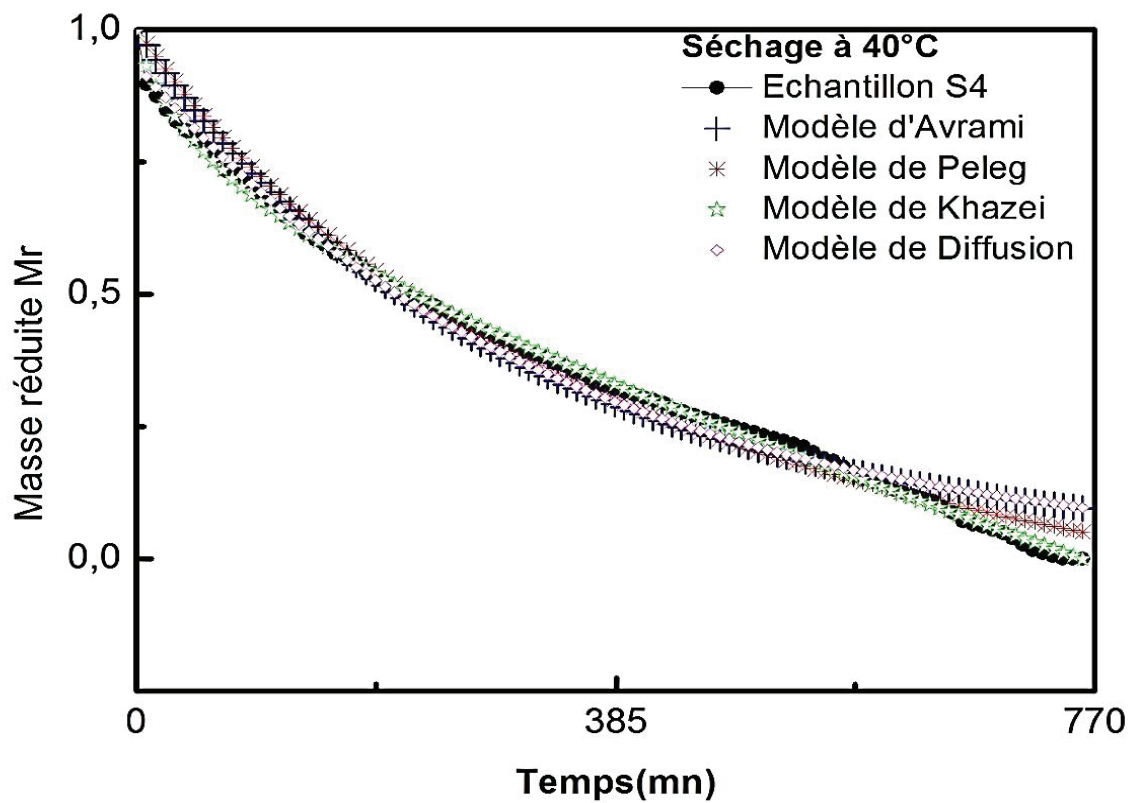
(a)



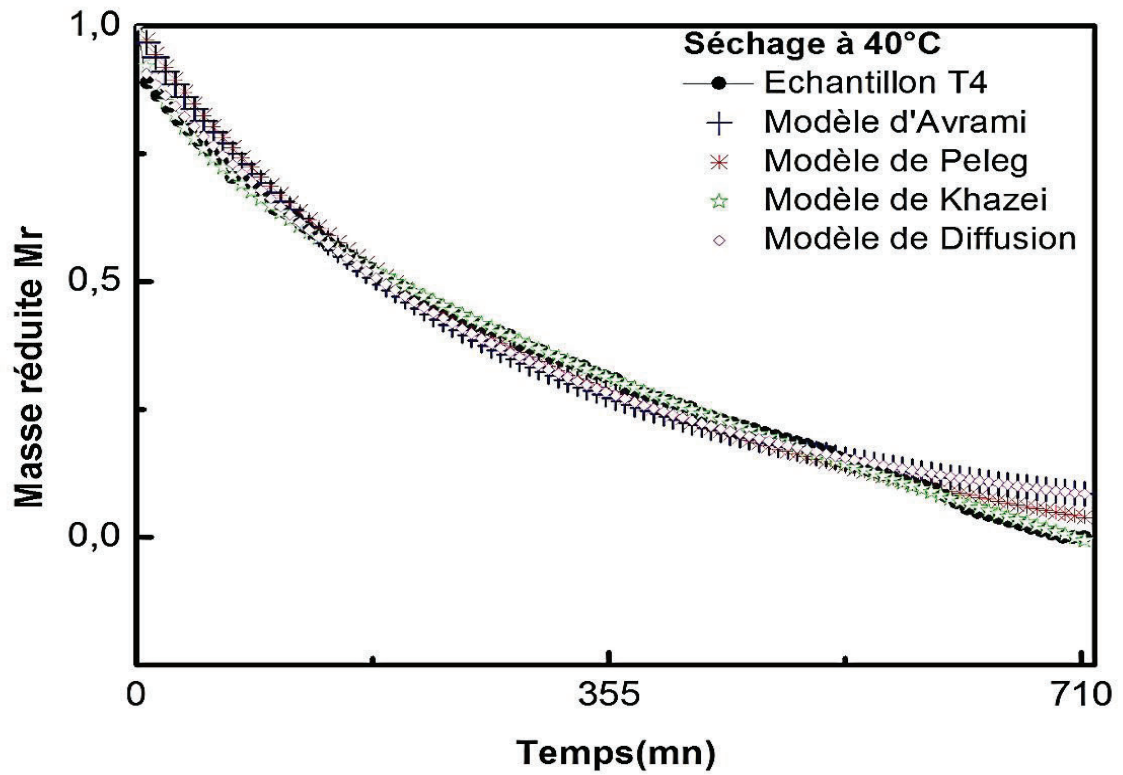
(b)



(c)

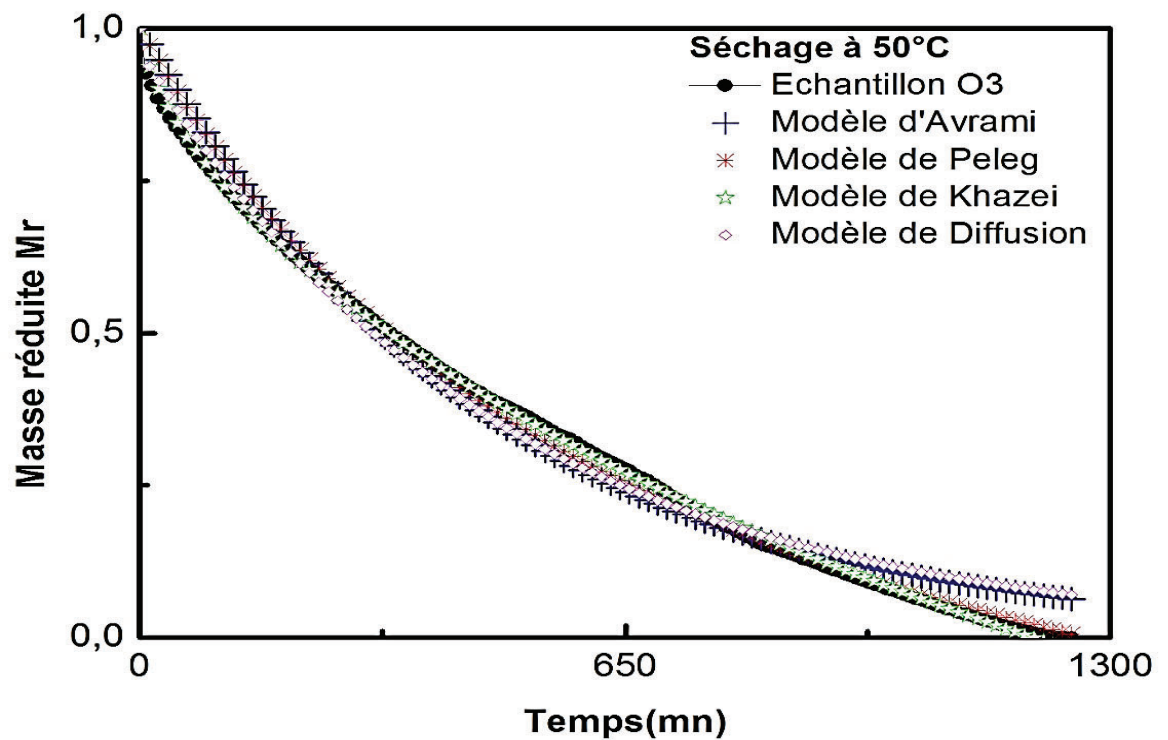


(d)

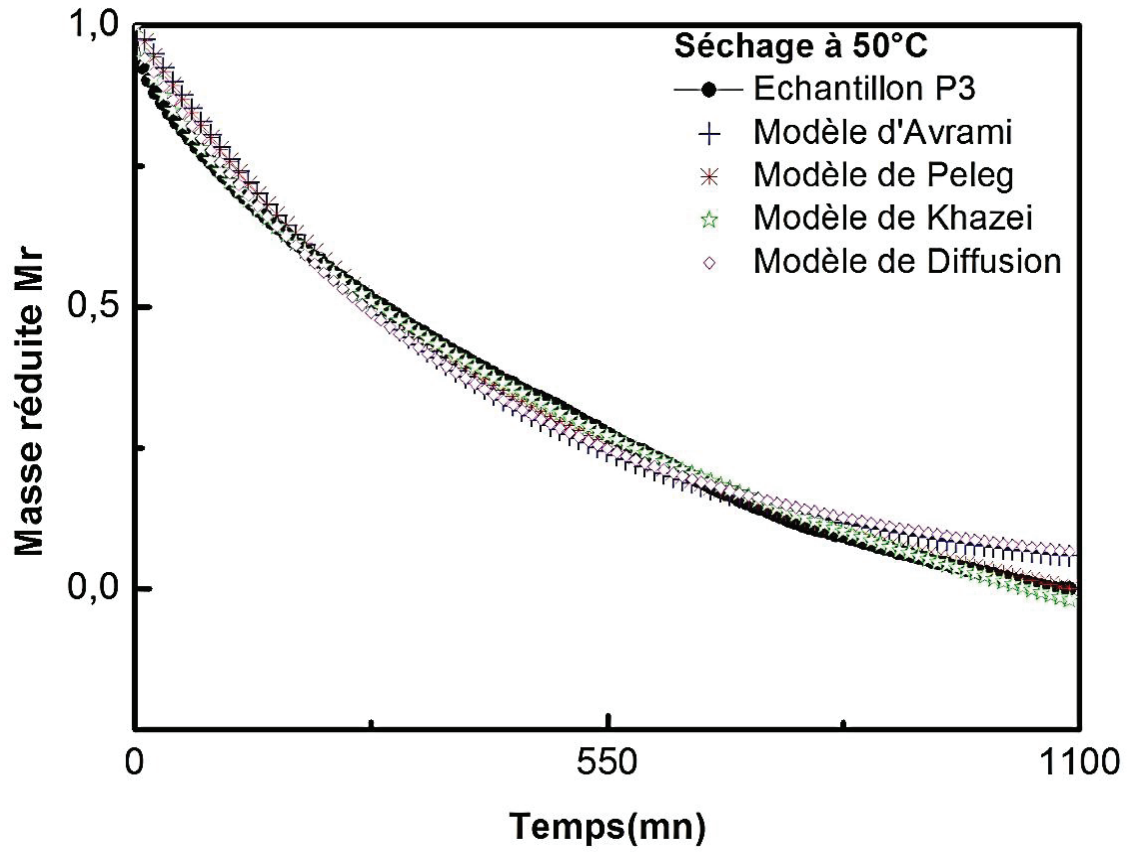


(e)

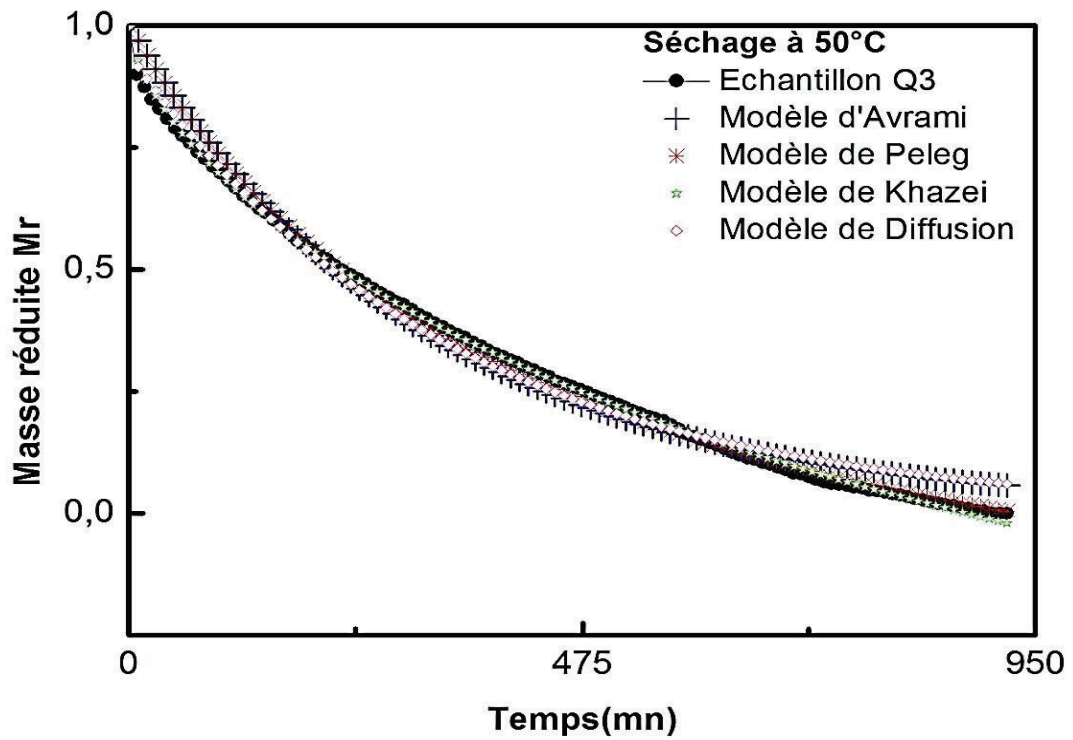
Figure 12 (a, b, c, d, et e): Modélisation des courbes à 40°C.



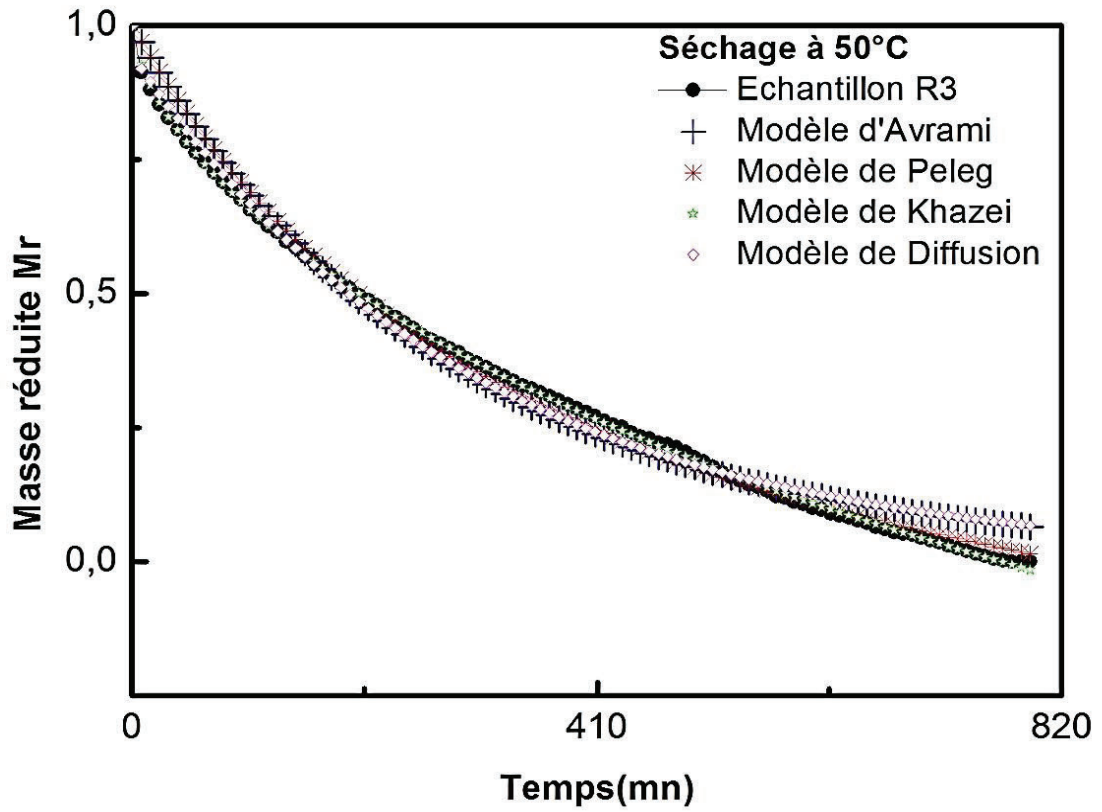
(a)



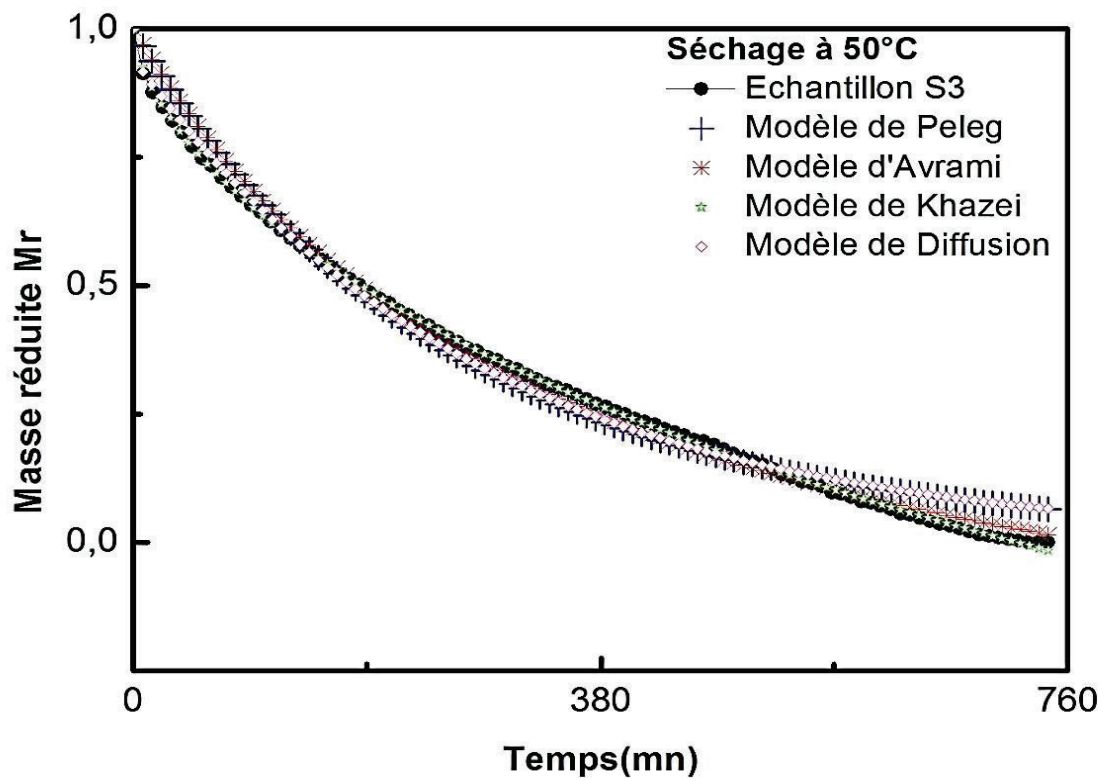
(b)



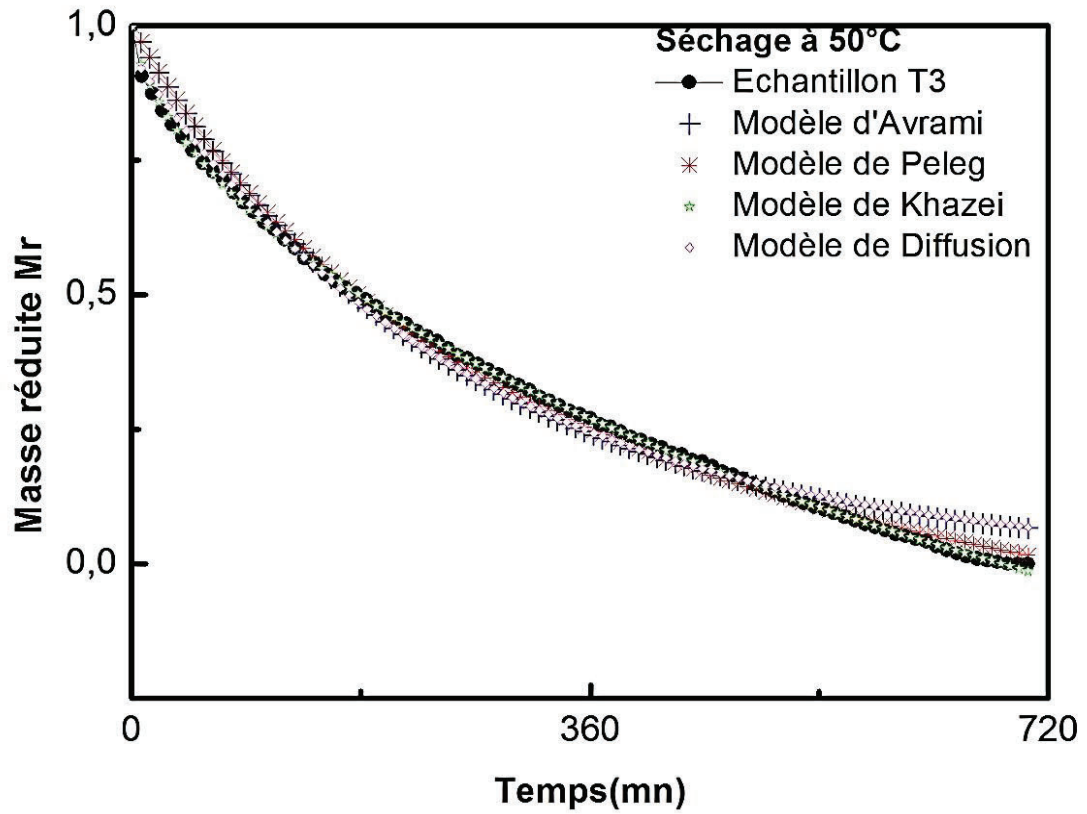
(c)



(d)

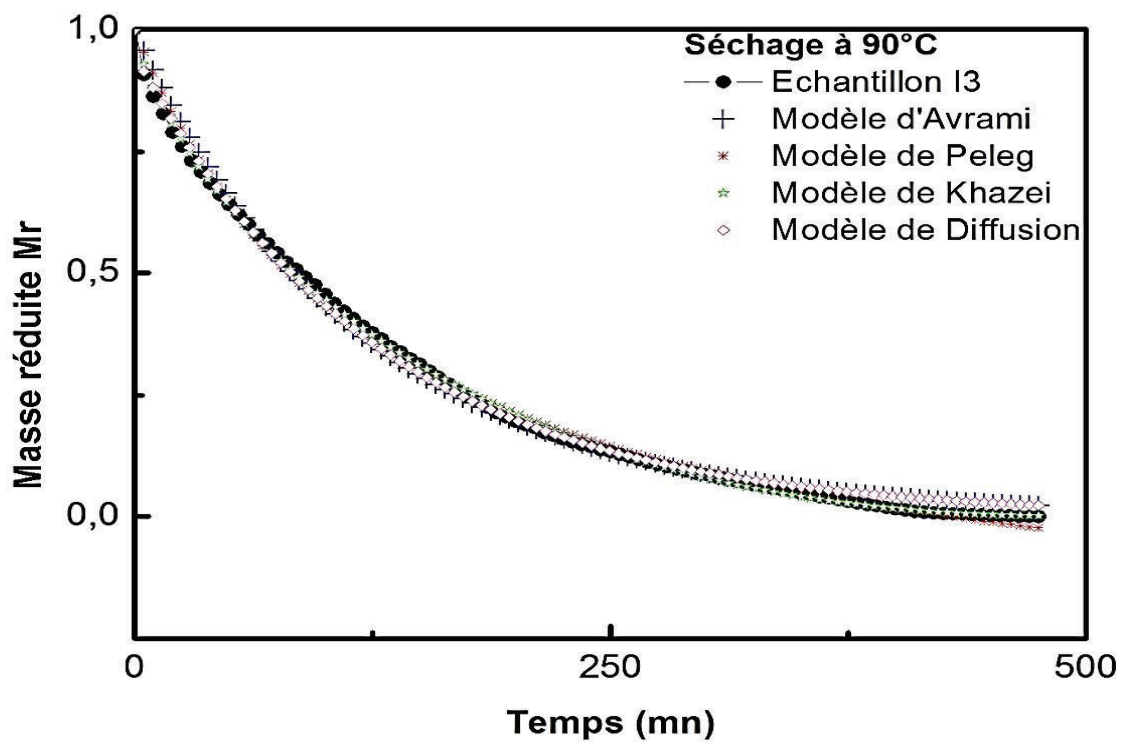


(e)

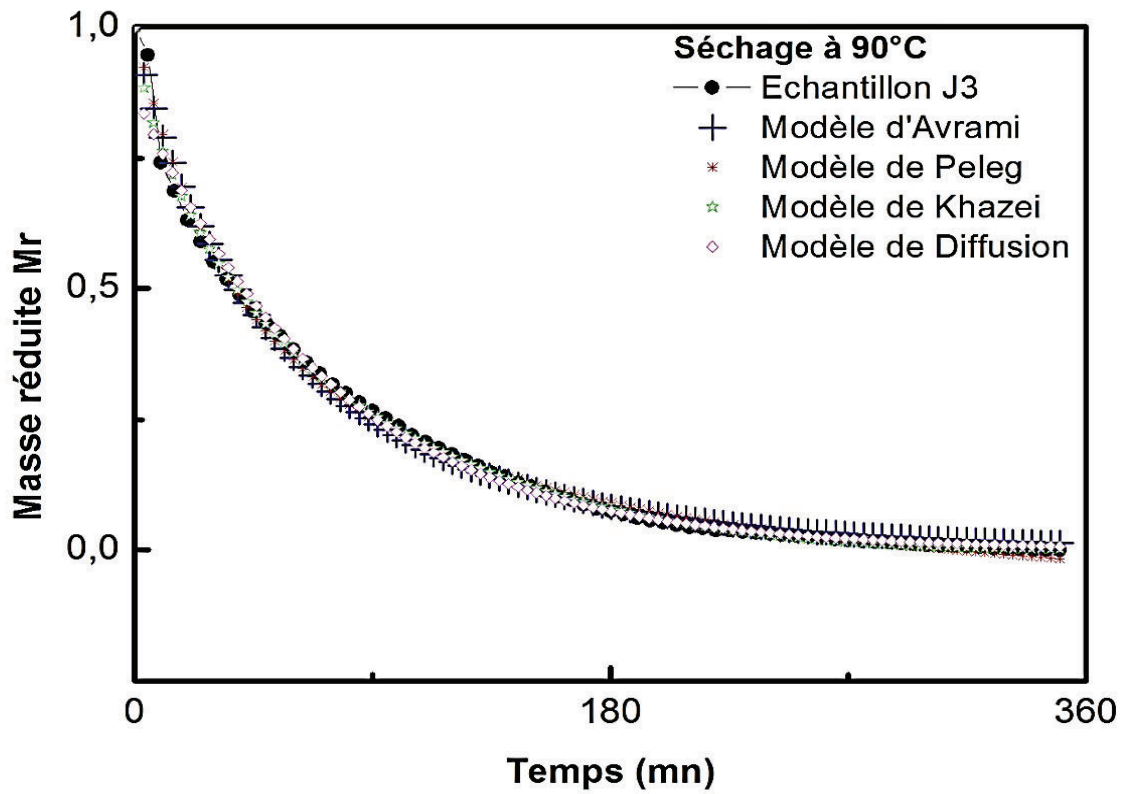


(f)

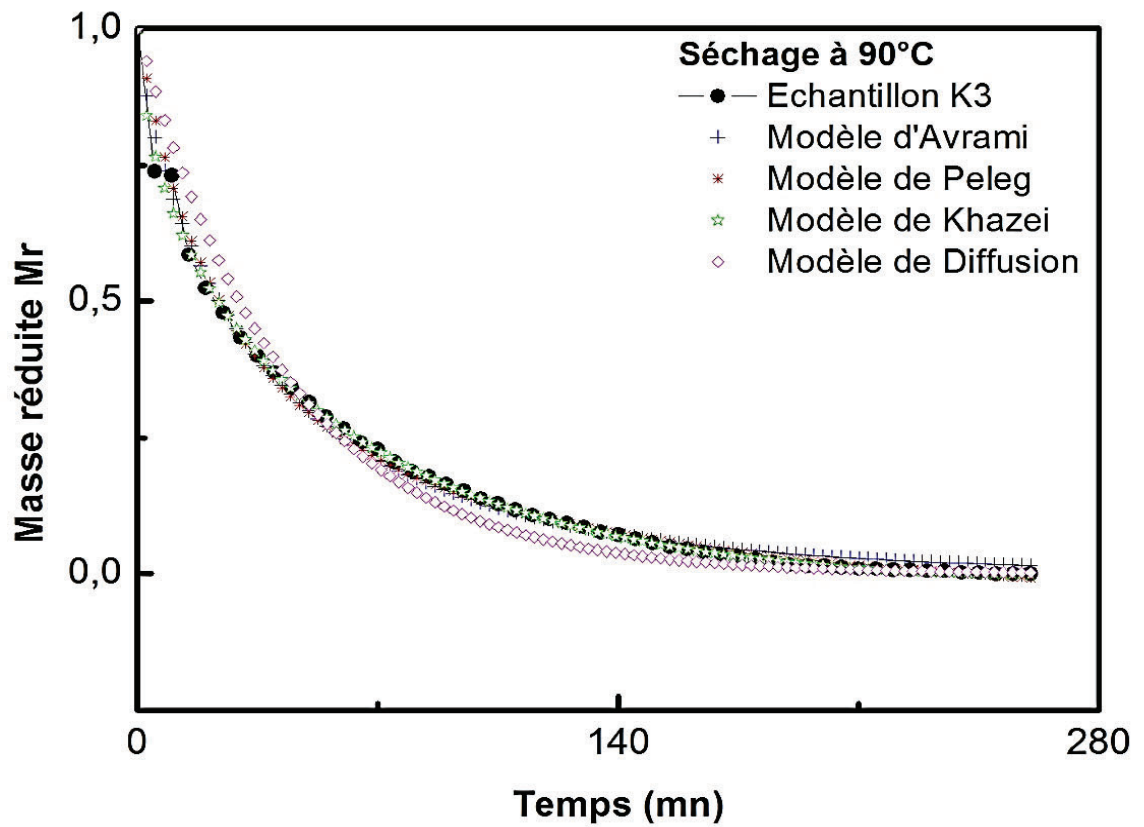
Figure 13 - 1 (a, b, c, d, e et f): Modélisation des courbes à



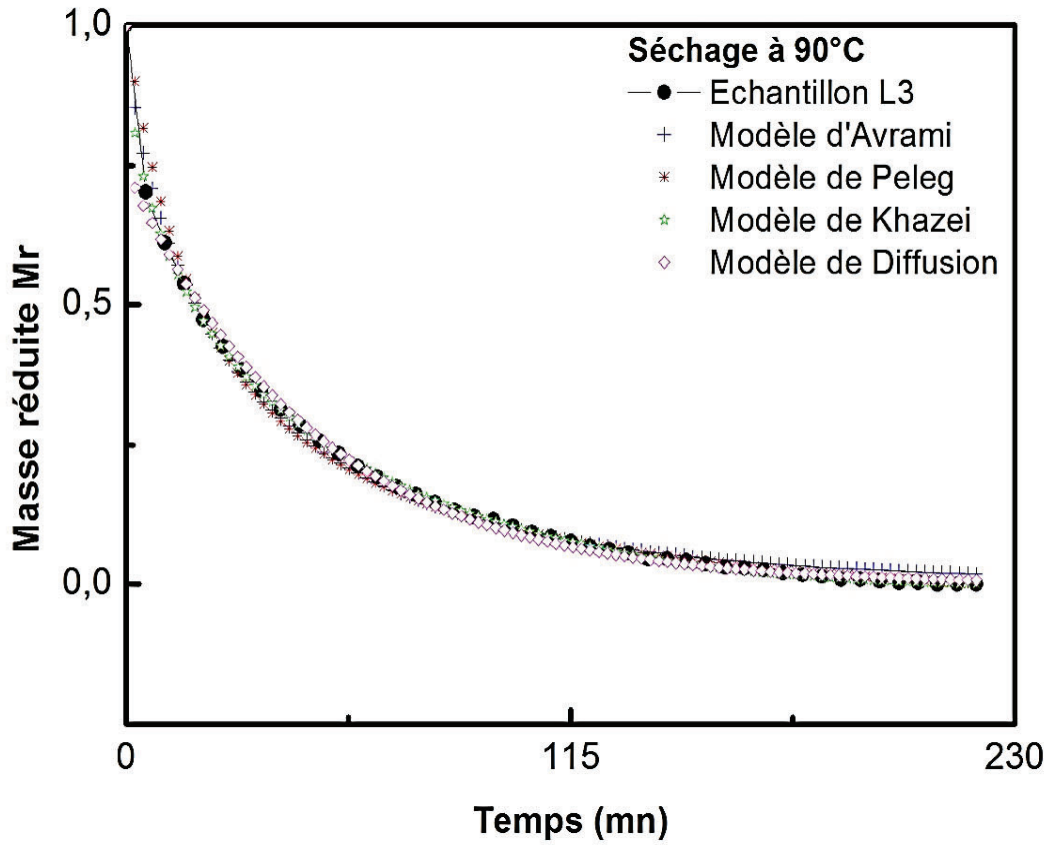
(a)



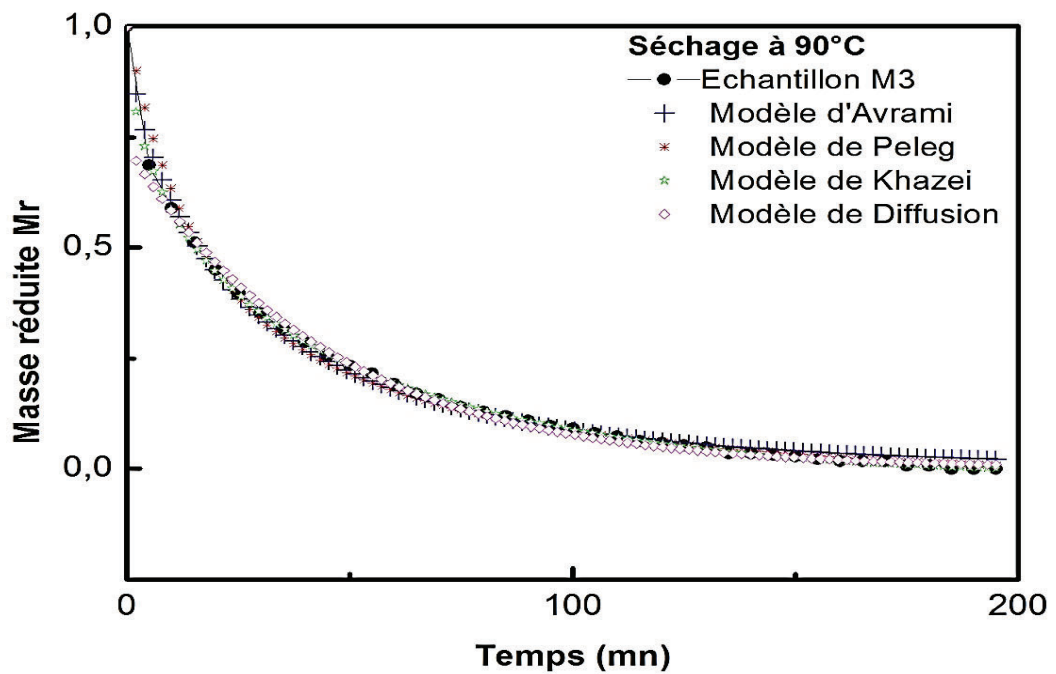
(b)



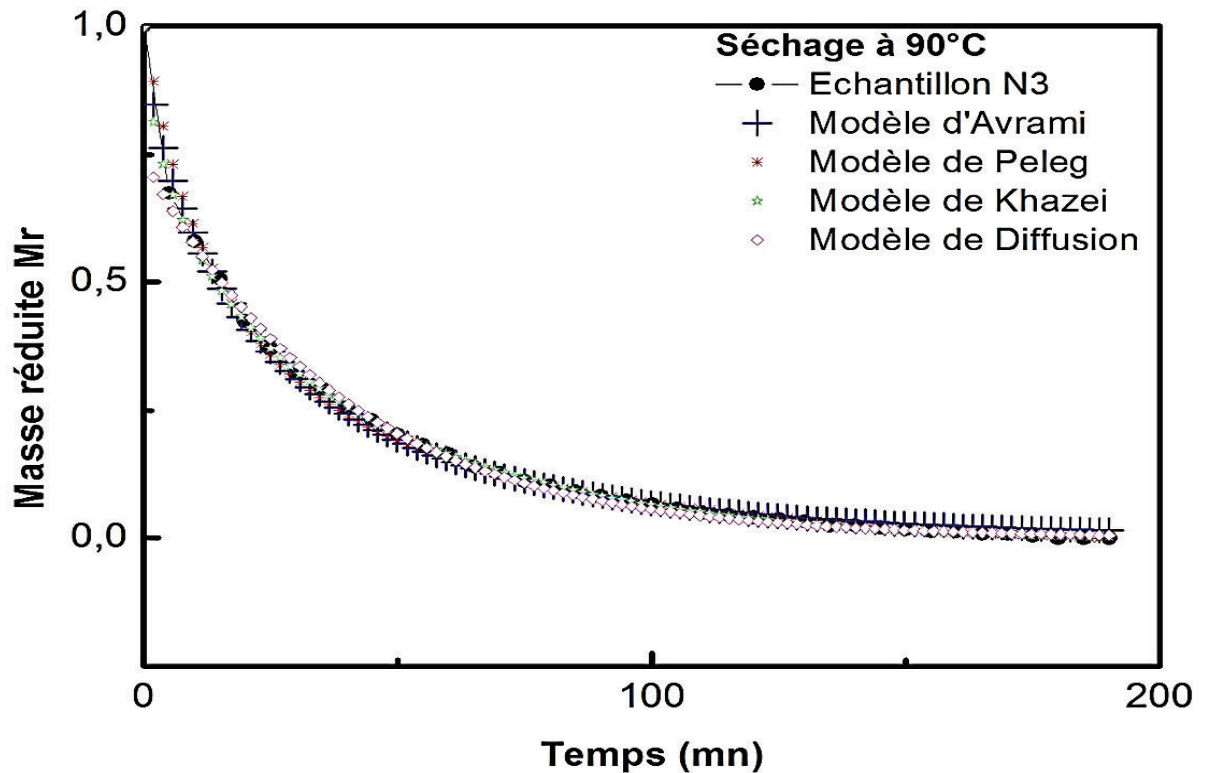
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 13 - 2 (a, b, c, d, e et f): Modélisation des courbes à 90°C.

### 3.4.3 A l'air libre

Les figures 14 (a, b, c, d, e et f) dans les annexes, représentent les courbes de la cinétique de séchage à l'ambiante modélisées des échantillons du rachis.

### 3.6 Choix du modèle adapté

Il se caractérise par le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le khi-carre ( $\chi^2$ ). Et on dit que, le modèle simule mieux la courbe expérimentale, quand le  $R^2$  se rapproche de l'unité et le  $\chi^2$  de zéro.

On remarque que, tous les modèles utilisés (Avrami, Peleg, Khazei et Diffusion) le coefficient de détermination est supérieur ou égal à 0.95 et le khi carré inférieur à 0.01 (Tableaux IV et V). On peut dire qu'ils simulent bien les courbes de séchage. Par ailleurs, le modèle qui simule mieux, c'est le modèle de Khazei. Si, on peut suivre l'ordre, suivi des modèles de Diffusion, de Peleg et en dernière position d'Avrami.

Tableau IV : Valeurs des coefficients de Détermination ( $R^2$ ) et Chi-carré ( $X^2$ ) des modèles utilisés à l'air libre, à 40, 50 et 90°C.

Séchage à	Echantillons à	Modèle d'Avrami		Modèle de Peleg		Modèle de Khazaei		Modèle de Diffusion	
		$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$
L'ambiante	0,87 m de la base	0,99908	5,72459E-5	0,99475	3,2661E-4	0,9995	3,22103E-5	0,99922	4,91232E-5
	1,74m de la base	0,99909	5,24371E-5	0,99391	3,50729E-4	0,99917	4,89917E-5	0,99884	6,77101E-5
	2,59m de la base	0,99916	4,85318E-5	0,99342	3,80271E-4	0,99923	4,61748E-5	0,99822	1,04816E-4
	3,45m de la base	0,99833	9,06165E-5	0,99105	4,85754E-4	0,99908	5,18777E-5	0,99652	1,91979E-4
	4,32m de la base	0,99727	1,56384E-4	0,98625	7,86439E-4	0,99914	5,1017E-5	0,99656	2,00303E-4
	5,19m de la base	0,99785	1,2006E-4	0,98853	6,39411E-4	0,99989	6,32901E-5	0,99661	1,92271E-4
	1,15m de la base	0,9802	0,00142	0,99354	4,62837E-4	0,99806	1,40361E-4	0,97794	0,00159
	1,95m de la base	0,9806	0,00132	0,99256	5,06507E-4	0,9991	6,18019E-5	0,98229	0,00121
	2,80m de la base	0,97813	0,00145	0,99009	6,58382E-4	0,99931	4,68443E-5	0,9815	0,00124
	3,66m de la base	0,9797	0,00135	0,99064	6,22349E-4	0,99932	4,58825E-5	0,98299	0,00114
40°C	4,53m de la base	0,97282	0,0017	0,98265	0,00109	0,99849	9,67265E-5	0,97859	0,00135
	5,40m de la base	0,97592	0,00153	0,98545	9,22087E-4	0,99922	5,03333E-5	0,98197	0,00116
	1,01m de la base	0,9803	0,00134	0,99261	5,03723E-4	0,99925	5,15056E-5	0,9819	0,00124
	1,88m de la base	0,98197	0,00125	0,99372	4,36643E-4	0,99892	7,59615E-5	0,98288	0,0012
	2,73m de la base	0,98125	0,00125	0,99169	5,52267E-4	0,99899	6,82805E-5	0,98537	9,81199E-4
	3,59m de la base	0,98116	0,00125	0,9916	5,59021E-4	0,99961	2,65418E-5	0,98487	0,00102
	4,46m de la base	0,98129	0,00124	0,99154	5,62184E-4	0,99971	1,93823E-5	0,98525	9,90807E-4
	5,33m de la base	0,98189	0,00121	0,99209	5,29803E-4	0,99977	1,56311E-5	0,98551	9,81602E-4
	1,38m de la base	0,99385	4,09036E-4	0,99675	2,16101E-4	0,99919	5,49337E-5	0,99597	2,71237E-4
	2,50m de la base	0,99411	3,24224E-4	0,99496	2,77371E-4	0,99688	1,77071E-4	0,99336	3,70976E-4
90°C	3,41m de la base	0,99395	3,0353E-4	0,99383	3,09707E-4	0,9979	1,09565E-4	0,96452	0,00182
	4,36m de la base	0,99519	2,31241E-4	0,99252	3,5998E-4	0,99976	1,22894E-5	0,99825	8,61456E-5
	5,29m de la base	0,99579	2,0582E-4	0,99254	3,64576E-4	0,99976	1,25284E-5	0,99758	1,21469E-4

Tableau V : Valeurs des coefficients de Détermination ( $R^2$ ) et Chi-carré ( $X^2$ ) des modèles utilisés au four à micro-ondes.

Séchage à	Echantillons à	Modèle d'Avrami		Modèle de Peleg		Modèle de Khazaei		Modèle de Diffusion	
		$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$	$R^2$	$X^2$
<b>126W</b>	2,87m de la base	0,9977	2,16563E-4	0,99317	6,43731E-4	0,99967	3,11895E-5	0,99664	3,18046E-4
	4,08m de la base	0,98281	0,00159	0,99628	3,43438E-4	0,99665	3,12753E-4	0,97942	0,00191
	5,40m de la base	0,991	7,67364E-4	0,9981	1,61813E-4	0,99874	1,08706E-4	0,99067	7,99098E-4
	6,44m de la base	0,98952	8,93558E-4	0,99821	1,52403E-4	0,99868	1,15301E-4	0,98004	0,00172
	7,32m de la base	0,98626	0,00118	0,99648	3,02993E-4	0,99777	1,98179E-4	0,97529	0,00216
	8,06m de la base	0,98152	0,0017	0,99421	5,32383E-4	0,99528	4,50219E-4	0,9632	0,00345
<b>252W</b>	6,37m de la base	0,99596	3,43291E-4	0,99162	7,13103E-4	0,99909	7,91681E-5	0,9933	5,75783E-4
	7,25m de la base	0,98561	0,00125	0,99859	1,22048E-4	0,99868	1,16621E-4	0,97332	0,00234
	7,99m de la base	0,99621	3,52016E-4	0,99681	2,96577E-4	0,99982	1,73328E-5	0,98234	0,00166
	2,73m de la base	0,994	4,61607E-4	0,9201	0,00614	0,99882	9,32254E-5	0,96324	0,00286
	3,94m de la base	0,98888	8,77582E-4	0,93465	0,00516	0,9995	4,03055E-5	0,96764	0,00259
	5,25m de la base	0,99091	7,3843E-4	0,94025	0,00485	0,99906	7,82885E-5	0,97117	0,00238
<b>406W</b>	6,30m de la base	0,97431	0,00138	0,97887	0,00113	0,99415	3,27061E-4	0,98524	8,07552E-4
	7,18m de la base	0,97511	0,00116	0,98316	7,83757E-4	0,99486	2,50189E-4	0,99025	4,63904E-4
	7,92m de la base	0,95543	0,00212	0,96876	0,00148	0,99815	9,20013E-5	0,92879	0,00346

Tableau VI: Valeurs des différents paramètres utilisés à l'air libre et l'étuve (40, 50 et 90°C)

Séchage à	Echantillon à	Modèle d'Avrami		Modèle de Peleg		Modèle de Khazai				Modèle de Diffusion		
		a	n	a	b	a	b	k	n	a	k	b
ambiante	0,87m de la base	0,01616	0,94587	57,5861	0,83381	1,07008	-1,3159E-4	87,33322	0,89309	0,96002	0,01207	1000
	1,74m de la base	0,02231	0,90541	46,74797	0,85895	1,03185	-6,92242E-5	70,25411	0,88065	0,93529	0,01365	1000
	2,59m de la base	0,02276	0,91094	44,17986	0,86266	0,96805	8,41643E-5	60,44806	0,93489	0,94836	0,01455	1000
	3,45m de la base	0,02843	0,89497	35,50322	0,88287	0,94281	1,49287E-4	48,28148	0,96531	0,94543	0,0172	1000
	4,32m de la base	0,02344	0,94703	35,28385	0,87636	0,92159	2,20368E-4	46,16269	1,06477	0,99056	0,01861	1000
	5,19m de la base	0,02734	0,91974	33,31096	0,88075	0,94123	1,61837E-4	45,19905	1,00036	0,96427	0,01888	1000
	1,15m de la base	0,00122	1,07653	523,54729	0,5991	6,18433	-3,5329E-4	7442,12852	0,74505	0,98335	0,00196	2,90632E9
	1,95m de la base	0,00209	1,01604	424,67636	0,64418	5,45181	-2,34051E-4	8046,79007	0,67746	0,96229	0,00222	1,28362E6
	2,80m de la base	0,00277	0,99115	367,51869	0,65484	5,48726	-7,64953E-5	11729,3705	0,61408	0,9507	0,00249	4,84646E11
	3,66m de la base	0,00346	0,98891	295,32902	0,66119	2,9061	3,61049E-5	3451,05976	0,61462	0,95072	0,00307	2405,82622
40°C	4,53m de la base	0,00434	0,94886	292,46447	0,66802	0,39191	8,12282E-4	103,23332	0,6807	0,93387	0,00298	1,87677E8
	5,40m de la base	0,00519	0,93853	253,05727	0,68457	0,63471	6,50865E-4	236,45852	0,59977	0,92938	0,00337	1517,62286
	1,01m de la base	0,00196	1,0168	451,53524	0,64424	5,58952	-2,19493E-4	8992,6578	0,67532	0,96299	0,00209	7,69655E10
	1,88m de la base	0,00219	1,02531	384,11512	0,64681	6,59059	-4,91289E-4	6698,21878	0,72226	0,96764	0,00247	2314,5169
	2,73m de la base	0,00356	0,98084	291,01523	0,68856	6,18279	-4,47687E-4	6798,74883	0,66689	0,94214	0,00299	3,61848E12
	3,59m de la base	0,0042	0,97051	262,80093	0,68317	5,88238	-3,22015E-4	7201,76888	0,6403	0,94495	0,00333	7,97941E10
	4,46m de la base	0,00485	0,9581	241,1453	0,69095	4,2715	-2,4488E-4	4321,08379	0,63165	0,94166	0,00358	3,64628E10
	5,33m de la base	0,00469	0,9706	234,12657	0,68335	4,73076	-3,03461E-4	4589,00876	0,64149	0,94546	0,00374	3,46164E12
	1,38m de la base	0,00966	0,96812	100,09266	0,76683	5,28314	-0,00275	973,0031	0,77686	0,94985	0,00782	183906,0916
	2,50m de la base	0,03343	0,82987	42,52567	0,86219	1,3353	-5,9928E-4	104,1092	0,7028	0,87609	0,01369	1,10425E6
90°C	3,41m de la base	0,0638	0,7522	26,41143	0,89041	1,38757	-7,77015E-4	81,75462	0,60719	20,20219	0,02342	1,00005
	4,36m de la base	0,09117	0,70157	20,15647	0,90875	1,56909	-0,00112	94,50166	0,53898	0,74362	0,02088	1000
	5,29m de la base	0,10395	0,68486	17,88532	0,91544	1,30533	-6,61887E-4	55,29446	0,54898	0,72803	0,02243	1000
	6,01m de la base	0,10486	0,70406	16,09582	0,91334	1,25787	-7,46076E-4	43,4913	0,58235	0,74131	0,02579	1000

Tableau VII: Valeurs des différents paramètres utilisés au four à micro-ondes.

Séchage à	Echantillon à	Modèle d'Avrami			Modèle de Peleg			Modèle de Khazai			Modèle de Diffusion			
		a	n		a	b		a	b	k	n	a	k	b
<b>126W</b>	2,87m de la base	0,00198	0,00198	102,23111	0,46997	9,5389E-5	96,78547	1,26913	40,8716	0,2304	1,02154			
	4,08m de la base	0,00139	1,44611	130,86095	0,28643	-0,01478	835,58743	1,00883	63,2412	0,02126	1,01388			
	5,40m de la base	0,00316	1,28655	105,43099	0,44884	0,00331	52,0345	1,3492	37,2457	0,02089	1,01991			
	6,44m de la base	0,01269	1,21722	39,59998	0,54342	-0,02573	290,19091	0,94472	1,06123	0,0302	20058,89349			
	7,32m de la base	0,01884	1,22527	28,30364	0,53304	-0,06139	338,8033	0,95625	1,05141	0,04235	1,03598E9			
	8,06m de la base	0,01354	1,3298	30,92435	0,43522	-0,07573	318,61471	0,98306	1,08013	0,04398	29969,35043			
<b>406W</b>	2,73m de la base	0,01357	1,69447	9,23616	0,82822	8,64495E-4	11,82968	1,89786	-53,104	0,05567	1,00708			
	3,94m de la base	0,01939	1,52191	10,10507	0,81738	0,00169	11,69482	1,93245	-52,299	0,05494	1,00612			
	5,25m de la base	0,02227	1,48953	9,90673	0,80462	0,00181	11,3448	1,85379	-52,083	0,05565	1,00668			
	6,30m de la base	0,2311	0,80649	3,87551	0,91257	0,00501	3,96471	1,45454	0,29639	0,0632	4,10896			
	7,18m de la base	0,3048	0,72991	3,04346	0,93861	0,00416	3,42598	1,24526	0,25309	0,05798	5,39808			
	7,92m de la base	0,32437	0,70348	2,92672	0,94588	0,00499	3,16156	1,59615	0,89139	0,16634	3,34286E9			

Les tableaux VI et VII, présentent les valeurs des paramètres  $n$  des modèles Khazaei et d'Avrami, qui sont presque égales à 1 dans les différentes conditions de séchage. Pour Avrami, la valeur de  $n$  est proche de 1, on pourrait dire que la diffusion de l'eau serait unidirectionnelle (voir chapitre 2.6.1). Ceci pourrait être dit que, l'eau s'évapore préférentiellement par les surfaces de base pratiquement de tous les échantillons. D'où, ça fait penser que, le séchage se passe dans le sens longitudinal.

Par contre, le modèle de Peleg présente le paramètre  $a$  comme l'inverse de la vitesse de séchage à l'instant initial (voir chapitre 2.6.1). On pourrait donc dire que, la vitesse de séchage est presque considérable en allant de la base vers le sommet du bambou.

Par ailleurs, le modèle de Diffusion présente les valeurs du paramètre  $k$  comme un paramètre proportionnel au coefficient de diffusion (voir chapitre 2.6.1) qui devraient nous donner la possibilité de calculer le coefficient de diffusion.



**CONCLUSIONS  
ET PERSPECTIVES**

## **CONCLUSION GENERALE**

Ce travail avait pour objectif, étudié l'effet des conditions de séchage sur la cinétique de séchage du rachis du palmier raphia hookeri au four à micro-ondes, à différente puissance, à l'étuve à différente température et à l'air libre.

Les résultats obtenus montrent que, la vitesse de séchage du rachis dépend de la position de l'échantillon sur le bambou et les conditions (puissance ou température) de séchage. D'où, la cinétique de séchage du rachis n'est pas homogène.

Les résultats expérimentaux au four à micro-ondes, à l'étuve et à l'ambiante, présentent la même cinétique. C'est-à-dire, le rachis se sèche du sommet vers le bas. La durée varie au fur et à mesure qu'on change la température ou la puissance. Plus la température ou la puissance augmente, plus le temps de séchage diminue.

Le modèle de Khazaei est celui qui décrit mieux la cinétique de séchage du rachis au four à Micro-ondes, à l'Etuve et à l'air libre.

### **En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux par :**

- l'étude de l'influence des paramètres de la cinétique de séchage sur la qualité du produit à sécher,
- l'étude comparative d'un modèle économique pour estimer le cout du séchage au four à Micro-ondes et à l'étuve.

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

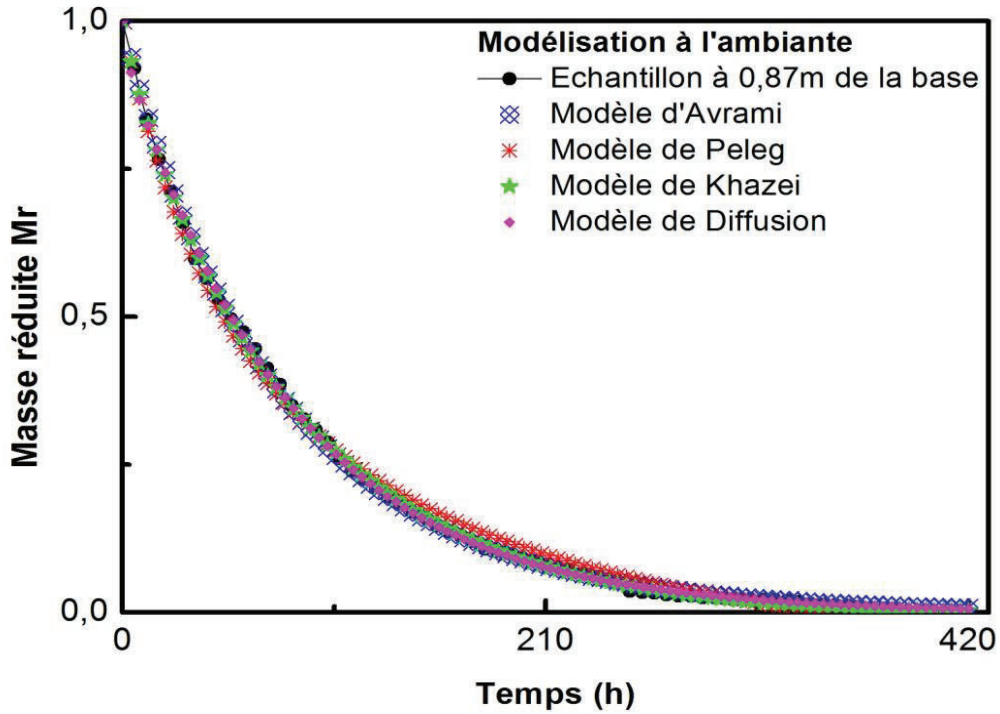
1. J.J. Bimbenet, C. Bonazzi and E. Dumoulin, 'Séchage, Cuisson, Cuisson-Extrusion', In: J.J. Bimbenet, A. Duquenoy and G. Trystram (Eds), 'Génie des Procédés Alimentaires', Dunod, Paris, 2002.
2. K. Sacilik, 'The Thin Layer Modelling of Tomato Drying Process', *Agriculturae Conspectus Scientificus*, Vol. 72, N°4, pp. 343 - 349, 2007.
3. Ndotam, I. 2005. Gestion des aires protégées au Tchad : contraintes et perspectives pour une gestion participative. Mémoire de DESS, Université de Kinshasa.
4. Aubertin, C. 2005. Représenter la Nature ? « ONG et Biodiversité », Editions IRD, Paris.
5. Drying, the theory and practice of industrial pharmacy Rankelli AS, Lieberman HA, Schiffman RF. pp 327. Editions Lea&Febiger, Philadelphia, 1986.
6. Baillon B, Séchage sous vide micro-ondes combinés de granulés pharmaceutiques. Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, 1996.
7. Elenga R. G, Dirras G. F, Maniongui J. G, Djemia P., Biget M.P, 2009: On the microstructure and physical proprieties on untreated raffia textilis fiber. *Composites: part A* N° 40; 418-422p.
8. Elenga R. G, Dirras G. F, Maniongui J. G, Mabiala B., 2011: Thin-layer drying of raffia textilis fiber. *BioRessources* vol 6, N°4; 4135-4144p.
9. Elenga R. G, Massamba D., Niéré R.R, Maniongui J. G, Dirras G., 2013: Convective and Microwave Drying of raffia Fruit: Modeling and effects on Color and Hardness. *Research Journal of Applied sciences, Engineering and technology* vol 6 N°15; 2715-2723p
10. Le Person S, Séchage sélectif d'enductions pharmaceutiques. Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, 1996.
11. Vialard-Goudou A, Maupas P, Carlier A, Mothiron JC ; Les micro-ondes: technologie et recherche sur les applications en pharmacie. *Sciences et techniques Pharmaceutiques*, 1976, 2,493-501.
12. Berteaud AJ, Delmotte M ; Les micro-ondes de la cuisine à l'industrie. *La Recherche*, 1993 ; 24, 286-94.

13. C. AHOUANNOU, 2000, Etude de Séchage des Produits Agroalimentaires Tropicaux : Cas du manioc, du gingembre, du gombo et du piment, Thèse de Doctorat, Université Nationale du Benin, 214 p.
14. S. YUCEF-ALI, 2001, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects a convection forcée : Application à la pomme de terre, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, France, 206 p.
15. KANMOGNE, 2002, Contribution à l'Etude du Séchage du Cacao au Cameroun : Conception, Réalisation et Modélisation d'un Séchoir Adapte aux conditions Locales, These de Doctorat, Université de Yaounde, Cameroun, 127 p.
16. L. BENNAOUM, & A. BELHAMRI, 2002, Design and simulation of a solar dryer for agriculture products, Journal of Food Engineering, article in press.
17. L. BENNAOUM, & A. BELHAMRI, 2005, Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes, Journal of Food Engineering, article in press.
18. B. Touati, & al., 2008, Experimental study and mathematical modelling of thin layer drying of Mentha viridis by using indirect solar dryer, Proceeding of CHT-08 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, May 11-16, Marrakech, Morocco.
19. Fornell, & al., 1980, Courbes caractéristiques de séchage de produits biologiques, Entropie, vol. 91, pp. 3-6.
20. B. Touati, & al., 2006, Isothermes d'adsorption-désorption des feuilles de menthe verte (Mentha viridis), Premier Séminaire Maghrebin sur les Sciences et les Technologies de Séchage, (SMSTS'2006), le 17-19 Décembre 2006 Tozeur-Tunisie, pp 208-214.
21. B. Touati, & al., 2007, Effet de la température sur les isothermes et la chaleur isostérique de sorption des feuilles de menthe (Mentha viridis), Société Française de la Thermique (SFT'2007), du 29 mai au 01 juin 2007 L'île des Embiez, France, pp 1215-1221.
22. M. Kouhila, 2001, Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (Menthe, Verveine, Sauge et Eucalyptus) de la region de Marrakech, These de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Morocco, 170 p.
23. S. Youcef-Ali, & al., 2001, Numerical and experimental study in forced convection, International Journal of EnergyResearch, vol. 52, pp. 537-553.

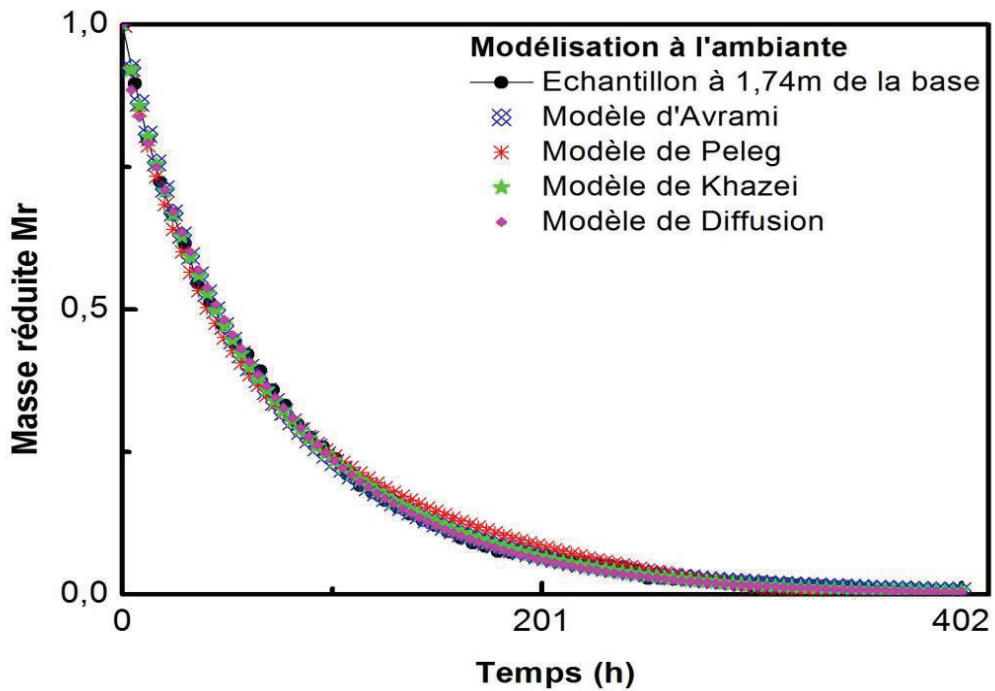
The word "ANNEXES" is written in a large, bold, black, gothic-style font with a red outline. The text is set against a light gray background that resembles a rolled-up scroll with circular corners. The scroll is reflected below, creating a mirror image of the text and background.

ANNEXES

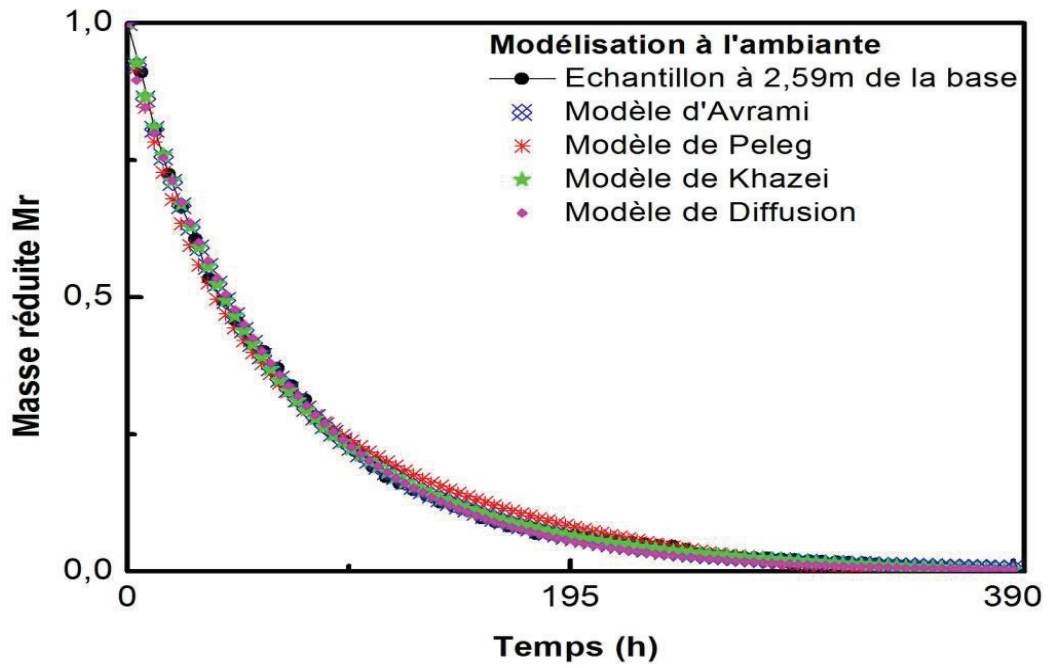
A1 : Modélisation des courbes de cinétique à l'air libre.



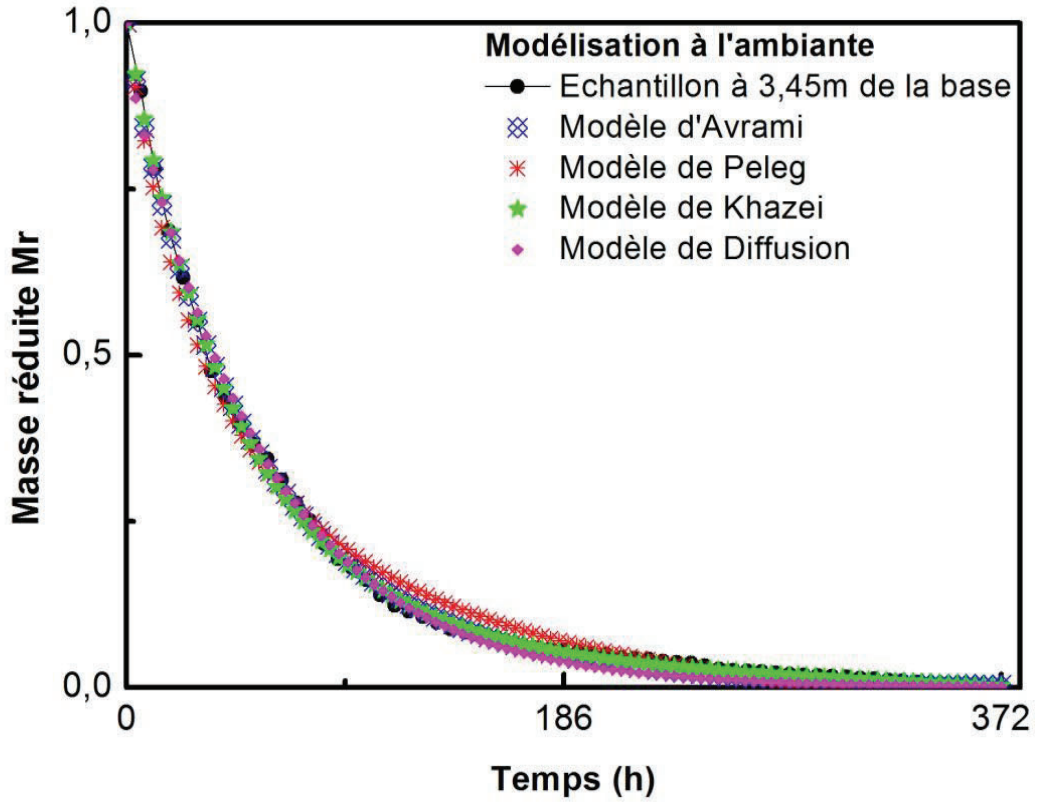
(a)



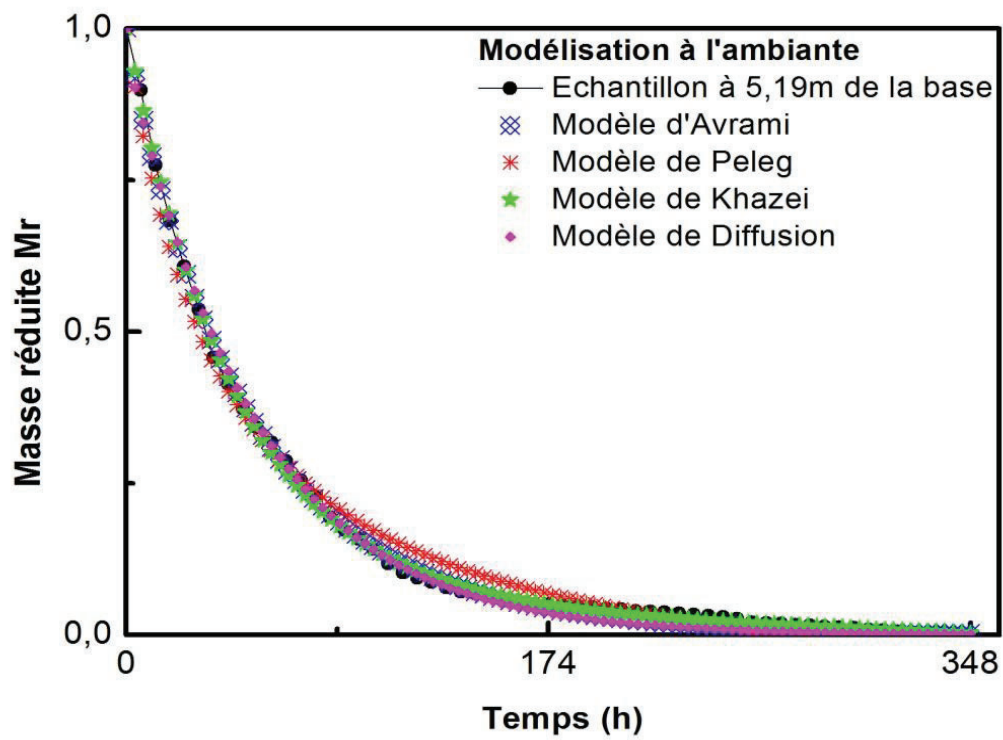
(b)



(c)



(d)



(d)

Figure 14 (a, b, c et d): Modélisation des courbes de la cinétique de séchage à l'air libre.

## TABLE DE MATIERE

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Dédicace.....	iii
Remerciements.....	v
Résumé.....	vii
Summary.....	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : LES GENERALITES.....	5
1.1 Introduction.....	6
1.2 Description du palmier raphia.....	6
1.2.1 Espèces.....	7
1.2.2 Culture.....	7
1.2.3 Entretien culturel.....	8
1.2.4 Récolte.....	8
1.2.5 Utilisations.....	8
1.3 Le séchage.....	9
1.3.1 Méthodes de séchage.....	9
1.3.1.1 Séchage convectif.....	9
1.3.1.2 Séchage par conduction.....	10
1.3.1.3 Séchage par rayonnement thermique.....	10
1.3.1.4 Séchage par chauffage diélectrique.....	12
1.4 Micro-ondes.....	12
1.4.1 Configuration d'une installation micro-ondes.....	12
1.5 Cinétique de séchage et courbes caractéristiques.....	14
1.5.1-Introduction.....	14
1.5.2-Modelisation des cinétiques de séchage.....	15
1.5.2.1-Courbes de séchage.....	15
1.5.2.2-Modele de séchage.....	16

1.5.2.3-Parametres statistiques utilises.....	16
1.5.2.4 Modèle de courbes caractéristiques de séchage.....	17
I.3 Conclusion du chapitre I.....	19
CHAPITRE II. MATERIEL ET MÉTHODES.....	20
2.1 Introduction.....	21
2.2 Principaux matériels initiaux et équipements utilisés.....	21
2.2.1 Matériel végétal.....	21
2.2.2 Equipements employés.....	21
2.3 Description du milieu.....	22
2.4 Description du déroulement de la collecte des données.....	22
2.5 Plans expérimentaux.....	25
2.6 Méthodes d'analyse des données.....	26
2.6.1 Ajustement des modèles.....	27
2.6.2 Choix du modèle le plus adapté.....	29
2.7 Conclusion du chapitre II.....	29
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	30
3.1 Séchage au four à Micro-Ondes.....	31
3.2 Séchage à l'étuve.....	32
3.3 Séchage à l'air libre.....	35
3.4 Modélisation de la cinétique de séchage .....	36
3.4.1 Au four à Micro-onde.....	36
3.4.2 A l'Etuve.....	42
3.4.3 A l'ambiante.....	51
3.6 Choix du modèle adapté.....	51
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	57
BIBLIOGRAPHIE.....	59
ANNEXES.....	62

## RESUME



Dans ce travail, des résultats expérimentaux relatifs à la cinétique de séchage du rachis du palmier raphia hookeri sont présentés. Les expériences sont effectuées dans un four à micro-ondes à différentes puissance (126W, 256W et 406W) à un cycle de 60 secondes, à l'étuve à différentes température (40, 50, 60 et 90°C) avec un pas de 05 minutes et à l'air libre en faisant la pesée chaque 6h. Pour chaque essai, le produit est séché jusqu'à la stabilisation de masse. En suivant le séchage le long du rachis par rapport à la position de l'échantillon sur le bambou et dans les différentes conditions, les résultats montrent que la cinétique de séchage du bambou, n'est pas homogène.

La vitesse du séchage des échantillons, dépendrait de la position de celui-ci sur le bambou et aussi de la variation des conditions de travail (température à l'étuve et puissance au four à micro-ondes). Les résultats expérimentaux à l'ambiante, au four micro-ondes et à l'étuve sont modélisés à l'aide d'un logiciel professionnel OriginPro8. Pour le 1er rachis séché au four à micro-ondes, le modèle de Khazaei présente les meilleurs résultats à différentes puissance avec un coefficient de détermination égal à 0.9997 et un khi-carré égal à 3,11895E-5 à 126W (le tableau V). Cependant, pour le 2ème et le 3<sup>ème</sup> bambou, étudié à l'étuve et à l'ambiante, le même modèle de Khazaei simule mieux les courbes de cinétique de séchage à différentes températures (tableau IV).

**Mots-clés :** Rachis du palmier raphia, Bambou, modélisation et la cinétique de séchage.

## SUMMARY

In this work, of the relative experimental results to the kinetics of drying of the spine of the palm raffia hookeri is presented. The experiences have been done in a microwave oven to different power (126W, 256W and 406W) to a cycle of 60 seconds, to the steam room to different temperature (40, 50, 60 and 90°C) with a step of 05 minutes and to the free air as making weighed it every 6h. For every test, the product is dried until the stabilization of mass. While following the drying along the spine in relation to the position of the sample on bamboo and in the different conditions, the results showed that the kinetics of bamboo drying is not homogeneous. The speed of the drying of the samples would depend on the position of this one on bamboo and also of the variation of the handling conditions (temperature to the steam room and power to the microwave oven).

The experimental results to the ambient, to the oven microwave and to the steam room were modelling with the help of a software professional OriginPro8. For the 1st spine dried at the microwave oven, the model of Khazaei presented the best results to different power with a coefficient of determination equal to 0.9997 and a khi-square equal to 3,11895E-5 to 126W ( table V). However, for the 2nd and the 3eme bamboo, studied to the steam room and to the ambient, the same model of Khazaei simulates the curves of drying kinetics better to different temperatures (table IV).

**Keys words:** Spine of palm raffia, Bamboo, modelling and the kinetics of drying.

# SUR GRIN VOS CONNAISSANCES SE FONT PAYER



- Nous publions vos devoirs et votre thèse de bachelor et master
- Votre propre eBook et livre – dans tous les magasins principaux du monde
- Gagnez sur chaque vente

Téléchargez maintenant sur [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com)  
et publiez gratuitement

