

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie des Procédés



# Mémoire

## MASTER Académique

**Domaine :** Sciences et Techniques

**Filière :** Génie des Procédés

**Option :** Analyse et Contrôle de Qualité

Présenté par : **SAID Bachir**

### Thème:

**Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées**

Soutenu le : 06/06/2015

Devant le jury :

Président	Mokhtar LATI	M. A -A-	Université de Ouargla
Examineur	Samira CHOUICHA	M .A -A-	Université de Ouargla
Encadreur	Djamel MENNOUCHE	M .A -A-	Université de Ouargla

Année universitaire : 2014/2015

## Dédicace

*À mes chers parents :*

*À qui je dois ce que je suis, À ma mère.*

*À mon père qui est mon modèle.*

*Que Dieu leur donne longue vie et une bonne santé.*

*À mes frères*

*À mes sœurs*

*À mes oncles, mes tantes*

*À tous mes amis d'enfance et du parcours scolaire et universitaire.*

*À tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.*

*À ceux qui ont cru en moi*

*Je dédie ce modeste ouvrage.*

*Bachir*

## Remerciements

*Je rends grâce à « Allah » Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la puissance, et la volonté pour terminer ce travail.*

*Je tiens à remercier, vivement mon encadreur monsieur :*

*MENNOUCHE Djamel, maitre assistant « A » à l'université de Ouargla, Pour les orientations, les conseils et les efforts qu'il m'a prodigués.*

*Je remercie également monsieur : BOUGHALI Slimane, maitre de conférences « A » à l'université de Ouargla, Pour les informations et les orientations, qui m'ont été utiles pour mon travail de recherche.*

*J'ai remercié aussi les membres du jury :*

*LATI Mokhtar, CHOUICHA Samira*

## ملخص

هذا العمل يمثل دراسة لنمذجة رياضية للتجفيف الشمسي للتمور (نوعية دقلة نور) معادة الترطيب, التمور عولجت بتجفيف شمسي غير مباشر يعمل بالحمل القسري , في الشروط الثابتة والمتغيرة. هذه النمذجة مؤسسة على تطبيق ثلاثة عشرة نموذج باستخدام طريقة الانحدار اللاخطي بواسطة مبرمج **Curve Expert 1.3** .

نتائج هذه النمذجة تبرهن بان نموذج **ميدللي و كوتشوك** هو انسب نموذج لوصف عملية التجفيف في الشروط الثابتة والمتغيرة معا . ومن ناحية أخرى فان المنحنيات الخاصة بمعامل الانتشار الفعال تدل على أن الانتشار في مادة التمر يتزايد بتزايد درجة الحرارة.

حساب طاقة التنشيط يبين بان هذه الطاقة قيمتها تكون اكبر في حالة التجفيف تحت الشروط المتغيرة من قيمتها في حالة التجفيف تحت الشروط الثابتة.

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف بالحمل الحراري- نمذجة رياضية - مجفف شمسي - تمر- دقلة نور- الانتشار .

# Résumé :

Ce travail présente une étude de modélisation mathématique de séchage solaire des dattes (variété Deglet-Nour) réhumidifiées. Les dattes ont été traitées par un séchage solaire indirect à convection forcée, avec des conditions constantes et variables.

La modélisation mathématique est basée sur l'application de treize modèles et l'utilisation d'une analyse de régression non-linéaire par le moyen du logiciel Curve Expert 1.3.

Les résultats de modélisation montrent que le modèle de Midilli et Kucuk est le modèle le plus approprié pour la description de l'opération de séchage des dattes pour les conditions de séchage constantes et variables. D'autre part les courbes du coefficient de la diffusion effectif présentent que la diffusion dans le produit de la datte augmente en fonction de l'augmentation de la température.

Le calcul de l'énergie d'activation montre que cette énergie pour le cas de séchage avec conditions variables est plus importante que celle de séchage avec conditions constantes.

**Mots clés :** Séchage convectif - Modélisation mathématique - Séchoir solaire - Datte - Deglet-Nour - Diffusion.

# **Abstract:**

This work present a mathematical modeling study of solar drying of dates (Deglet Nour) remoistened. The dates were treated by an indirect solar drying process with forced convection, with constant and varying conditions,

The mathematical modeling is based on the application of thirteen models by the use of a non-linear regression analysis by means of the Curve Expert 1.3 software.

The modeling results show that the model of Midilli and Kucuk is the most appropriate model for the description of the drying operation from date for the constant and variable drying condition. On the other part the curves of the effective diffusion coefficient show that the diffusion of the date product, increases with increasing of temperature.

The calculation of the activation energy shows that the energy for the case of drying with varying conditions is greater than that of drying with constant conditions.

**Key-words:** Convective drying - Mathematical modeling - solar dryer - Date - Deglet Nour-Diffusion.

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>CHAPITRE I : Notions générales sur le séchage</b> .....	03
Introduction.....	04
I-1.Définition de séchage.....	04
I-2.Historique .....	05
I-3. Le principe de séchage.....	05
I-4. Les Processus de séchage.....	05
I-5. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage.....	06
I-6. La vitesse de séchage.....	07
I-7.La Cinétique de Séchage.....	09
I-8. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage.....	10
I-9.les grandeurs caractéristiques des produits à sécher.....	12
I-10. Classification des systèmes de séchage solaire.....	15
I-11. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire.....	17
<b>CHAPITRE II : Notions générales sur le produit à sécher</b> .....	18
II-1.Définition du produit .....	19
II-2.Composition.....	20
II-3.Dénomination des différents stades de maturation des dattes Deglet Nour .....	21
II-4:Composition en sucres de la datte Deglet Nour originaire de Californie .....	21
II-5. Traitements post-récolte de la datte Deglet –Nour.....	22
II-6.La température et le temps de conservation.....	23

II-7. Conditionnement des dattes.....	24
II-8. Séchage solaire des dattes réhumidifiées.....	25
<b>CHAPITRE III : Modélisation mathématique de séchage des dattes.....</b>	<b>28</b>
III-1.Généralistes sur la modélisation du séchage.....	29
III.2.Modèles mathématiques de la cinétique de séchage des dattes.....	33
III.3. Source des données expérimentales.....	35
III.4. Calcul de la teneur en eau d'équilibre.....	35
III.5. La méthode utilisée pour lissage des courbes expérimentales.....	35
III.6. Formulation mathématique des critères de choix.....	36
III.7. Résultats et discussion.....	37
III .8. Courbe caractéristique du séchage (C.C.S).....	43
III .9. Coefficient effectif de diffusion ( $D_{eff}$ ) .....	45
III .10. Energie d'activation ( $E_a$ ).....	48
<b>Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>Les références.....</b>	<b>52</b>
<b>ANNEXE .....</b>	<b>55</b>

# Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
aw	Activité de l'eau	-
D	Coefficient de diffusion de l'eau dans le produit	m <sup>2</sup> /s
Deff	Coefficient effectif de diffusion de l'eau dans le produit	m <sup>2</sup> /s
D <sub>0</sub>	Facteur pré-exponentiel d'Arrhenius	m <sup>2</sup> /s
E <sub>a</sub>	Energie d'activation	J/mol
Ep	Epaisseur du produit	m
Ha	Humidité absolue de l'air	kg eau / kg as
Has	Humidité absolue de saturation de l'air	kg eau / kg as
Hr	Humidité relative de l'air	%
L	Demi-épaisseur du produit	m
Ma	Masse de l'eau	kg
Me	Masse de l'air sèche	kg
Mh	Masse du produit humide	kg
M <sub>v</sub>	La masse d'eau évaporée	kg
M <sub>s</sub>	Masse du produit sec	kg
P <sub>v</sub>	Pression de la vapeur d'eau dans l'air	Pa
P <sub>s</sub>	Pression de saturation	Pa
R	Constante des gaz parfaits	8.314 J/mol.K
r	Coefficients de corrélation	-
S	Erreur standard de l'évaluation	-
S <sub>s</sub>	La surface de séchage	m <sup>2</sup>
T	La température	°C
TG <sub>s</sub>	Température de saturation adiabatique	°C
Th	La température humide	°C
Tr	Température de rosée	°C
TS	Température du bulbe sec	°C
t	Le temps	h
X	Teneur en eau du produit	kg eau/ kg Ms
XR	Teneur en eau réduite	kg eau/ kg Ms
X(t)	Teneur en eau instantanée	kg eau/ kg Ms
V <sub>s</sub>	Vitesse de séchage	kg eau / kg MS.s

$V_a$	Vitesse de l'air asséchant	m/s
$\psi$	Degré de saturation	%
$\varepsilon$	La porosité volumique	-

## Indices

a : Air

e : Entré

eq : Equilibre

f : Finale

h : Base humide

m : Monocouche

s : Sortie

0 : Initiale

## Abréviations

C.C.S : Courbes caractéristiques de séchage

FAO : Food and Agriculture Organization

Pré : Prédite

LENREZA : Laboratoire de développement des Energies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides

Ln : Logarithme népérien

## Liste des tableaux :

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires.....	17
Tableau (II-1) : Composition de la pulpe de datte fraîche Deglet-Nour .....	20
Tableau (II.2) : Dénomination des différents stades de maturation des dattes Deglet-Nour....	21
Tableau (II.3) : Composition en sucres de la datte Deglet Nour originaire de Californie.....	21
Tableau (II-4): Températures et temps de conservation de Deglet-Nour.....	23
Tableau (III.1): Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage.....	33
Tableau (III.2): Conditions de séchage pour la datte (variété Deglet-Nour).....	35
Tableau (III.3) : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes températures d'air asséchant.....	37
Tableau (III.4): Les coefficients de la diffusion effective pour différentes conditions aérothermiques.....	46

## Liste des figures :

Figure (I-1) : Vitesse de séchage en fonction du temps.....	08
Figure (I.2): Variation de teneur en eau du produit (X) en fonction du temps.....	09
Figure (I.3) : Volume de contrôle microscopique.....	12
Figure (I.4) : Volume de contrôle macroscopique.....	13
Figure (I-5): Répartition de L'eau dans le matériau.....	13
Figure (I.6) : Représentation typique des séchoirs solaires .....	16
Figure (II-1): Coupe longitudinale de la datte.....	19
Figure (II-2): Un échantillon de datte Deglet-Nour.....	19
Figure (II-3) : Organigramme des traitements après récolte des dattes Deglet-Nour .....	22
Figure (II-4): Conditionnement des dattes.....	24
Figure (II-5): Les étapes de préparation des échantillons.....	25
Figure (II-6) : Schéma descriptif du système de séchage.....	26
Figure (III.1-a,b,c,d,e) : Teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de temps de séchage.....	41
Figure (III.2) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de Deglet- Nour pour les conditions constantes de séchage.....	42
Figure (III.3) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de Deglet-Nour pour les conditions variables de séchage.....	42
Figure (III.4): Courbe caractéristique du séchage de datte (Deglet-Nour) pour les conditions constantes d'air.....	44

Figure (III.5): Courbe caractéristique du séchage de datte (Deglet-Nour) pour les conditions variables d'air.....	44
Figure (III.6-a,b,c,d,e): Variation du logarithme népérien du la teneur en eau réduite en fonction de temps de séchage.....	47
Figure (III.7) : Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif pour les conditions constantes de séchage.....	49
Figure (III.8): Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif pour les conditions variable de séchage.....	50

# Introduction générale :

Le séchage est une étape importante qui est introduit dans les diverses industries agro-alimentaires, où le rôle de cette étape est de réduire la teneur en eau des produits traités, pour neutraliser les activités bactériennes et les champignons, ceci conduit à une conservation des produits alimentaires pour une longue durée (plusieurs mois).

De plus, le séchage est parmi les solutions proposées pour le problème de la disponibilité de nombreux produits agricoles consommés en grande quantité durant les quatre saisons [1].

La datte étant un aliment historique de grande valeur énergétique, de haute valeur commerciale. L'Algérie occupe le sixième rang mondial parmi les pays producteurs de dattes avec une production annuelle moyenne estimée à 789357 tonnes, selon les sources statistiques de la FAO (2012), pour plus de douze millions de palmiers dattiers. S'agissant de la variété Deglet Nour, l'Algérie est classée comme le premier producteur mondial. Pendant la récolte, cette variété est souvent triée en plusieurs catégories dont la datte sèche dite « Frezza » présente un état de maturation incomplète avec dessèchement à l'arbre par effet de climat chaud. En proportion cette catégorie peut faire de 10% à 25% de la production de Deglet-Nour, voire plus, selon les conditions climatiques. Cette variété nécessite un traitement post-récolte afin de minimiser les pertes et éviter les accidents de conservation et de stockage selon la climatologie de l'année.

Le séchage solaire présente un procédé de traitement thermique des dattes qui est basé sur l'énergie solaire. Cette énergie présente une source propre et moins chère, est considérablement appréciée comme alternative tant dans le domaine industriel que dans les investigations de recherche.

Les modèles de simulation sont utiles pour la conception de nouveaux prototypes des séchoirs, l'amélioration des systèmes de séchages existants ou pour le contrôle de l'opération de séchage.

Les équations de couche mince décrivant les phénomènes de séchage d'une manière unie, quels que soient les mécanismes de contrôle. Elles ont été utilisées pour estimer le temps de séchage de plusieurs produits et de généraliser les courbes de séchage.

Les objectifs de ce travail étaient d'un part d'étudier l'application de plusieurs modèles en couches minces choisis dans la littérature pour les Dattes (Variété Deglet-Nour ), et d'autre

part, pour ajuster les données de séchage solaire dans les modèles les plus appropriés par des méthodes statistiques.

Notre travail est divisé en trois chapitres:

Dans le premier chapitre nous évoquons des notions générales sur le séchage. Le deuxième chapitre représente une description sur le produit à sécher et la méthode de traitements thermiques du fruit dattier. Le troisième chapitre a été destiné à l'exposé détaillé de la partie modélisation. Il est commencé par une présentation des différents modèles existant dans la littérature, nous avons ainsi déterminé le modèle le plus approprié pour la description du séchage solaire des dattes pour les deux cas de séchage (séchage à régime constant, et à régime variable). D'autre part nous avons présenté les courbes caractéristiques du séchage, des coefficients de diffusion effectifs, et de l'énergie d'activation.

Enfin, nous avons terminé le travail par une conclusion qui englobe les différents résultats de modélisation.

# **CHAPITRE I : Notions générales sur le séchage**

## **Introduction [2] :**

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé dans le monde rural et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire.

Les séchoirs qui fonctionnent avec des combustibles fossiles nécessitent et consomment beaucoup d'énergie. Le prix du pétrole va grandissant ces dernières années et va apparemment continuer sa flambée, il est donc important de développer un système de séchage gratuit en énergie. Le séchage solaire est parmi les applications de séchage, basé sur l'énergie du rayonnement solaire. Cette dernière présente une source d'énergie gratuite et inépuisable.

Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles qui peuvent fonctionner par convection naturelle ou forcée.

Le séchage nécessite de l'énergie et de la chaleur dépendant de l'humidité relative de l'air, de la température de séchage, des spécificités du produit concerné (épaisseur, superficie, et résistance à l'air), et de la teneur en eau de l'élément à sécher. Le fonctionnement du séchoir dépendra directement de la quantité d'irradiation et de l'humidité relative du lieu d'utilisation.

### **I-1.Définition de séchage :**

Le séchage est défini comme étant l'opération unitaire qui consiste à éliminer totalement, ou partiellement le solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un matériau poreux. Dans cette opération ils interviennent deux phénomènes, le transfert de chaleur et le transfert de matière.

On peut distinguer divers procédés de séchage.

- Les procédés mécaniques (décantation, filtration et compression centrifugation).
- Les procédés thermiques par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse, dont l'humidité est extraite par évaporation et diffusion [3].
- Le procédé chimique (par l'utilisation des produits déshydratants, tel que le chlorure de calcium pour extraire l'eau) [4].

## **I-2.Historique :**

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, viandes, poissons, figues, noix, tabac, plantes médicinales,... etc.), pour l'élaboration des matériaux (briques, céramique, poterie avant cuisson, bois...), ou pour les textiles et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, en fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel ». Le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantané », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [5].

## **I-3. Le principe de séchage [6] :**

Le séchage implique deux types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert.

## **I-4. Les processus de séchage :**

### **I-4-1.Par conduction :**

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition [4].

### **I-4-2.Par convection :**

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à une contacte direct entre le solide humide et le gaz caloporteur [4].

### **I-4-3. Par les rayonnements :**

Les techniques d'énergies radiantes (Ultra violet, Infra rouge, Haute fréquence, Micro onde) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie [4].

#### **I-4-4. Par perte diélectrique :**

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, ces molécules se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée [3].

#### **I-4-5. Par lyophilisation :**

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit [3].

### **I-5. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage :**

- Température de l'air de séchage (**T<sub>a</sub>**)
- Humidité relative de l'air de séchage (**H<sub>r</sub>**)
- La vitesse de l'air de séchage (**V<sub>a</sub>**)
- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- Le calibre du produit à sécher
- L'épaisseur du produit à sécher (**E<sub>p</sub>**)

#### **I-5-1. Influence de la température de l'air de séchage (T<sub>a</sub>) :**

La température de l'air asséchant influence considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit deviennent importantes [7].

#### **I-5-2. Influence de l'humidité de l'air de séchage (H<sub>r</sub>) :**

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [7].

### **I-5-3. Influence de la vitesse de l'air de séchage ( $V_a$ ):**

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [7].

### **I-5-4. Influence de taux de recyclage de l'air de séchage :**

Le recyclage est d'une grande importance dans les opérations de séchage car quoique l'air sortant du séchoir soit plus humide, sa température est élevée [8].

### **I-5-5. Le calibre du produit à sécher [9] :**

La vitesse de déshydratation dépend en outre de la vitesse de diffusion intra-cellulaires de l'eau de dilution du suc cellulaire ; fonction elle-même de l'épaisseur du fruit. Le comportement de la datte au séchage dépend de leurs caractéristiques morphologiques. De ce fait, la datte est utilisée entièrement pour se rapprocher des conditions réelles des dattes dans l'industrie.

### **I-5-6. Influence de L'épaisseur du produit à sécher ( $E_p$ )**

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage [7].

### **I-6. La vitesse de séchage [3] :**

$$V_s = \frac{-dM_v}{s_s \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dx}{s_s \cdot dt} \quad (\text{I-1})$$

$$M_v = M_s \cdot dX \quad (\text{I-2})$$

$$dX = X_e - X_s \quad (\text{I-3})$$

$M_v$  : La masse d'eau évaporé.

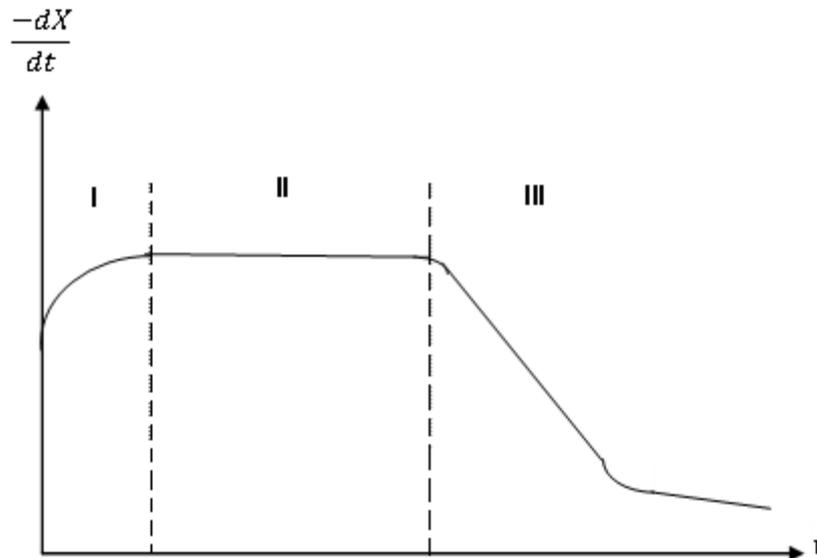
$M_s$  : La masse de produit sec.

$dX$  : La variation de la teneur en eau de produit à sécher.

$s_s$  : La surface de séchage.

$X_e$  : Teneur en eau de produit à l'entrée.

$X_s$  : Teneur en eau de produit à la sortie.



**Figure (I-1) :** Vitesse de séchage en fonction du temps [4]

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps, comme on observe l'opération de séchage se fait en trois périodes :

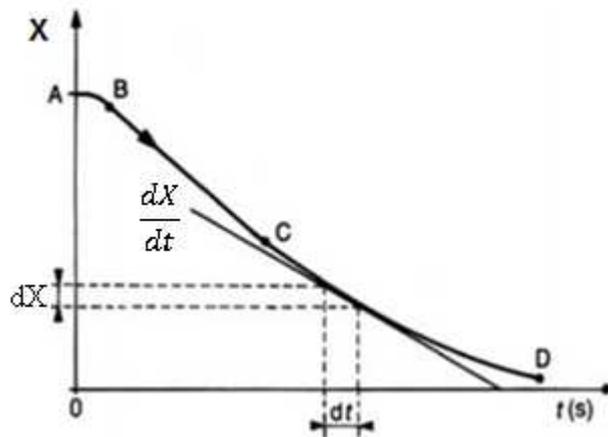
- **La première période : Période de mise en température (région I) :** La période de mise en température disparaît pratiquement quand le produit est en particules ou en feuilles, elle correspond à la montée en température du matériau humide, jusqu'à atteindre la température de bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global [10]. Dans cette période, l'humidité du produit varie mais pas sensiblement, et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide [10].
- **La deuxième période : Période à allure constante (région II) :** Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface; l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; l'activité de l'eau ( $a_w$ ) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit [10].
- **La troisième période : Période de ralentissement (région III) :** Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage [10].

## I-7. La cinétique de séchage [3] :

Malgré la diversité des matériaux séchés, les cinétiques présentent généralement une allure qui peut être décomposée en trois périodes :

On distingue :

- La période de mise en température (**AB**) ;
- La période à vitesse de séchage constante (à allure constante) (**BC**) ;
- La période à vitesse de séchage décroissante (de ralentissement) (**CD**) ;
- **C**: est le point critique du séchage.



**Figure (I.2):** Variation de teneur en eau du produit ( $X$ ) en fonction du temps [11]

On note la présence unique de la phase à allure décroissante. Celle-ci est caractéristique de la majorité des produits alimentaires.

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître.

La teneur en eau correspondant à la transition entre période **BC** et **CD**, est appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage [3].

Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher.

La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminuée, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage.

Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit [3].

## **I-8. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage :**

**I-8-1.Humidité absolue :** On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante [3] :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (\text{I-4})$$

$M_a$  : Masse de l'eau

$M_e$  : Masse de l'air sèche

Si on considère  $P$  la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas

de l'air humide :

$$H_a = 0.622 \left[ \frac{P}{P - P_v} \right] \quad (\text{I-5})$$

### **I-8-2.Humidité relative :**

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si  $P_v \leq P_s(T)$ , on définit alors l'humidité relative ou degré hygrométrique  $H_r$  de l'air par la relation [4] :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \quad (\text{I-6})$$

$P_v$  : La pression partielle de la vapeur dans le mélange.

$P_s(T)$  : La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

### **I-8-3.Degré de saturation :**

Le degré de saturation est le rapport de l'humidité spécifique de l'air à l'humidité spécifique de l'air saturé à la même température [4]

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (\text{I-7})$$

Dans le cas où  $P_v$  et  $P_s$  sont tout deux petits devant  $P$  (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire [3] :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.8)$$

#### **I-8-4. Température caractéristique de l'air humide :**

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables [11].

##### **I-8-4-1. Température du bulbe sec TS [11] :**

La température du bulbe sec TS ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec.

##### **I-8-4-2. La température humide Th:**

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air.

La différence  $(T - Th)$  est représentative de l'humidité relative  $H_r$  de l'air car :

➤ Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit, si  $H_r = 100\%$ , pas d'évaporation possible.

➤ Elle augmente avec la différence  $(P_s(T) - P_v)$  qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand  $H_r$  augmente [11].

##### **I-8-4-3. La température de rosée Tr:**

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau  $P_v$  considérée. Or  $P_v$  intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante [11].

##### **I-8-4-4. Température de saturation adiabatique TGs:**

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le

liquide à la température  $T_s$  [11].

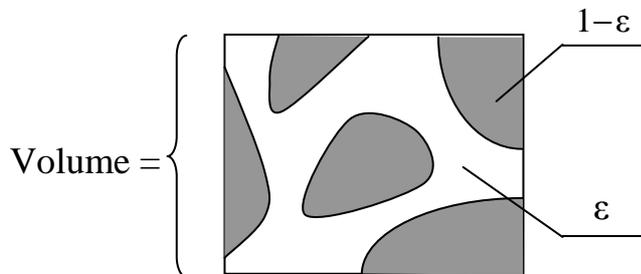
## I-9.les grandeurs caractéristiques des produits à sécher :

### I-9-1.Porosité volumique d'un produit [11] :

La porosité volumique ( $\epsilon$ ) est définie par :

$$\epsilon = \frac{\text{Volume du pores}}{\text{Volume apparent de produit}} \quad (\text{I-9})$$

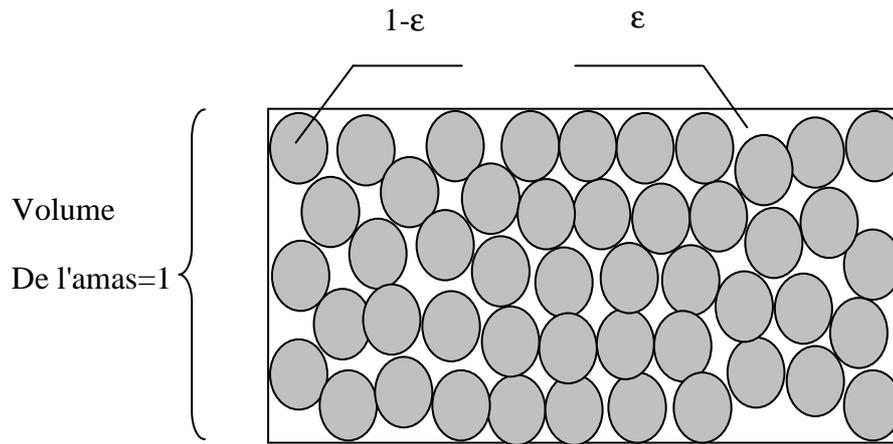
Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc  $1 - \epsilon$



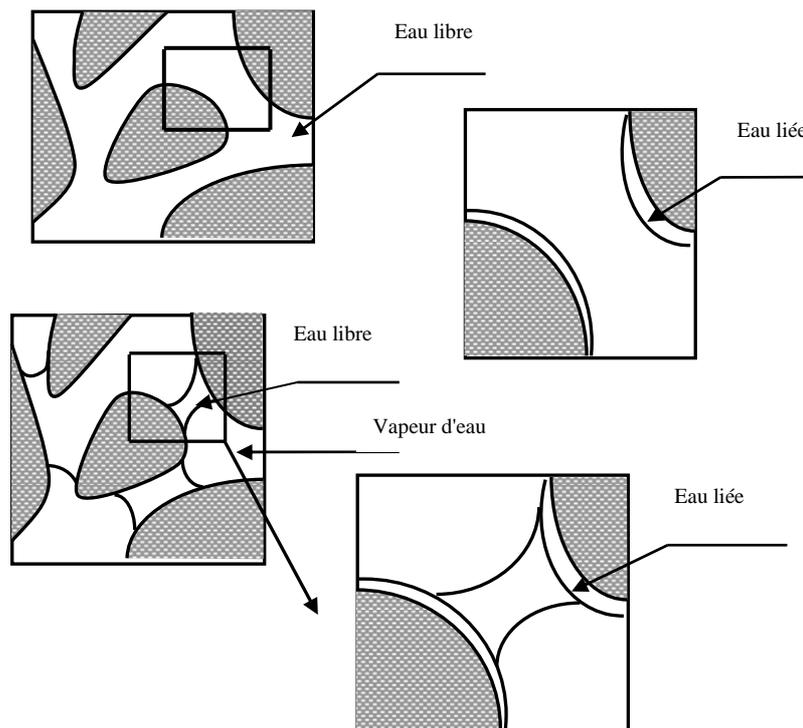
**Figure (I.3) :** Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.3). La définition est équivalente.

$$\epsilon = \frac{\text{Volume de l'amas} - \text{volume du produit}}{\text{Volume de l'amas}} \quad (\text{I-10})$$



**Figure (I.4) :** Volume de contrôle macroscopique



**Figure (I-5):** Répartition de L'eau dans le matériau [4]

### I-9-2. Le Teneur en eau du produit à sécher (X) [11] :

$$X_s = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I-11})$$

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

$X_s$  : La teneur en eau a base sèche ou Humidité absolue

$X_h$  : Le teneur en eau a base humide ou Humidité relative

$M_h$  : Masse humide (la masse avant l'élimination de l'eau)

$M_s$  : Masse sèche (la masse après l'élimination de l'eau)

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

$$X_s = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (\text{I.13})$$

$$X_h = \frac{X_s}{1 + X_s} \quad (\text{I.14})$$

### I-9-3. Hygroscopicité [11]:

Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur  $P_m$  qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

a - Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur  $P_m$  du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée.

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus finis. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant

des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur  $P_m$  du liquide est, ici encore, égale à la tension maximale du liquide pour la température où l'on se trouve.

Un solide se comportant de cette manière n'est pas hygroscopique.

b - Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur  $P_m$  du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et le solide est dit hygroscopique (charbon actif par exemple).

### **I-10. Classification des systèmes de séchage solaire [1]:**

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés d'après leurs modes de chauffage et la manière dans laquelle l'énergie solaire est utilisée. D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs, à savoir :

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs (souvent appelés les séchoirs solaires hybrides).
- les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires à circulation naturelle de l'air de séchage).

Trois sous classes distinctes peuvent être identifiées pour ces deux systèmes de séchage actifs et passifs (selon le type du séchoir et le mode d'utilisation de l'énergie solaire), à savoir :

- Les séchoirs solaires de type direct,
- Les séchoirs solaires de type indirect,
- Les séchoirs solaires de mode mixte.

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans la figure (I.6) :

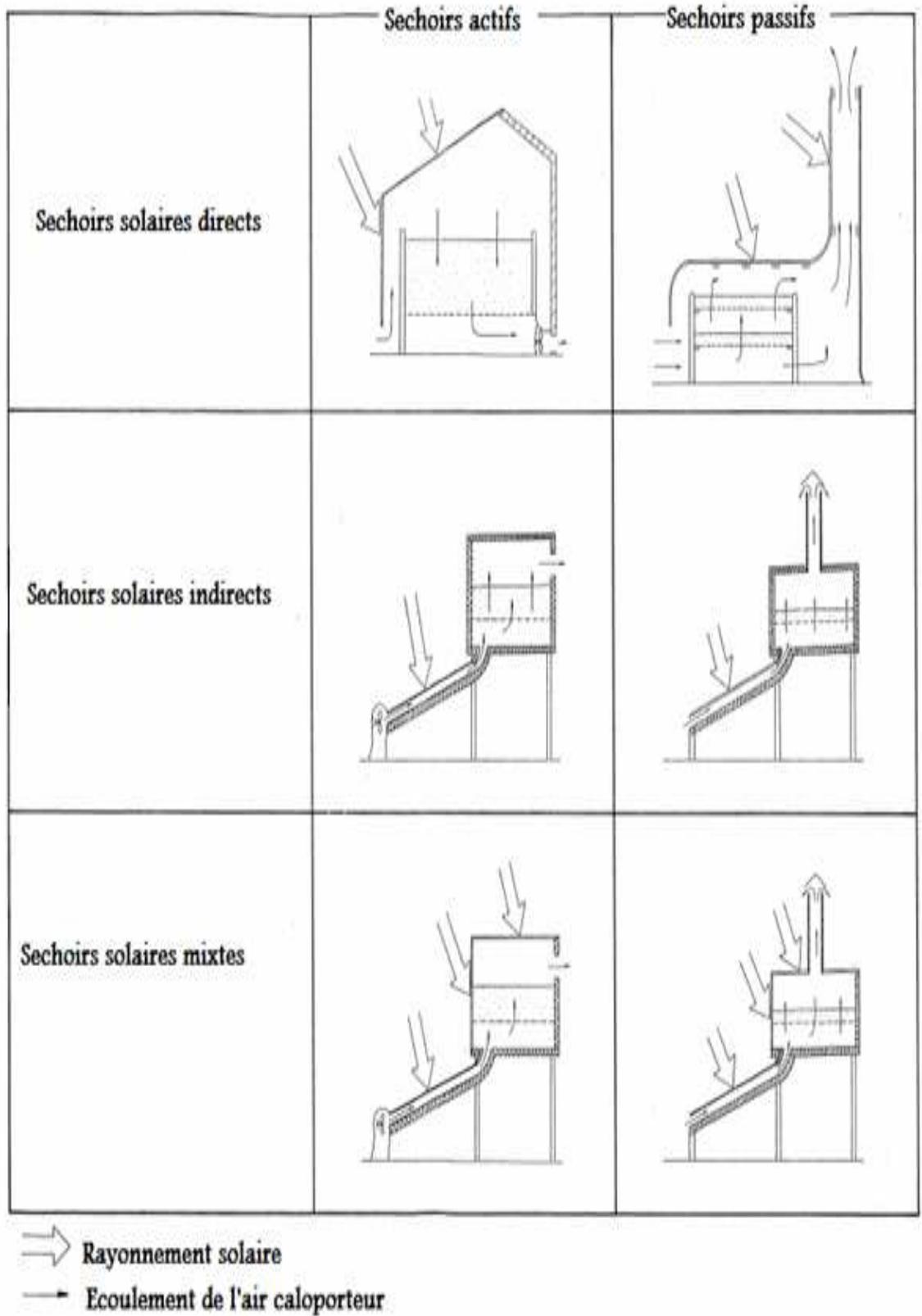


Figure (I.6) : Représentation typique des séchoirs solaires [12]

## I-11. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire :

**Tableau (I.1) :** Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires

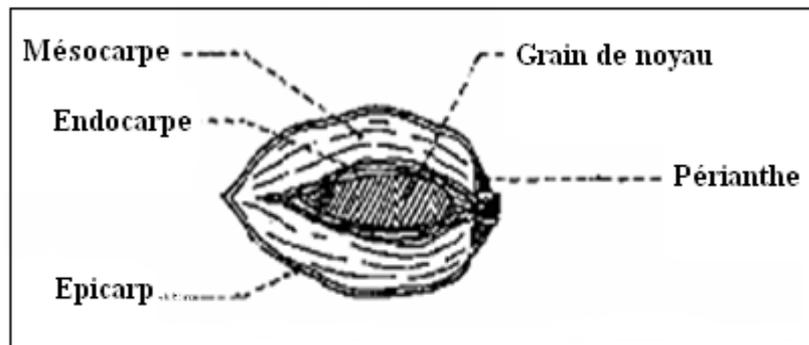
Type de séchoir solaire	Les avantages	Les inconvénients
Séchoir direct	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel [12].</li> <li>▪ Pas besoin de main-d'œuvre qualifié [12].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température élevée en fin de séchage.</li> <li>▪ Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil [12].</li> <li>▪ Jaunissement des légumes verts [12].</li> <li>▪ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure [12].</li> </ul>
Séchoir indirect	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le produit n'est pas exposé directement au soleil [12].</li> <li>▪ Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C)</li> <li>▪ Température limitée (55°C) [12].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût important [10].</li> <li>▪ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir [10].</li> </ul>
Séchoir hybride	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Affranchissement par rapport aux conditions climatiques [4].</li> <li>▪ Meilleur contrôle du séchage [4].</li> <li>▪ Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin [4].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût de production et d'investissement élevé [4].</li> <li>▪ Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz [4].</li> <li>Personnel qualifié pour la maintenance [4].</li> </ul>

**CHAPITRE II :**  
**Notions générales sur le produit**  
**à sécher**

## II-1.Définition du produit à sécher :

La datte est une baie, de forme généralement allongée dans la plupart du temps, mais le fruit peut avoir différents formes et couleurs, leurs dimensions sont très variables de 1,5 à 8 cm de longueur et d'un poids de 2 à 20 g. Sur le plan botanique, la datte est une baie ayant une seule graine communément appelé noyau [4].

La variété Deglet- Nour est un type de dattes moelleux, très sucré et énergétique, le poids atteint 12g, la longueur moyenne de 4 à 5 cm, et de diamètre moyen de 1.8 cm, contenant un « noyau » allongé et marqué d'un sillon longitudinal. Originaire de la région de Tolga près de Biskra dans la région des Zibans en Algérie [9] et [13].



**Figure (II-1):** Coupe longitudinale de la datte [4]



**Figure (II-2):** Un échantillon de datte Deglet-Nour

## II-2.Composition :

Tableau (II-1) : Composition de la pulpe de datte fraîche Deglet-Nour [4]

Constituants	(%) du poids à l'état frais
Eau	23
Protéines	1.5
Sucres totaux	72
Saccharose	36.1
Glucose	17.4
Fructose	19.6
Cellulose	7.2
Lipides	0.05
Cendres	1.9

La forte teneur en sucre de la pulpe de datte confère à ce fruit une grande valeur énergétique soit : 275 Kilocalories pour 100g de pulpe de datte Deglet-Nour [9].

### II-3.Dénomination des différents stades de maturation des dattes Deglet-Nour [14] :

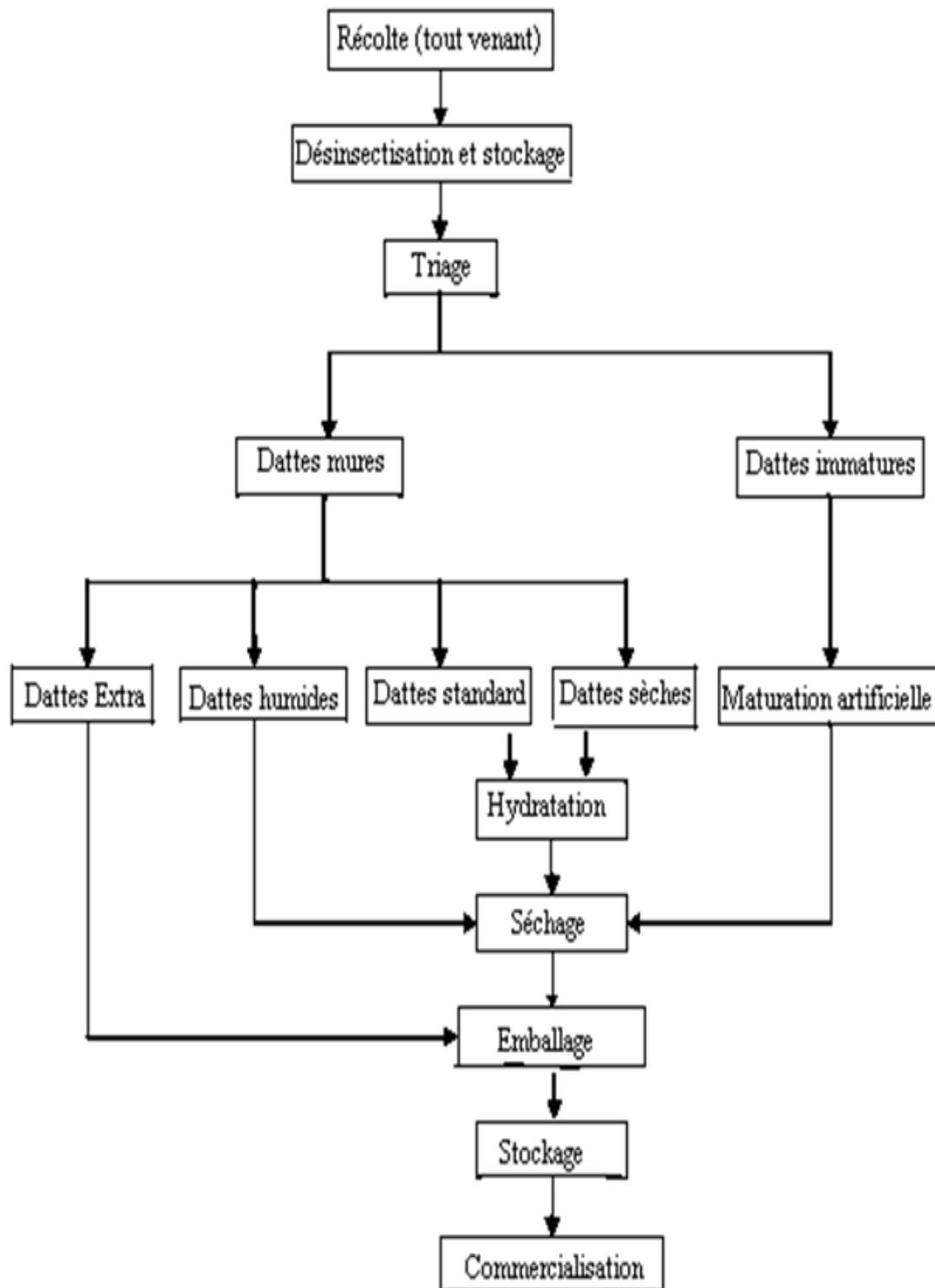
Tableau II.2 : Dénomination des différents stades de maturation des dattes Deglet-Nour					
Stade	I	II	III	IV	V
(a)	Loullou	Kh'lal	Bser	Martouba	Tmar
(b)	Hababouk	Kimri	Kalal	Routab	Tamar
Couleur	vert	vert	jaun orange	orange brun	brun blond
Taille	petite	moyenne	complète	complète	complète
(a) suivant la nomenclature algérienne					
(b) suivant la nomenclature irakienne					

### II-4:Composition en sucres de la datte Deglet-Nour originaire de Californie[14]:

Tableau II.3 : Composition en sucres de la datte Deglet Nour originaire de Californie					
Stade	Couleur	Saccharose(1)	Sucres réducteurs(1)	Sucres totaux(1)	teneur
en eau					
Kimri	vert tournant	3	3	6	80
Khalal	jaune	23	7	30	50
Khalal	orange	35	12	47	36
Routab	orange foncé	42	13	55	31
Routab	ambre	42	13	58-60	28-30
Tamar	foncé	36	44	80	20
(1) teneurs exprimées en grammes de sucres /100grammes matière fraîche					

## II-5. Traitements post-récolte de la datte Deglet -Nour [4]:

L'organigramme de la figure (II-3) ci-dessous illustrant les différentes opérations à prévoir pour les dattes Deglet- Nour depuis la récolte à la commercialisation.



**Figure (II-3) :** Organigramme des traitements après récolte des dattes Deglet-Nour [14]

## II-6.La température et le temps de conservation :

Tableau (II-4): Températures et temps de conservation de Deglet-Nour [4]

<b>Température de conservation</b>	<b>Durée maximale</b>
+° C à -27°C	01 mois
+15° C à -16°C	03 mois
+04° C à -05°C	08 mois
-02° C à -03°C	01 an
-17° C à -18°C	Plus d'un an

## II-7. Conditionnement des dattes :

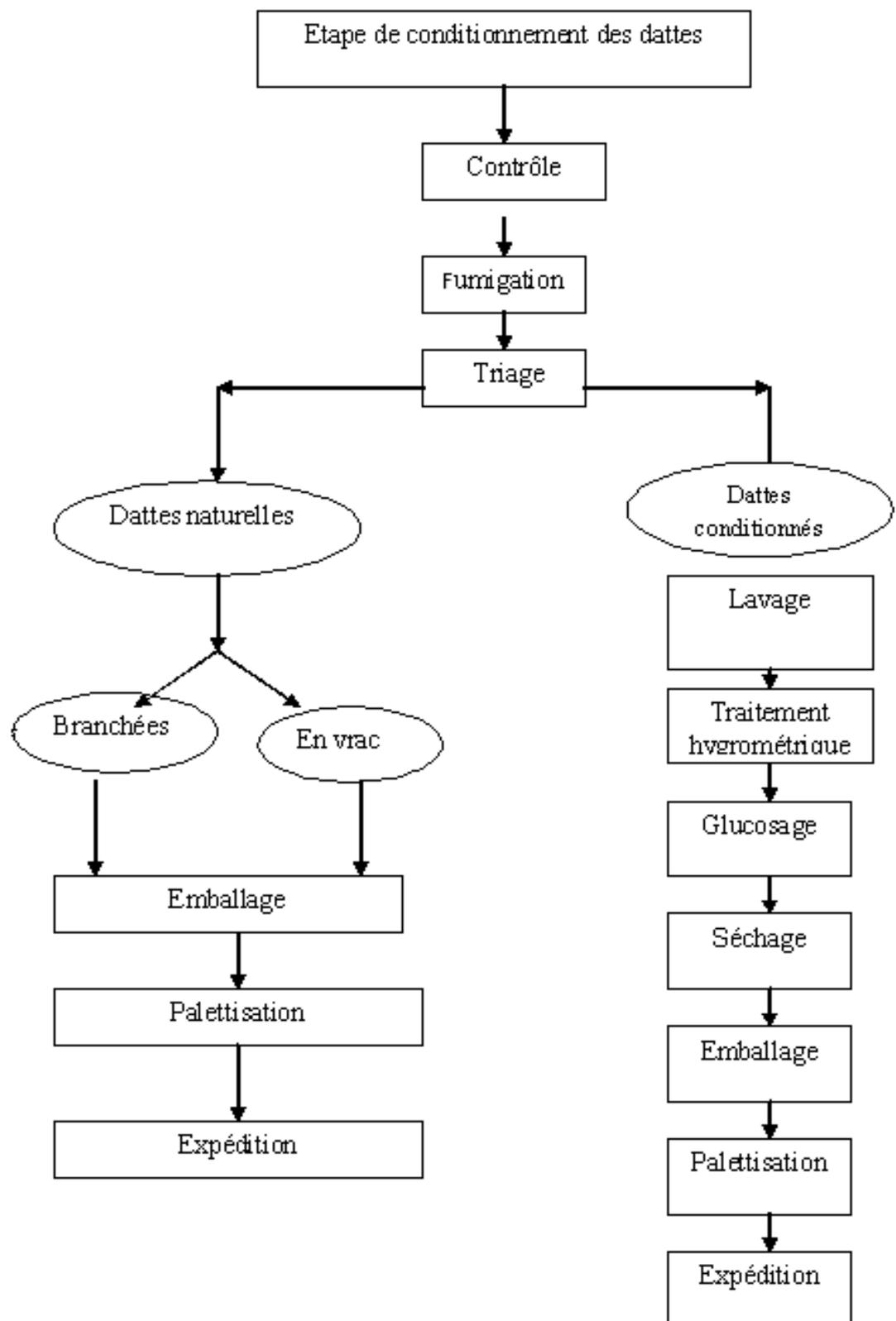
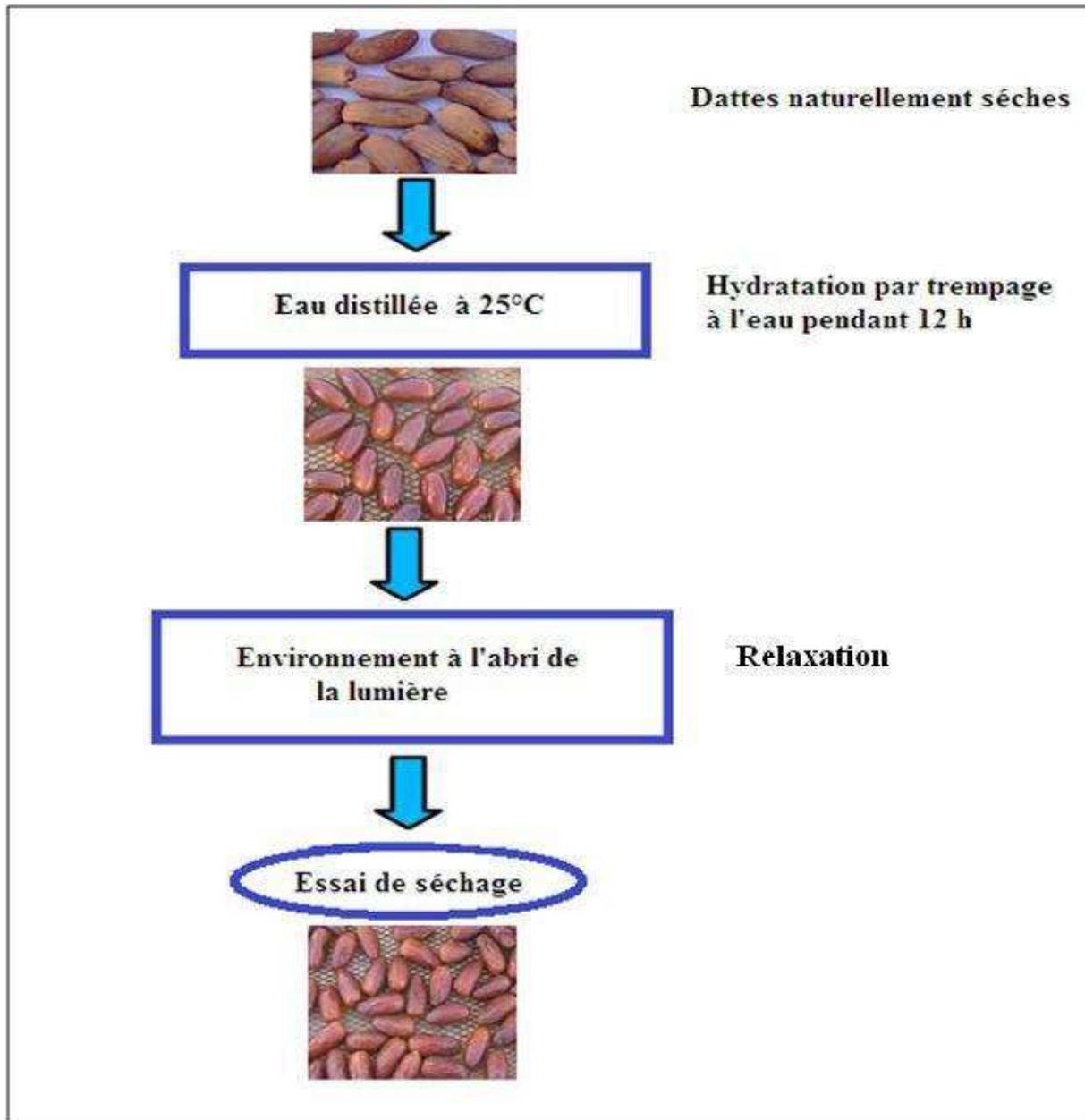


Figure (II-4): Conditionnement des dattes [4]

## II-8. Séchage solaire des dattes réhumidifiées :

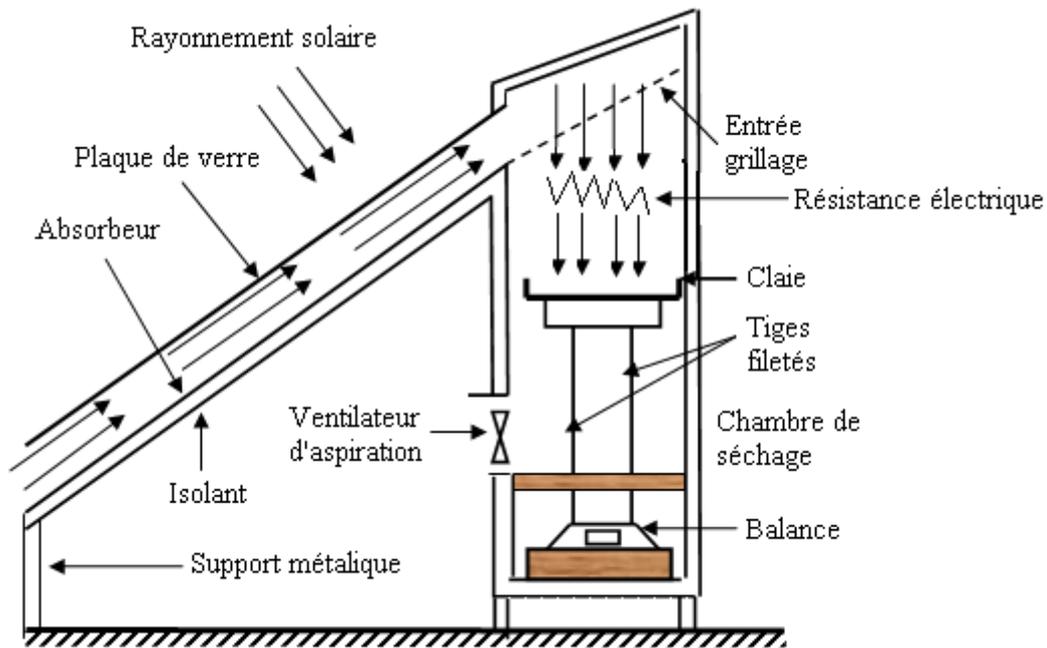
**II-8-1. Préparation des échantillons :** Les échantillons correspondants ont été réhydratés pendant les 12 h en eau distillée à 25°C, puis laissées en relaxation à l'abri de la lumière pendant presque 5 heures. La teneur en eau atteinte après cette préparation était environ 0.50 kg eau/kg de matière sèche. Le schéma suivant résume les différentes étapes de préparation des échantillons :



**Figure (II-5):** Les étapes de préparation des échantillons

## II-8-2. Description du système de séchage :

Dans cette étude nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection forcée figure (II-7) conçu et réalisé par l'équipe de conversion d'énergie du laboratoire LENREZA.



**Figure (II-6) :** Schéma descriptif du système de séchage (LENREZA, Université de Ouargla)

Les principaux éléments constitutifs dans ce système sont :

- **Unité de production d'air chaud :** constituée d'un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage, de surface  $2,5 \text{ m}^2$  incliné de  $31^\circ$  (latitude de la ville de Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur, en tôle galvanisée, est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 50 mm, est faite en polystyrène et le vitrage est en verre ordinaire.
- **Chambre de séchage :** La chambre de séchage est de forme parallélépipédique de hauteur 1.60m, de longueur 0.7 m et de largeur 0,6 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène. A l'entrée de la chambre de séchage sont placées des résistances électriques de puissance 1500 kW pilotées par un thermostat. Un ventilateur d'aspiration de marque (KF-30A) (vitesse 1400 tours/min, débit volumique  $19,5 \text{ m}^3 / \text{min}$ ) permet la circulation forcée de l'air avec un débit

réglable. Une claie de forme rectangulaire en grillage galvanisé sert de support pour le produit à sécher.

- **Fonctionnement du système :**

L'air frais provenant de l'extérieure est préalablement chauffé dans le capteur solaire ; le contact air absorbeur ainsi que le transfert convectif permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de la chambre de séchage et avant de traverser la claie l'air est chauffé par une résistance électrique qui fournit, en cas de besoin, un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage fixe et réglable. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse la claie, et l'évacue vers l'extérieur [4].

# **CHAPITRE III : Modélisation mathématique de séchage des dattes**

### **III-1.Généralités sur la modélisation du séchage :**

#### **III-1.1. Définition générale d'un modèle mathématique :**

Un modèle mathématique est une traduction d'une observation dans le but de lui appliquer les outils, les techniques et les théories mathématiques, puis généralement, en sens inverse, la traduction des résultats mathématiques obtenus en prédictions ou opérations dans le monde réel [15].

#### **III-1.2. Définition de modélisation mathématique de séchage solaire :**

La modélisation mathématique de séchage solaire est une traduction des différents phénomènes physiques conjugués à l'opération de séchage solaire (changement d'humidité, transfert de masse, et transfert de chaleur....etc.) à des équations mathématiques.

Ces équations représentent des modèles mathématiques du comportement qui décrivent les différents phénomènes physiques de séchage solaire.

#### **III-1.3. Le rôle et l'importance de modèles mathématiques de séchage:**

Le modèle de la cinétique de séchage s'appuie sur une formule empirique dite : "modèle phénoménologique". Ce modèle est généralement intéressant, pour estimer la valeur de la teneur en eau du produit à n'importe quel moment durant le processus de séchage, et ce, après l'affectation de certains paramètres, comme la température de l'air chaud, l'humidité relative, la vitesse de l'air et les dimensions du produit [16].

#### **III-1.4. Développement historique de la modélisation mathématique de séchages [5]:**

Lewis (1921) puis Sherwood (1931) sont les premiers chercheurs à interpréter le séchage par un modèle basé sur un phénomène de diffusion d'eau liquide.

Le spécialiste du textile, Fisher (1935), propose trois relations pour décrire les phases successives du séchage de la laine. La première phase est à vitesse constante, les deux phases suivantes sont à décroissance linéaire, la vitesse s'annulant à l'humidité d'équilibre.

Ceaglske et Hougen (1937), optent pour la théorie de la capillarité comme mécanisme principal de migration de l'eau en séchage de matériaux granulaires.

Henry (1939), a étudié la diffusion d'un fluide au travers d'un autre dans les pores d'un solide qui peut immobiliser (adsorber) ou relâcher (désorber) la substance diffusante.

Il développe la théorie de l'évaporation-condensation en prenant en compte simultanément la diffusion de chaleur et de masse. Il suppose que les pores sont un réseau continu d'espaces inclus dans le solide et que la quantité de vapeur dans le solide varie linéairement avec la concentration de vapeur et la température.

(La théorie de l'évaporation-condensation suppose que la migration de l'humidité prend place uniquement dans la phase vapeur (dans les pores)).

Pabis et Henderson (1961), ont pris en compte la variation de la diffusion avec la teneur en eau locale.

Luikov (1966), s'intéresse aux transferts au sein du produit en se basant sur une description fine et les équations des transferts couples de chaleur et de masse dans un milieu poreux.

Harmathy (1969) affine le modèle de Henry en développant une théorie pour le transfert simultané de masse et de chaleur d'un système poreux à l'état pendulaire. Il base son modèle sur les deux suppositions suivantes :

- Tous les mouvements d'humidité dans un système poreux prennent place dans la phase gazeuse (théorie de l'évapo-condensation), bien que la migration de l'humidité dans la phase liquide ne soit pas inexistante. Cette première supposition implique la limitation de cette théorie à l'état pendulaire de systèmes poreux en général et à la phase de séchage à vitesse décroissante.
- les phases d'un système poreux sont si finement distribuées que d'un point de vue macroscopique le système est quasi un système à une seule phase.

Suite à ses expérimentations sur des briques d'argile, il conclut que le mécanisme de flux capillaire n'est pas le seul présent au commencement de la période à vitesse décroissante : le transfert de vapeur par diffusion est lui aussi présent.

Crank (1975) a calculé un grand nombre de solutions de l'équation de diffusion pour des conditions initiales et limites variées. Ces solutions s'appliquent à des solides de formes géométriques simples (sphère, plaque par exemple) et dans des cas où la diffusivité est constante ou varie linéairement ou exponentiellement avec la concentration en eau.

King (1986), étudie la désorption de l'eau dans les produits alimentaires poreux. Il établit un modèle mathématique basé sur la supposition que le transfert de masse à l'intérieur du solide se produit principalement dans la phase vapeur. Le transfert de chaleur est considéré parallèlement au transfert de masse. A tout moment, l'humidité en phase condensée est plus grande qu'en phase vapeur et donc, le transfert d'humidité se fait par diffusion au travers de la phase vapeur. La relation entre l'humidité de sorption et la pression de vapeur partielle dans la phase gazeuse est décrite par une isotherme de désorption.

Chen and Pei (1989), propose un modèle mathématique basé sur les transferts simultanés de chaleur et de masse dans un système multiphase. Ce modèle tient compte de la structure du solide, des différentes formes de l'eau au sein du solide ainsi que de plusieurs mécanismes de transfert de l'humidité au sein du grain. Ce modèle a été appliqué au séchage de produits non-hygroscopiques (briques) et à celui de produits hygroscopiques (laine et grains de maïs).

Balaban (1989), propose une méthode originale pour tenir compte du rétrécissement du solide pendant le séchage. Son modèle prend en compte les transferts simultanés de chaleur et de matière qui sont exprimés par les lois de Fick et de Fourier dans les quelles la conductivité thermique, la capacité calorifique, le coefficient de diffusion et l'activité de l'eau en surface sont déterminés expérimentalement. L'évolution du rétrécissement, fonction du taux d'humidité du solide, est également déterminée expérimentalement. Il tient compte de la variation du volume lors de la résolution des équations différentielles de son modèle en introduisant une variation de la distance entre les nœuds dans sa méthode de résolution par différences finies. Les résultats théoriques de Balaban ont été comparés avec succès aux résultats expérimentaux de séchage par convection de tranches de poisson. Le modèle de Balaban requiert toutefois la connaissance à priori de nombreuses données expérimentales de séchage du matériau séché.

Fusco (1991), propose un modèle diffusionnel exploitant la seconde loi de Fick, ce modèle introduit à la variation du volume du solide pendant le séchage. Ou selon ce modèle la modification du volume du solide aurait lieu pendant la phase de séchage à vitesse décroissante.

Hernandez, (2000) a tenu compte du rétrécissement des grains, en considérant un rétrécissement linéaire avec la teneur en eau instantanée du grain.

### **III-1.5. Classification des modèles de séchage [1]:**

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

#### **III-1.5.1. Les modèles empiriques :**

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit ainsi aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au delà des limites de l'expérience.

#### **III-1.5.2. Les modèles diffusifs :**

Ces modèles qui ont constitué le point de départ de la théorie de séchage, sont basés sur la loi de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D \cdot \nabla X) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

D : Le coefficient de diffusion de l'eau dans le produit qui est fonction de l'humidité (m<sup>2</sup>/s),

X : Teneur en eau du produit,

t: Le temps.

Neuman, 1931 et Sherwood ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation (III.1) devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \quad (\text{III.2})$$

#### **III-1.5.3. Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse :**

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov, Philipet De

Varies, Krischer, Glaser et Whitaker ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couples de chaleur et de masse.

### III.2. Modèles mathématiques de la cinétique de séchage des dattes :

Plusieurs modèles mathématiques empiriques ou semi empiriques sont utilisés pour décrire les cinétiques de séchage et prédire l'humidité absolue réduite ou teneur en eau réduite d'un produit en couche mince en fonction du temps de séchage. Pour décrire l'allure de séchage des Dattes (variété Deglet-Nour) et déterminer l'équation empirique la plus adéquate, nous avons utilisé treize modèles de séchage en couches minces pour les produits agro-alimentaires. Le tableau (III.1) regroupe les équations empiriques de séchage utilisées dans la modélisation.

**Tableau III.1:** Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage

Numéro de modèle	Modèle	Equation de modèle	Références
1	Newton	$XR(t) = \exp(-kt)$	[17]
2	Page	$XR(t) = \exp(-kt^n)$	[17]
3	Henderson et Pabis	$XR(t) = a \exp(-kt)$	[17]
4	Logarithmique	$XR(t) = a \exp(-kt) + c$	[17]
5	Deux termes	$XR(t) = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[17]
6	Deux termes exponentiels	$XR(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	[17]
7	Wang et Singh	$XR(t) = 1 + at + bt^2$	[17]
8	Approche de la diffusion	$XR(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[17]
9	Henderson et pabis modifié	$XR(t) = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	[17]
10	Verma et autres	$XR(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_0t)$	[17]
11	Midilli et Kucuk	$XR(t) = a \exp(-kt^n) + bt$	[17]

12	Parabolique	$XR(t) = a + bt + ct^2$	[19]
13	Equation de diffusion de Fick	$XR(t) = A \exp(-c(t/L^2))$	[18]

Tel que :

- $A, a, b, c, n$  : Constantes empiriques dans les modèles de séchage.
- $k, k_0, k_1$  : Coefficients empiriques dans les modèles de séchage ( $h^{-1}$ ).
- $t$  : Le temps de séchage (h).
- $k$  et  $n$  dépend de la température de l'air et la nature du produit.
- $XR$ : Humidité réduite ou teneur en eau réduite du produit donnée par la relation suivante :

$$XR(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (\text{III.3})$$

Où :

- $X(t)$ : Dénote la teneur en eau instantanée en kg eau/ kg de matière sèche
- $X_0$ : Dénote la teneur en eau initiale en kg eau/ kg de matière sèche
- $X_{eq}$ : Représente la teneur en eau d'équilibre calculée (selon la référence [20]) par la relation donnée ci-dessous :

$$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C.K.HR}{(1-K.HR).(1-K.HR+C.K.HR)} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- $C = 1.514 \cdot 10^{-09} \cdot \exp(61089/R.T)$
- $K = 72.765 \cdot \exp(-11710/R.T)$
- $X_m = 1.067 \cdot 10^{-09} \cdot \exp(47614/R.T)$

Où :

- $R$  : Représente la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K)
- $T$  : La température absolue (°K)
- $X_m$  : La teneur en eau de la monocouche
- $HR$  : L'humidité relative de l'air

### III.3. Source des données expérimentales:

Les données exploitées dans cette partie de notre étude présentent les résultats expérimentaux de mémoire de Magister de S.Chouicha [4].

### III.4. Calcul de la teneur en eau d'équilibre :

Le tableau III.2 montre le calcul de la teneur en eau d'équilibre du produit, on utilisant l'équation III.4, pour les conditions de l'air constantes et variables. Ce calcul est basé sur les conditions expérimentales présentées sur le même tableau.

**Tableau III.2:** Conditions de séchage pour la datte (variété Deglet-Nour)

Essai N°	T (°C)	Temps de séchage t (h)	Humidité relative Hr(%)	Vitesse d'air de séchage Va (m/s)	Teneur en eau initiale $X_0$ (kg d'eau/kg MS)	Teneur en eau finale $X_f$ (kg d'eau/kg MS)	Teneur en eau d'équilibre $X_{eq}$ (kg d'eau/kg MS)
1	50	8	11	1.2	0,50001	0,35032	0,03371
2	55	6.5	6	1.2	0,50001	0,35017	0,01471
3	60	5	0.5	1.2	0,50001	0,35007	0,00094
4	65	3.5	3	1.2	0,50001	0,35009	0,00321
5	40.4°C ≤T≤53.4 °C	10.5	6.4% ≤HR≤21.3 %	1.2	0,50001	0,35048	/

### III.5. La méthode utilisée pour le lissage des courbes expérimentales de séchage [18] :

L'analyse de régression est une méthode statistique qui repose sur l'étude de la corrélation entre variables et qui est souvent utilisée comme outil au service de la prédiction. Dans le cas le plus simple, on étudie la relation linéaire entre une variable indépendante (ou prédicteur) et une variable dépendante (critère) afin de déterminer si la connaissance des résultats relatifs à la première permet de prédire, avec un degré de précision satisfaisant, les résultats que l'on devrait observer à propos de la deuxième. Ce type de prédiction est réalisé à l'aide d'une équation (dite équation de régression), dont les paramètres sont définis en fonction des caractéristiques statistiques (moyennes, écarts-types et coefficient de corrélation) des deux variables considérées.

Pour les courbes appropriées de régression, l'erreur utilisée est déterminée par l'erreur standard et le coefficient de corrélation. Ces outils ne sont pas parfaits, mais ils donnent une évaluation utile de la performance de la forme de la courbe.

### III.6. Formulation mathématique des critères de choix [14]:

Le modèle approprié à la description de l'allure de l'humidité absolue réduite de datte Deglet-Nour est choisi selon les paramètres statistiques suivants:

- Coefficient de corrélation ( $r$ ) élevé (tendant vers 1)
- Erreur standard de l'évaluation ( $S$ ) minimale (tendant vers 0)

➤ Ces paramètres statistiques sont définis par:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}}} \quad (III.5)$$

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (III.5-a)$$

Où  $S_t = \sum_{i=1}^{n_{point}} (\bar{y} - y_i)^2$  (III.5-b)

$$(\bar{y}) = \frac{1}{n_{point}} \sum_{i=1}^{n_{point}} y_i \quad (III.5-c)$$

Et  $S_r = \sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2$  (III.5-d)

Où  $y = f(x_i)$ : Dénote la valeur calculée par le modèle de régression.

$y_i$  : Dénote les données mesurées.

$n_{param}$  : Est le nombre de paramètres dans le modèle particulier.

$\bar{y}$  ( $y$  bar): La moyenne des données pointe.

### III.7. Résultats et discussion :

#### III.7.1 Figures représentatives et interprétation :

Les calculs des XR(t) à partir de l'équation III.3 ont été effectués à l'aide du (Excel 2007), et les représentations graphiques correspondantes (Figures représentatives) ont été effectuées à l'aide du logiciel (Curve Expert 1.3), on utilisant une technique de régression par utilisation d'options «Define a user model».

#### III.7.2 Paramètres statistiques :

Les résultats des critères statistiques d'évaluation pour chacun des treize modèles investis, sont regroupés dans le tableau III.3 ci-dessous. Les différents modèles sont comparés en s'appuyant sur leurs coefficients de corrélation (r) et l'erreur standard (S).

**Tableau III. 3 :** Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes température d'air asséchant.

Modèle	T (°C)	Coefficients	r	S
Newton	50	k=0,05623794	0.98067879	0.02025075
	55	k=0,064916903	0.98198219	0.01888470
	60	k =0.079347809	0.98930798	0.01464919
	65	k =0.11458081	0.98585991	0.01787815
	40.4 ≤T≤ 53.4	k =0.031806277	0.99669889	0.00754882
Page	50	k =0.082193878, n =0.77652806	0.99631124	0.00917457
	55	k =0.091669879, n =0.77012162	0.99803394	0.00651915
	60	k =0.10055418, n =0.81130356	0.99875875	0.00527378
	65	k=0.14025755, n =0.77878984	0.99832633	0.00666444
	(40.4≤T≤ 53.4)	k =0.024596157, n =1.1283891	0.99954925	0.00286036
Henderson et Pabis	50	a =0.97455125 ; k =0.051118983	0.98800004	0.01651313
	55	a =0.97509801 ; k =0.058832933	0.98986462	0.01477141
	60	a =0.98195543 ; k =0.073730019	0.99366087	0.01190287
	65	a =0.98066349 ; k =0.10612869	0.99075199	0.01563609
	(40.4 ≤T≤ 53.4)	a =1.0113928 ; k =0.033485482	0.99851523	0.00519003
Logarithmique	50	a=0.42189203 ;k=0.19208975 ; c=0.58263216	0.99956676	0.00325722
	55	a=0.41061955 ; k=0.22058719 ; c =0.59025589	0.99991142	0.00144598
	60	a=0.43957105 ; k=0.23486851 ; c =0.56072929	0.99984761	0.00196049
	65	a =0.41333466 ; k =0.3822819 ; c =0.5879587	0.99992148	0.00158188
	(40.4 ≤T≤	a=1.5413796 ; k=0.020627966 ;	0.99915711	0.00401269

	53.4)	$c = -0.53296867$		
<b>Deux termes</b>	50	$a = 0.057360749 ; k_0 = -0.15971162 ;$ $b = 0.94305469 ; k_1 = 0.085994836$	0.99998927	0.00053211
	55	$a = 0.18140972 ; k_0 = -0.08871961 ;$ $b = 0.81721351 ; k_1 = 0.12286864$	0.99994012	0.00124687
	60	$a = 0.18140972 ; k_0 = -0.08871961 ;$ $b = 0.81721351 ; k_1 = 0.12286864$	0.99992910	0.00142962
	65	$a = 0.13112387 ; k_0 = -0.20347377 ;$ $b = 0.86853466 ; k_1 = 0.20019968$	0.99997833	0.00092908
	$(40.4 \leq T \leq 53.4)$	$a = 0.13093769 ; k_0 = 0.033995522 ;$ $b = 0.88044351 ; k_1 = 0.033406602$	0.99851516	0.00547092
<b>Deux termes exponentiels</b>	50	$a = 0.088654741 ; k = 0.46498$	0.99649529	0.00894317
	55	$a = 0.078848471 ; k = 0.61286118$	0.99777514	0.00693450
	60	$a = 0.088916654 ; k = 0.63640073$	0.99915838	0.00434303
	65	$a = 0.0766692 ; k = 1.1141619$	0.99835246	0.00661226
	$(40.4 \leq T \leq 53.4)$	$a = 0.0024138281 ; k = 13.023065$	0.99586039	0.00866028
<b>Wang et Singh</b>	50	$a = -0.071352224 ; b = 0.0039110204$	0.99999141	0.00044312
	55	$a = -0.082130254 ; b = 0.0053690238$	0.99977448	0.00220891
	60	$a = -0.09643337 ; b = 0.0072755032$	0.99989353	0.00154498
	65	$a = -0.1438974 ; b = 0.016590575$	0.99992401	0.00142061
	$(40.4 \leq T \leq 53.4)$	$a = -0.027488345 ; b = -8.2161351e-005$	0.99937510	0.00336776
<b>Approche de la diffusion</b>	50	$a = 0.90868597 ; k = 0.092413576 ;$ $b = 1.3330661$	0.99996804	0.00088475
	55	$a = 0.85741559 ; k = 0.11680979$ $b = -0.93565959$	0.99990471	0.00149977
	60	$a = 0.92934083 ; k = 0.11965488 ;$ $b = -1.6399466$	0.99991013	0.00150553
	65	$a = 0.96764293 ; k = 0.11345282$ $b = 0.99937587$	0.98570874	0.02126568
	$(40.4 \leq T \leq 53.4)$	$a = 0.1591402 ; k = 0.029951648$ $b = 1.0729849$	0.99669565	0.00794007
<b>Henderson et pabis modifié</b>	50	$a = 0.063644345 ; k = -0.1514888$ $b = 0.46847656 ; k_0 = 0.087403725 ;$ $c = 0.46847656 ; k_1 = 0.087403725$	0.99998838	0.00060184
	55	$a = 0.1849488 ; k = -0.087216743 ;$ $b = 0.40685195 ; k_0 = 0.12353272$ $c = 0.40685195 ; k_1 = 0.12353272$	0.99994078	0.00138637
	60	$a = 0.021816799 ; k = -0.33455683 ;$ $b = 0.48772655 ; k_0 = 0.10278088$ $c = 0.48772655 ; k_1 = 0.10278088$	0.99989155	0.00209206
	65	$a = 0.030581935 ; k = -0.44136182 ;$ $b = 0.48377041 ; k_0 = 0.15876458 ;$ $c = .48377041 ; k_1 = 0.15876458$	0.99983108	0.00366850
	$(40.4 \leq T \leq 53.4)$	$a = 0.076714404 ; k = 0.033119875 ;$ $b = 0.46733505 ; k_0 = 0.033512836$ $c = 0.46733505 ; k_1 = 0.033512836$	0.99851521	0.00580268

<b>Verma et autres</b>	50	a=0.16272721 ; k=-0.081996218 ; k0 =0.10432024	0.99990175	0.00155123
	55	a =0.34075086 ; k =-0.041855233 k0 =0.15380243	0.99995347	0.00104796
	60	a=0.60137555 ; k=0.0066064468 ; k0 =0.24939282	0.99983219	0.00205729
	65	a=0.21875595 ; k=-0.13196907 ; k0 =0.22861171	0.99999107	0.00053356
	(40.4 ≤T≤ 53.4)	a=1.0571985 ; k=0.021928402 ; k0=-0.083668678	0.99932921	0.00357982
<b>Midilli et Kucuk</b>	50	a=0.99901328 ; k=0.10782181 ; n =1.0505004 ; b =0.036892329	0.99997171	0.00086385
	55	a =0.99999895 ; k =0.1228698 ; n =0.98973662 ; b =0.035837071	0.99995760	0.00104921
	60	a =0.99923822 ; k =0.14126804 n =1.0061177 ; b =0.041665772	0.99991163	0.00159604
	65	a =1.0000508 ; k =0.21907446 ; n =1.0090768 ; b =0.06789956	0.99999307	0.00052555
	(40.4 ≤T≤ 53.4)	a =1.0011501 ; k =0.022442493 ; n =1.108007 ; b =-0.0032538481	0.99955621	0.00299174
<b>Parabolique</b>	50	a =1.0003381, b =-0.071515913, c =0.0039275546	0.99999220	0.00043707
	55	a =0.99694294, b =-0.080322716, c =0.0051458656	0.99984805	0.00189379
	60	a =0.99811985, b =-0.095006205, c =0.0070489638	0.99992372	0.00138710
	65	a =0.99886369, b =-0.1426943, c =0.016323225	0.99993545	0.00143425
	(40.4 ≤T≤ 53.4)	a =1.0039355 , b =-0.028951389, c =3.1252922e-005	0.99949956	0.00309215
<b>Equation de diffusion de Fick</b>	50	A = 0.9745513, c =0.31054558, L =-2.464742	0.98800004	0.01709271
	55	A =0.97510202, c =0.25672629, L =-2.0889087	0.98986462	0.01542824
	60	A =0.98195611, c =0.087709977, L =1.0906901	0.99366087	0.01262490
	65	A =0.98066392, c =0.1797216, L =1.3013171	0.99075199	0.01712848
	(40.4 ≤T≤ 53.4)	A =1.0113929, c =0.072506597, L =1.4715007	0.99851523	0.00532486

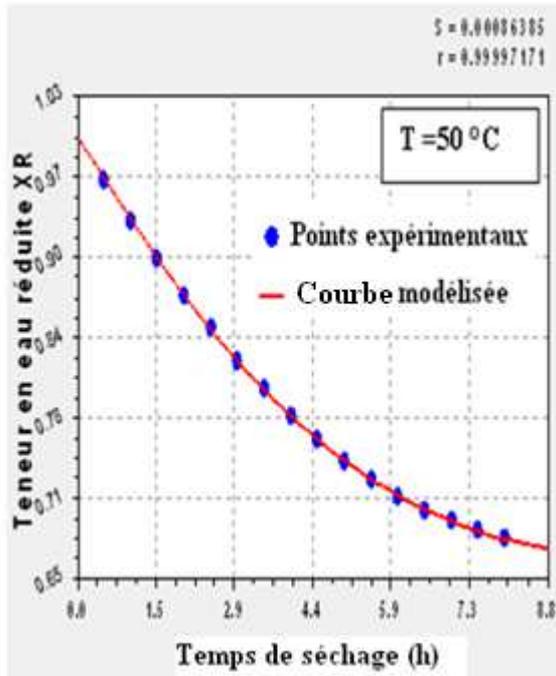
**a** - A partir de la comparaison entre les paramètres statistiques (S) et (r) de chaque modèle on remarque :

➤ La valeur la plus élevée de coefficient de corrélation se trouve dans le modèle de Midilli et Kucuk pour  $T= 65^{\circ}\text{C}$  : ( $r = 0.99999307$ ).

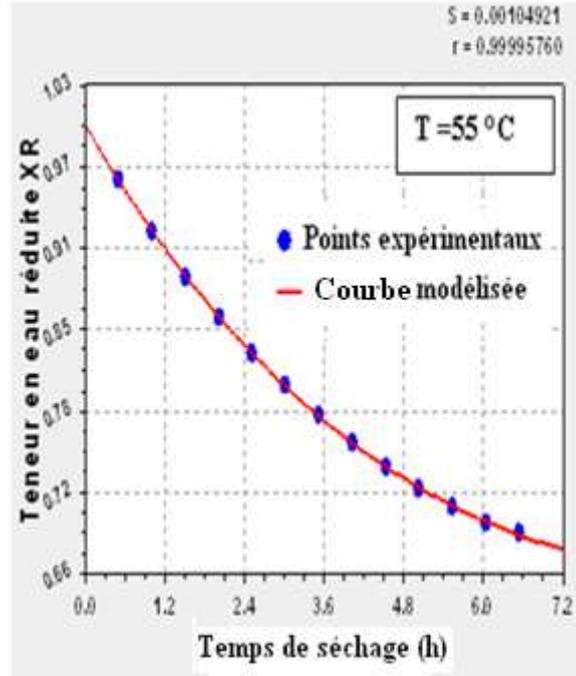
➤ La valeur minimale de l'erreur standard de l'évaluation se trouve dans le modèle parabolique pour  $T= 50^{\circ}\text{C}$  : ( $S = 0.00043707$ ).

**b** - Avec une recherche bibliographique dans des travaux sur le séchage des dattes (variété Deglet-Nour) [14] et [18], nous avons constaté que le modèle de Midilli et Kucuk est parmi les quatre modèles les plus couramment utilisés pour le séchage de ce genre de produits. Alors cela nous a permis de dire que le modèle de Midilli et Kucuk est le modèle le plus approprié à la description de la cinétique de séchage des dattes Deglet- Nour.

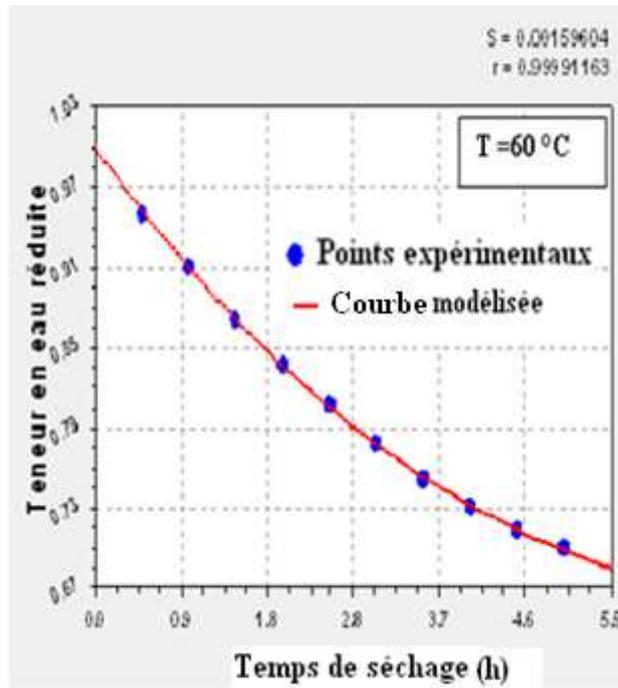
**c** - Les figures (III.1-a,b,c,d,e) et (III.2) et (III.3) montrent qu'il existe un excellent accord entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle de Midilli et Kucuk.



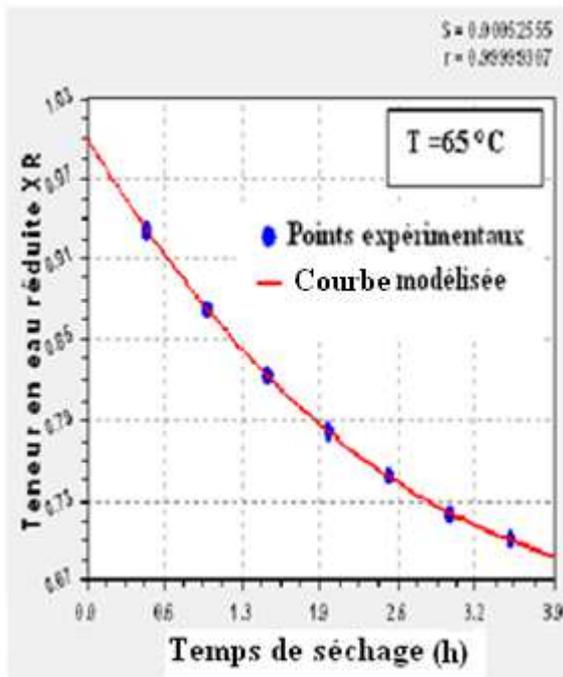
(a)



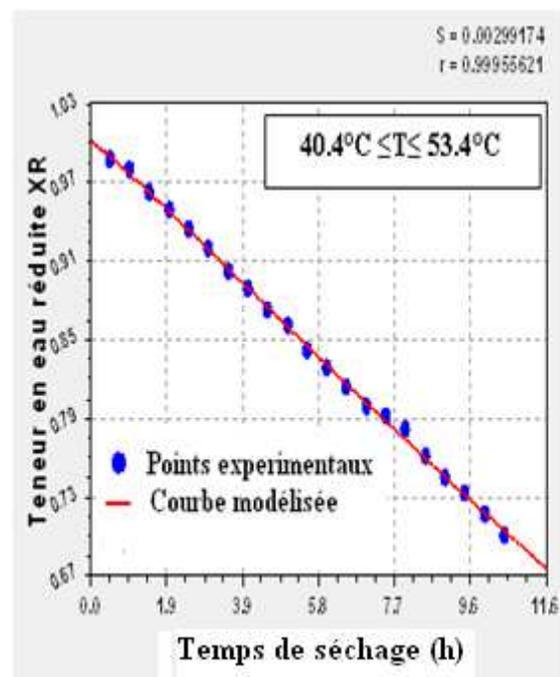
(b)



(c)



(d)

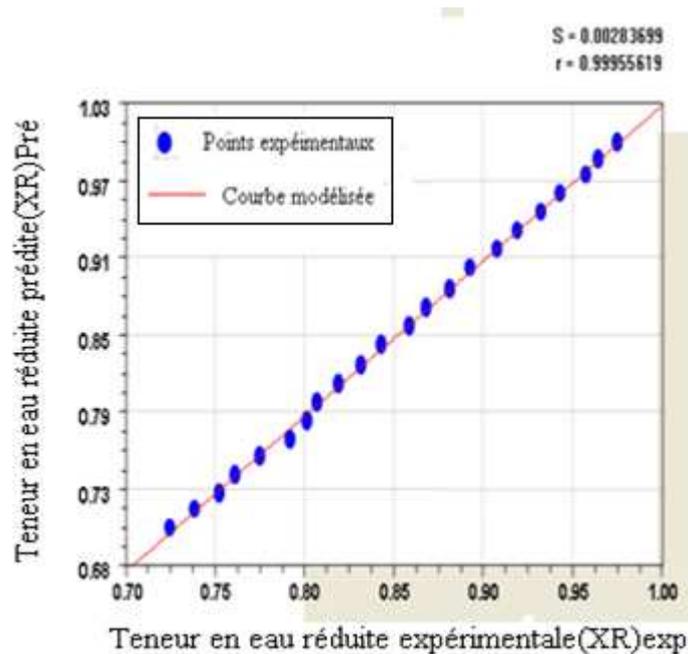


(e)

Figure (III.1-a,b,c,d,e) : Teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de temps de séchage.



**Figure (III.2) :** Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de Deglet- Nour pour les conditions constantes de séchage.



**Figure (III.3) :** Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de Deglet-Nour pour les conditions variables de séchage.

### III.8. Courbe caractéristique du séchage (C.C.S):

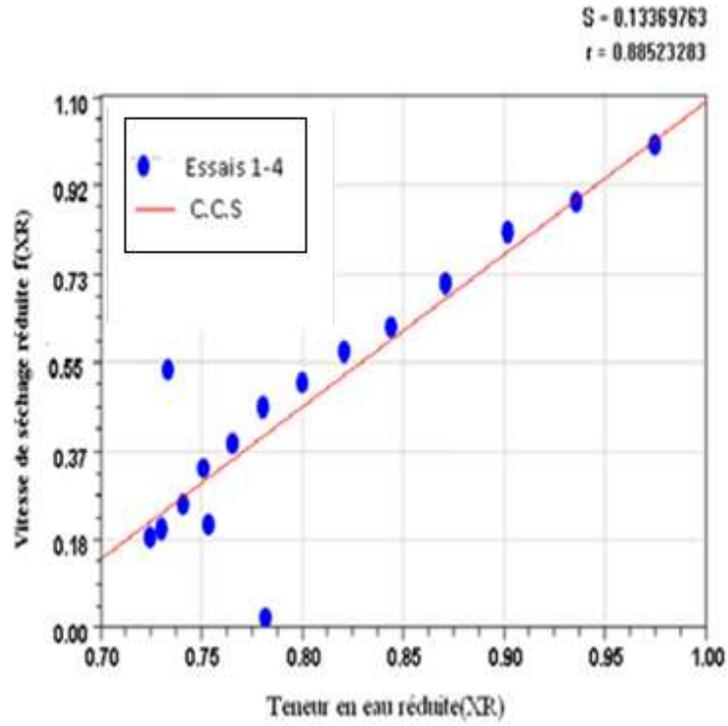
La méthode de la courbe caractéristique du séchage (C.C.S) développée par Van Meel (1958) [17]. Pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de séchage, nous avons utilisé le principe de la courbe caractéristique de séchage. La détermination de la courbe caractéristique d'un produit est basé sur l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite XR [9] :

$$\frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{dX}{dt}\right)_0} = f(XR) \quad (\text{III.6})$$

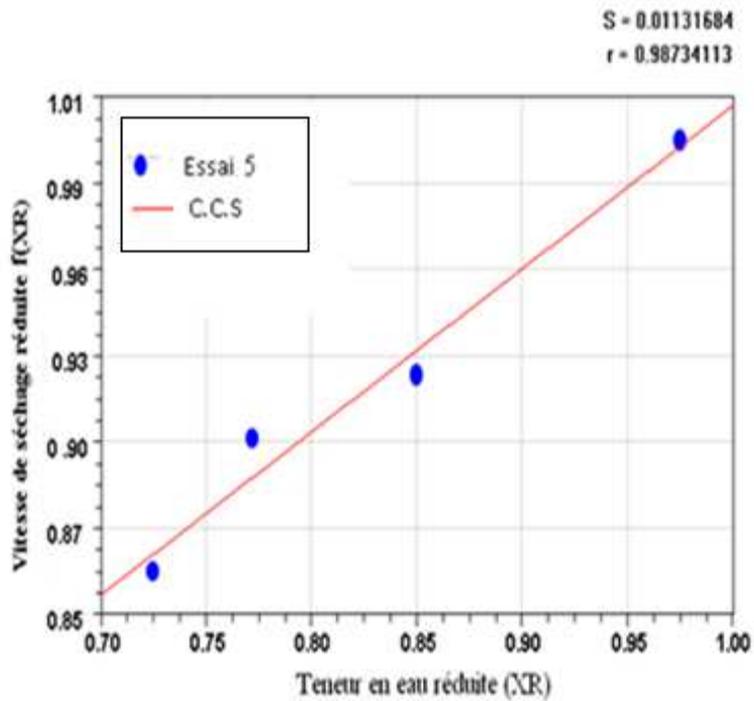
Avec :

- $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t$  : Vitesse de séchage à un instant t (kg d'eau /kg MS.h).
- $\left(\frac{dX}{dt}\right)_0$  : Vitesse de séchage initiale (kg d'eau /kg MS.h).

Les figures (III.4) et (III.5) présentent la variation de la vitesse de séchage réduite en fonction de la teneur en eau réduite, pour le séchage à convection forcée constante et variable respectivement. Les figures (III.4) et (III.5) montrent un bon regroupement des courbes de séchage, dont les coefficients de corrélation sont 0.88523283, et 0.98734113 respectivement pour les deux cas. On remarque que la courbe caractéristique de séchage à convection forcée à conditions variables présente une meilleure corrélation des points expérimentaux de l'essai avec la courbe modélisée.



**Figure (III.4):** Courbe caractéristique du séchage de datte (Deglet-Nour) pour les conditions constantes de séchage.



**Figure (III.5):** Courbe caractéristique du séchage de datte (Deglet-Nour) pour les conditions variables de séchage.

### III.9. Coefficient effectif de diffusion ( $D_{eff}$ ) [17] :

Les résultats expérimentaux peuvent être traités par l'équation de la diffusion de Fick. La solution analytique de la deuxième loi de Fick, dans la géométrie de galette en assumant la distribution initiale uniforme d'humidité, avec la simplification du mouvement d'humidité par diffusion, rétrécissement négligeable, coefficients de diffusion constants et température peut être exprimée par:

$$XR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (\text{III. 7})$$

Où :

$D_{eff}$ : Coefficient de diffusion effectif (m<sup>2</sup>/s)

L : La demi-épaisseur du produit (m)

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

Lorsque le temps est suffisamment grand, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier et on obtient :

$$XR \cong \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (\text{III. 8})$$

L'équation (III. 8) peut s'écrire :

$$\ln(XR) \cong \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (\text{III. 9})$$

Le coefficient de diffusion pour chaque température de séchage a été calculé en substituant les données expérimentales dans l'équation précédente. Le coefficient de diffusion est déterminé en traçant les données expérimentales de séchage en termes de  $\ln(XR)$  en fonction du temps de séchage, Le tracé de L'équation (III. 9) donne une ligne droite avec une Pente [21] :

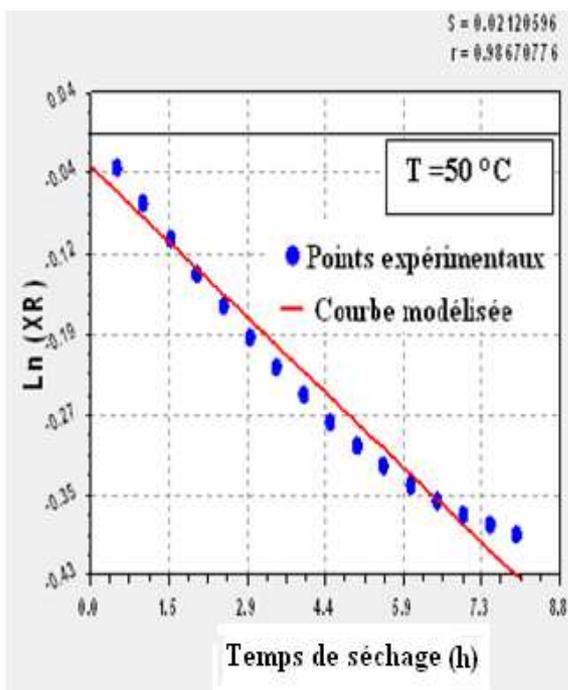
$\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$ , ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif pour différentes conditions aérothermiques et pour une épaisseur moyen de la couche de Deglet-Nour à sécher ( $E_p=2.2$  cm), et vitesse d'air ( $V_a=1.2$ m/s) dans le tableau ci-dessous.

**(Tableau III.4) :** Les coefficients de la diffusion effective pour différentes conditions aérothermiques

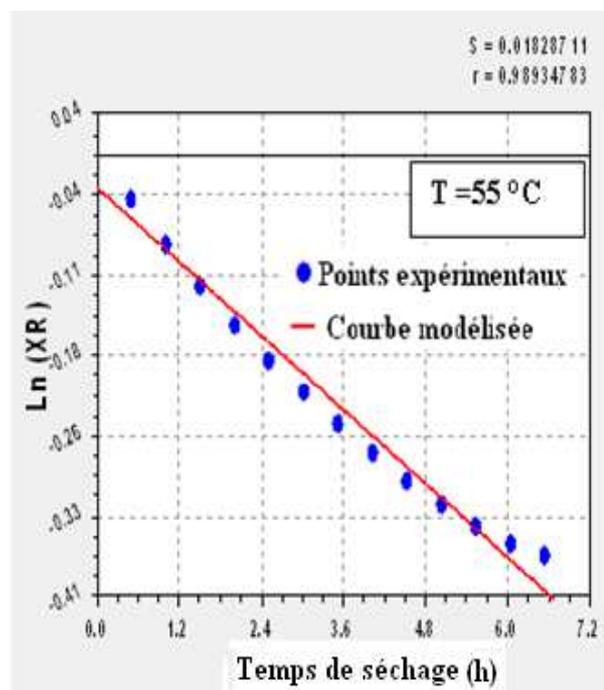
Essai N°	T (°C)	Temps de séchage (h)	Coefficient de diffusion effectif ( <i>Def</i> ) (m <sup>2</sup> /h)	Coefficient de corrélation (r)
1	50	8	$2,5426.10^{-6}$	0.98670776
2	55	6.5	$2,93471.10^{-6}$	0.98934783
3	60	5	$3,6744.10^{-6}$	0.99321021
4	65	3.5	$5,41963.10^{-6}$	0.99017236
5	$40.4^{\circ}\text{C} \leq T \leq 53.4^{\circ}\text{C}$	10.5	$1,66618.10^{-6}$	0.99849190

On remarque à partir du tableau (III.4) ci-dessus que :

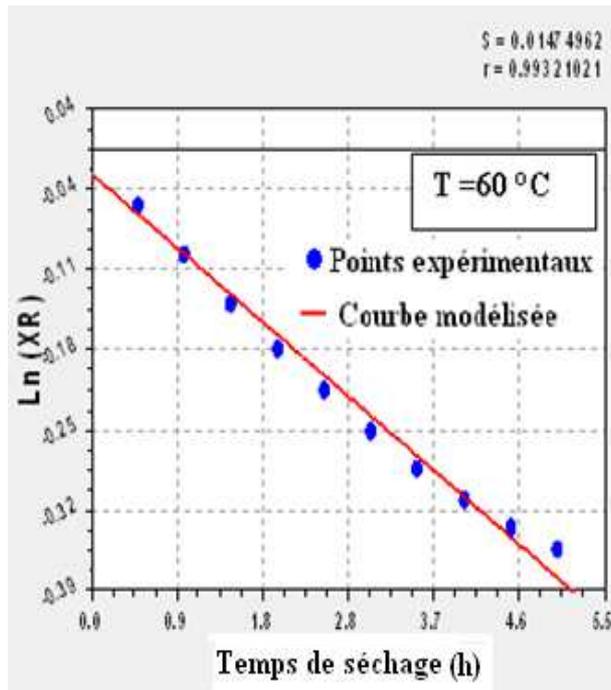
- Dans les essais 1,2,3,4 (à conditions constantes), la valeur du coefficient de diffusion effectif augmente en fonction de l'augmentation de températures (Elle donne la valeur maximale dans l'essai N°4, dont  $(Def)_{\max} = 5,41963.10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ , pour  $T = 65^{\circ}\text{C}$ ).
- Dans l'essai N°5(à conditions variables), présente la plus petit valeur du coefficient de diffusion effectif  $(Def)_{\min} = 1,66618.10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ .



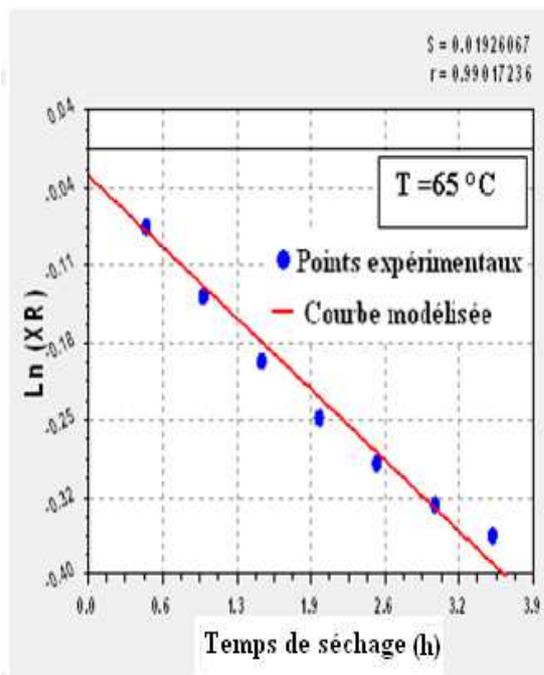
(a)



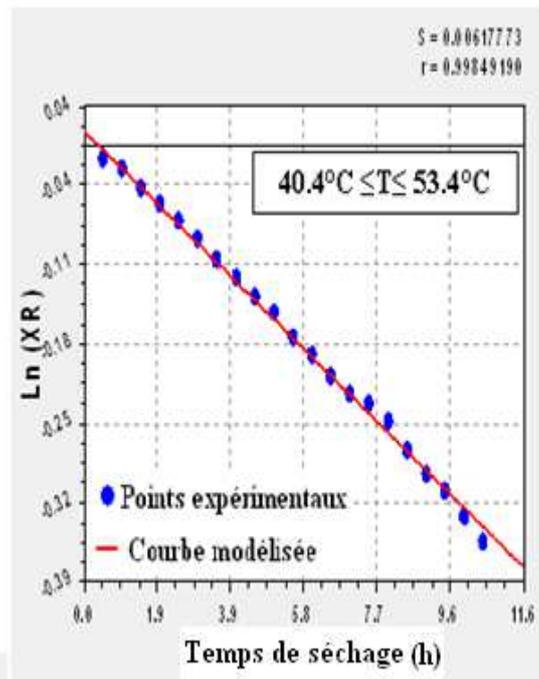
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure (III.6-a,b,c,d,e):** Variation du logarithme népérien de la teneur en eau réduite en fonction de temps de séchage.

### III.10. Energie d'activation (Ea) :

L'énergie d'activation c'est l'énergie qu'il faut pour déclencher le phénomène de diffusion massique dans les produits agricoles [12]. L'origine de l'autodiffusion est l'agitation thermique. La diffusion est donc thermiquement activée, et le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius [17] :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (III.10)$$

Où :

$D_{eff}$  : Coefficient effectif de diffusion ( $m^2.s^{-1}$ )

$D_0$  : Facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhénius ( $m^2.s^{-1}$ )

$E_a$  : L'énergie d'activation ( $KJ.mol^{-1}$ )

R : Constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K)

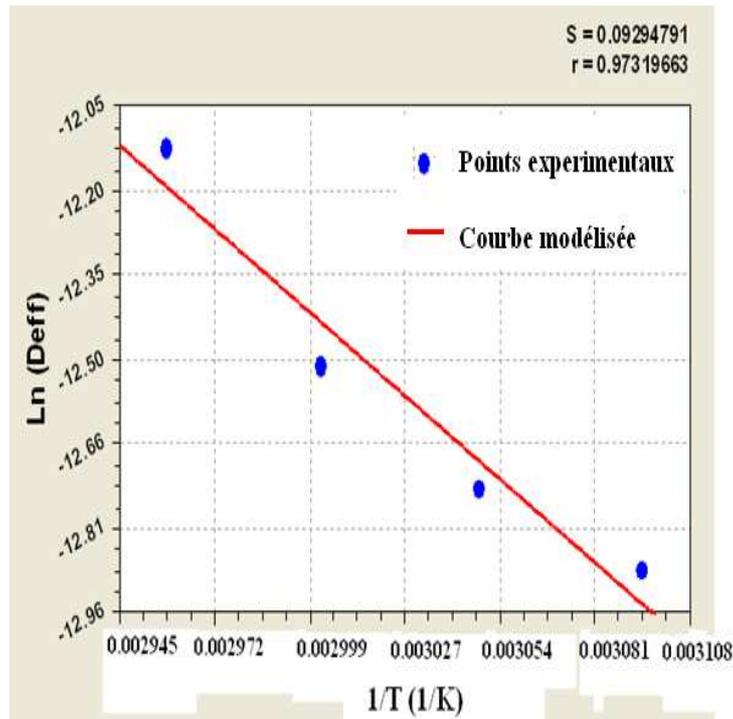
T : Température de l'air asséchant en K.

#### III.10.1 Détermination de l'énergie d'activation pour le cas de séchage à conditions constantes :

L'équation (III.10) peut être réarrangée sous la forme :

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (III.11)$$

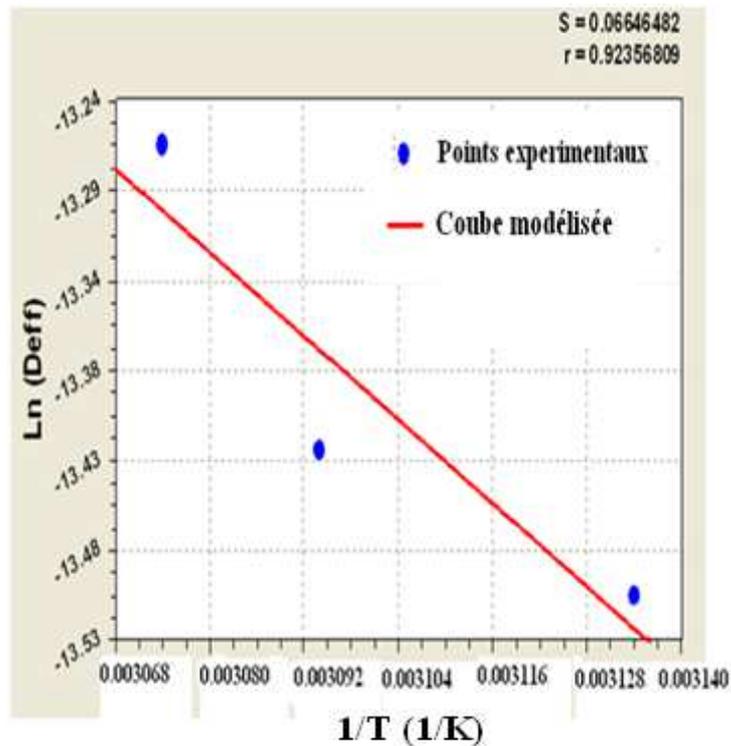
L'énergie d'activation est calculée en représentant le logarithme népérien des valeurs expérimentales de la diffusivité effective  $D_{eff}$  en fonction de l'inverse de la température (figure (III.7)). La courbe obtenue présente une droite qui indique la dépendance d'Arrhenius dans la gamme de température étudiées. A partir de la pente de cette droite, on trouve une énergie d'activation de produit séché de l'ordre de 34,4382656 KJ/mol. Avec un coefficient de corrélation  $r = 0.97319663$ , et un facteur pré-exponentiel d'Arrhenius de :  $D_0 \cong 5.4222483 \cdot 10^{-6} m^2/h$ , et ca pour les conditions constantes de séchage.



**Figure (III.7) :** Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif pour les conditions constantes de séchage.

### III.10.2 Détermination de l'énergie d'activation pour le cas de séchage à conditions variables :

Avec la même procédure précédente (conditions constantes) on trace la courbe de la figure (III.8). A partir de cette courbe (droite), on trouve une énergie d'activation de l'ordre de 35,3132504 KJ/mol, avec un coefficient de corrélation de :  $r = 0,92356809$ , et un facteur pré-exponentiel d'Arrhenius de :  $D_0 \cong 1,712596 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ .



**Figure (III.8):** Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif pour les conditions variables de séchage.

A partir de la comparaison entre les deux courbes (figure III.7 et Figure III.8), et les valeurs des énergies d'activation calculées, on remarque que :

- Le coefficient de corrélation pour le cas de séchage à conditions constantes est plus important que celle à conditions variables.
- L'énergie d'activation pour le cas de séchage à conditions variables est plus importante que celle à conditions constantes.

## Conclusion :

La modélisation mathématique de séchage des dattes (Deglet-Nour) réhumidifiées a été étudiée sur un procédé de séchage solaire indirect à convection forcée en deux régimes, le régime variable qui présente le séchage solaire dans les conditions variables, et le régime constant qui présente le séchage solaire dans les conditions constantes.

L'étude de modélisation est basée sur l'application de treize modèles mathématiques et l'utilisation d'une analyse de régression non-linéaire par le moyen du logiciel Curve Expert 1.3.

Les résultats de modélisation montrent que le modèle de Midilli et Kucuk est le modèle de comportement le plus approprié pour la description de l'opération de séchage des dattes dans les plages de températures de séchage entre 50°C et 65°C pour le séchage avec conditions constantes, et dans l'intervalle  $40.4^{\circ}\text{C} \leq T \leq 53.4^{\circ}\text{C}$  pour le séchage avec conditions variables. D'autre part les courbes du coefficient de la diffusion effectif présentent que la diffusion dans le produit des dattes augmente en fonction de l'augmentation de la température.

Les résultats de modélisation ont aussi montré que l'énergie d'activation pour le cas de séchage avec conditions variables est plus importante que celle de séchage avec conditions constantes.

## LES REFERENCES :

- [1] B. TOUATI. (2008). *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha viridis)*. Thèse de Doctorat: Université Abou-Bekr Belkaid -Tlemcen.
- [2] chalezeule.org. *Le séchage solaire*. [25 février 2015]. <http://www.chalezeule.org/pdf/plan-sechoir-solaire.pdf>
- [3] A.KHENBLOUCHE.(2014). *Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire*. Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [4] S.CHOUICHA.(2010). *Etude Expérimentale du Séchage Solaire des Dattes Humides et Impact sur la Qualité* .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah.Ouargla.
- [5] A.BENSEDDIK.(2011). *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirectes fonctionnant en convection forcée*. Mémoire de Magistère : université Abou-bekr Belkaid .Tlemcen.
- [6] wiképida l'encyclopédie libre. Séchage. [03 février 2015]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Séchage>.
- [7] D.MENNOUCHE.(2006).*Valorisation des produits agro-alimentaires et plantes médicinales par les procédés de séchage solaire*. Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [8] M.Kouhila, A.Belghit, B.C.Boutaleb. *Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la SAUGE dans un Séchoir Solaire muni d'un Appoint Electrique*. Revue des Energies Renouvelables. pp. 33-38, Algérie, 2000.
- [9] M.A.A.MATALLAH. (2004). *Contribution à l'étude de la conservation des dattes de la variété Deglet-Nour : Isotherme d'adsorption et de désorption*. Mémoire d'Ingénieur d'état: Institut National Agronomique (I.N.A) El Harrach –Alger.
- [10] W.BELACHI. (2009). *Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires* .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah .Ouargla.

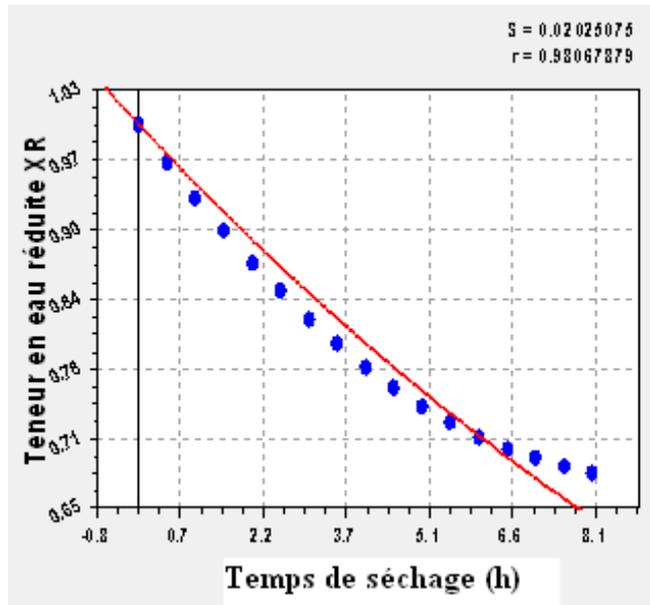
- [11] E.BENALIA.(2014). *Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires*.Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [12]S.BOUGHALI.(2010). *Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques*. Thèse de Doctorat: Université Hadj-Lakhder. Batna.
- [13] Wikipédia, l'encyclopédie libre. Deglet nour. [03 février 2015].  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Deglet\\_nour](http://fr.wikipedia.org/wiki/Deglet_nour)
- [14] A.BOUBEKRI.(2010). *Optimisation des traitements thermiques de la datte algérienne Deglet-Nour*.Thèse de Doctorat: Université Hadj- Lakhder. Batna.
- [15] wikipédia l'encyclopédie libre. Model mathématique.[25 février 2015].  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le\\_math%C3%A9matique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_math%C3%A9matique)
- [16] A.BOUSSALIA. (2010). *Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux*. Mémoire de Magister: Université Mentouri. Constantine.
- [17] A.IDLIMAM. (2008). *Caractérisation Thermophysique des plantes médicinales et de la poudre de lait par séchage solaire convectif en vue d'une meilleure conservation*. Habilitation Universitaire: Université Moulay Ismail .Meknes. Maroc.
- [18]M.H. BERREBEUH.(2009). *Etude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage solaire de certains produits alimentaires*. Thèse de Magister: Université Kasdi Merbah.Ouargla.
- [19] I. DOYMAZ.(2011). *Drying of green bean and okra under solar energy*. Chemical industry & Chemical Engineering Quarterly.
- [20] M H.BERREBEUH, A.BOUBEKRI, D.MENNOUCHE et S. CHOUICHA. (2013). *Choix et validation d'un modèle de comportement pour le séchage convectif de la datte Deglet-Nour*, Annales des Sciences et Technologie, Mai 2013, Vol 5, N° 1, PP 71-80.

[21] A. Aghfir, S. Akkad, M. Rhazi, C.S.E. Kane et M. Kouhila. (2008). *Détermination du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation de la menthe lors d'un séchage conductif en régime continu*. Revue des Energies Renouvelables, vol 11, N°3, pp 385-394.

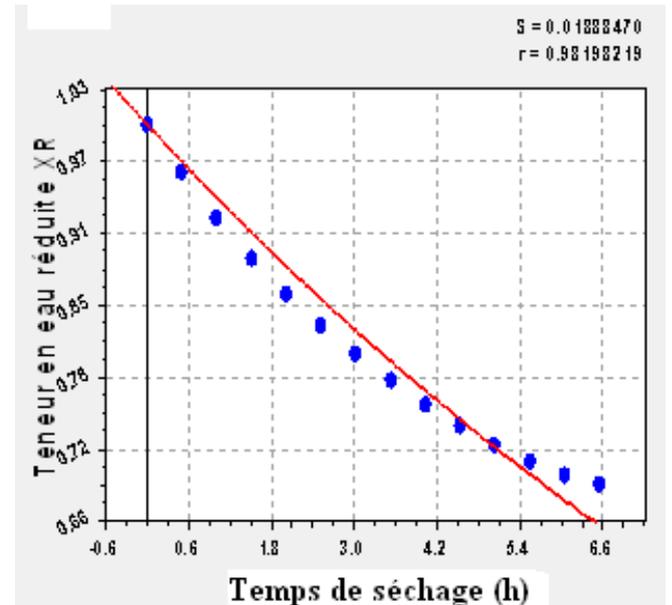
# **ANNEXE**

**Figures représentatives de lissage des courbes expérimentales de séchage par les différents modèles choisis :**

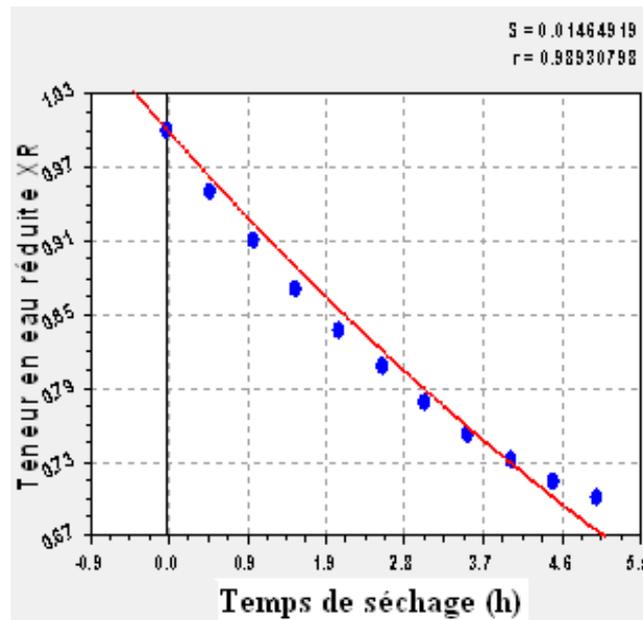
**1/Modèle de Newton :**



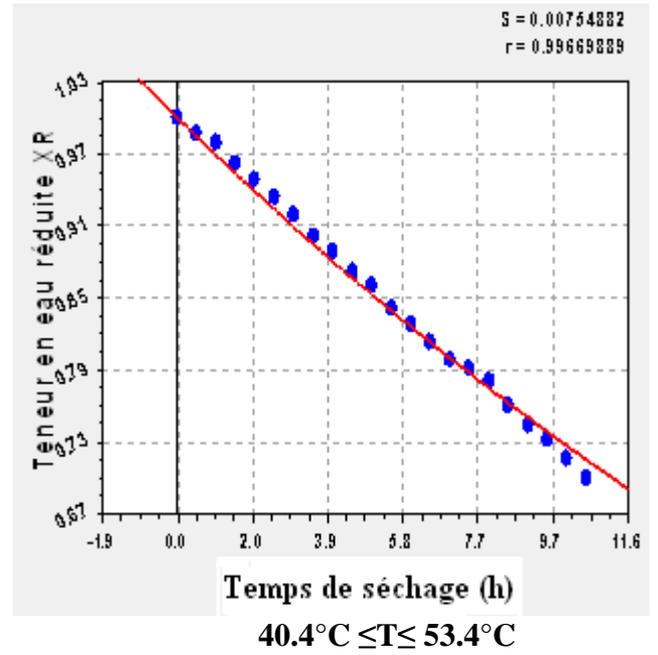
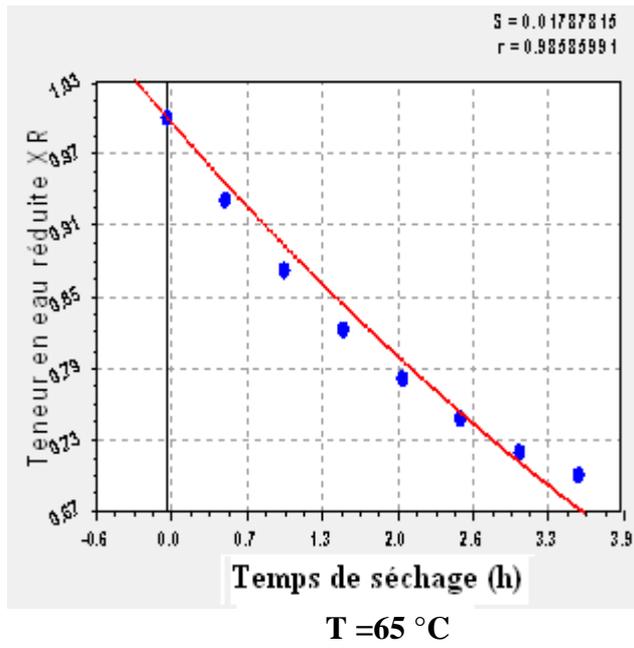
**T =50 °C**



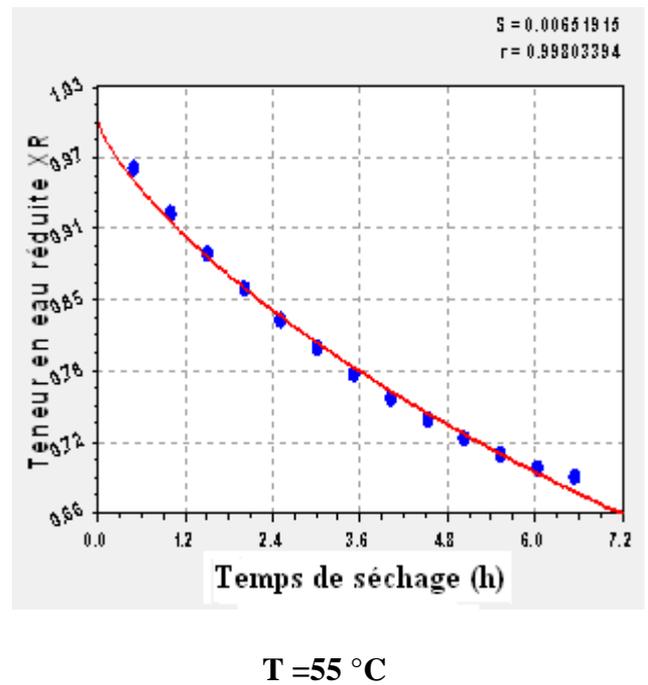
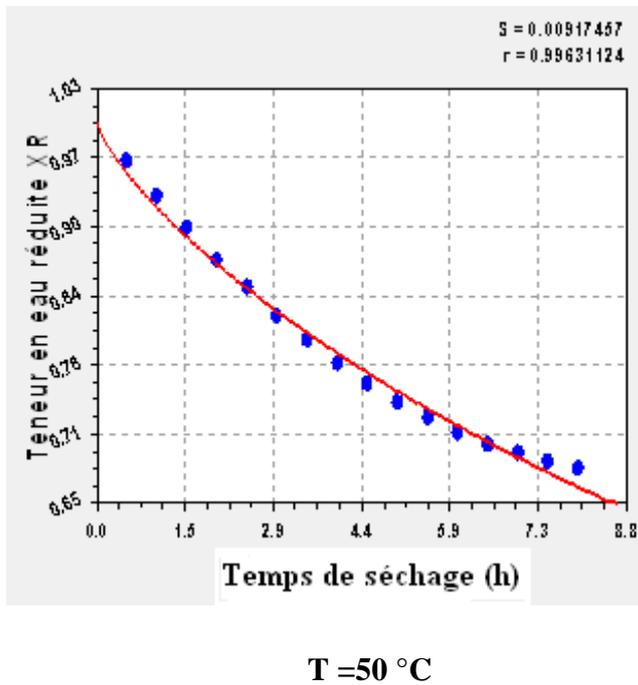
**T =55 °C**

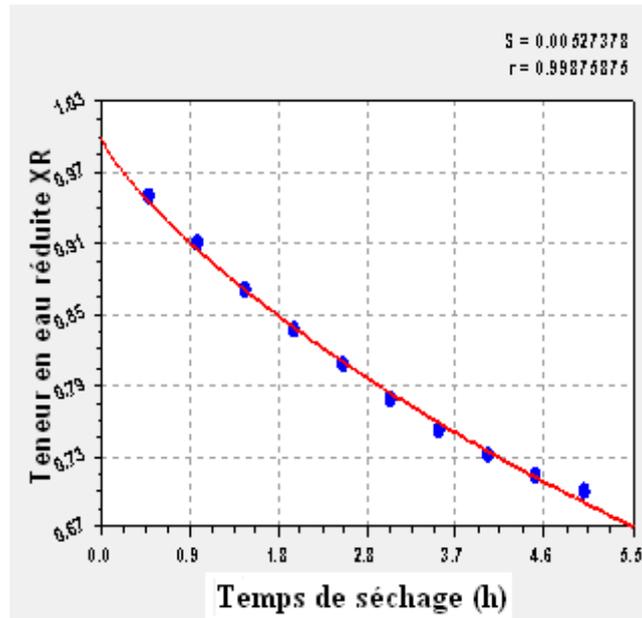


**T =60 °C**

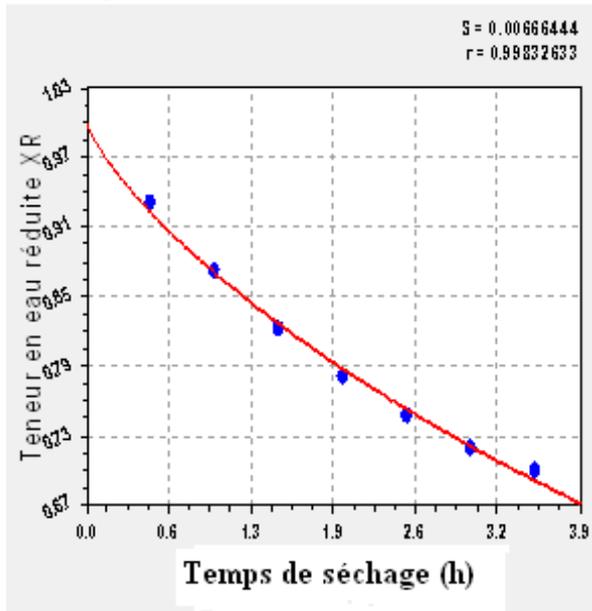


**2/Modèle de Page :**

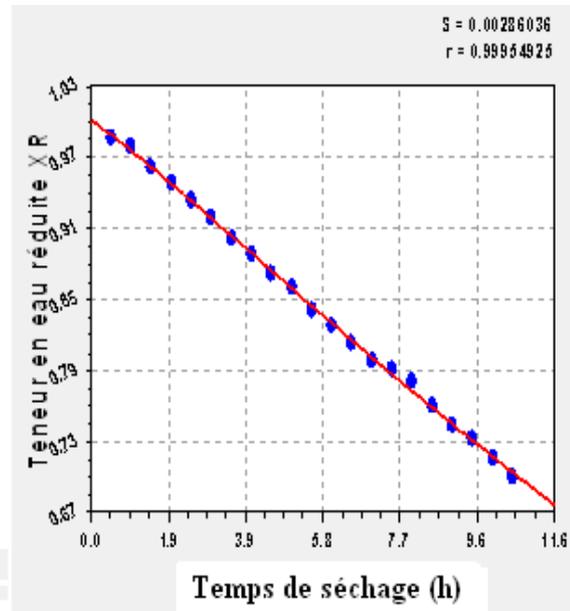




**T = 60 °C**

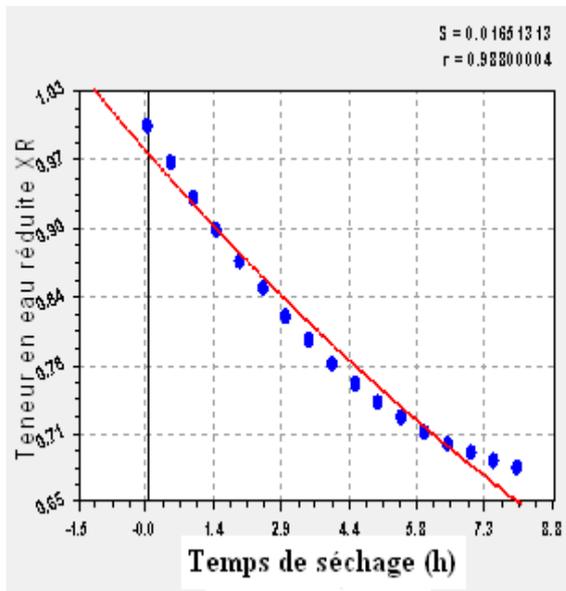


**T = 65 °C**

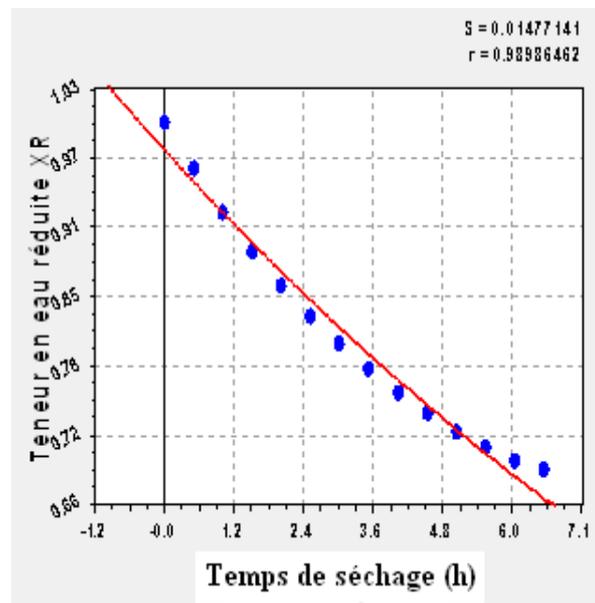


**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**

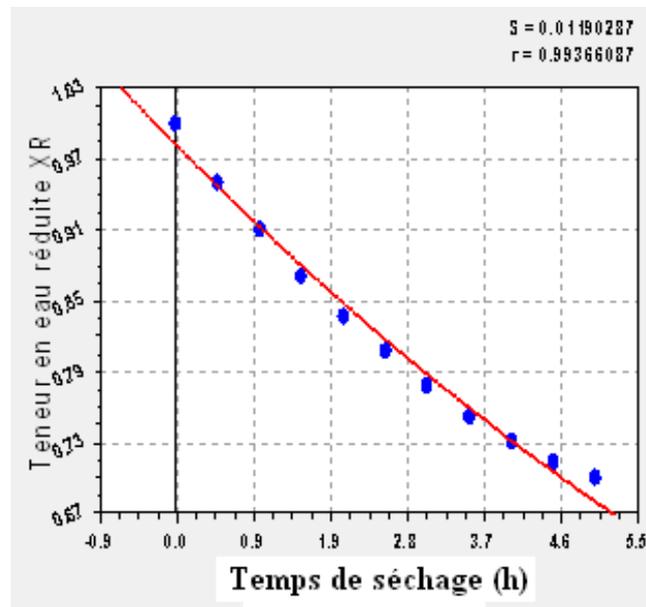
### 3/Modèle de Henderson et Pabis :



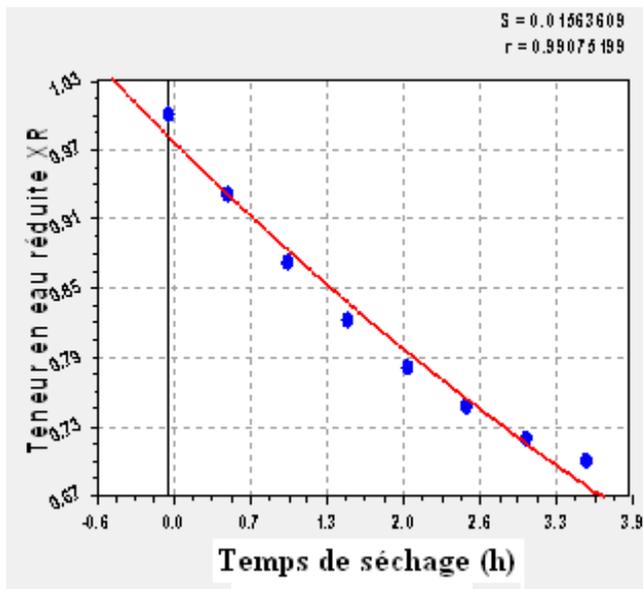
T = 50 °C



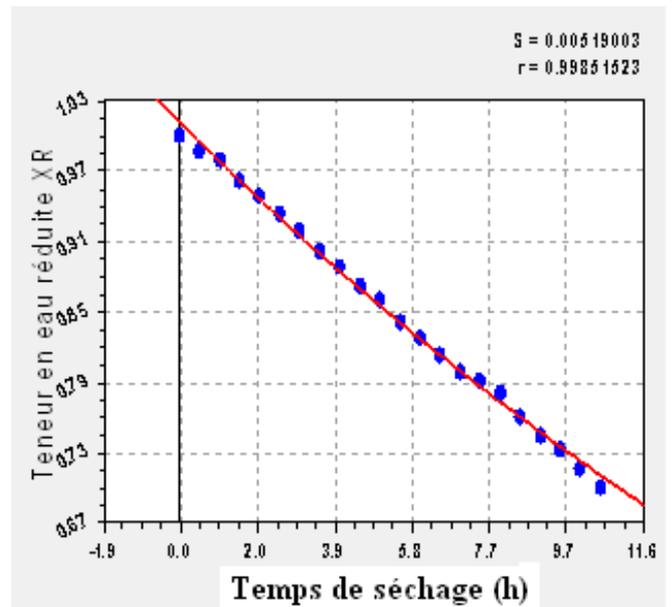
T = 55 °C



T = 60 °C

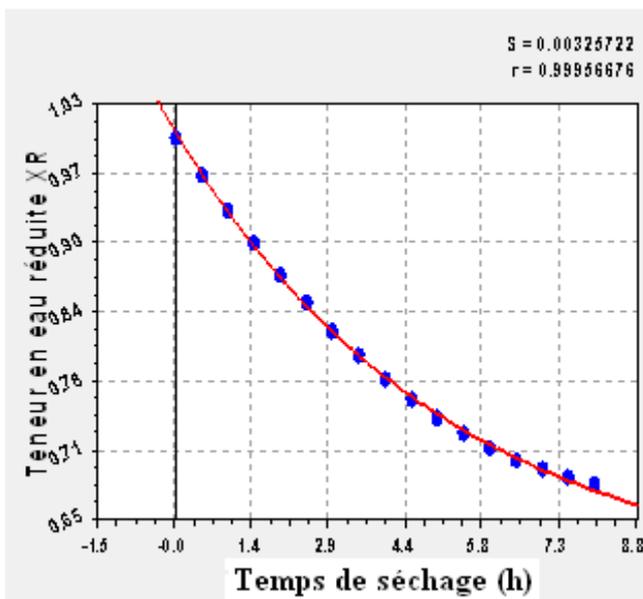


T = 65 °C

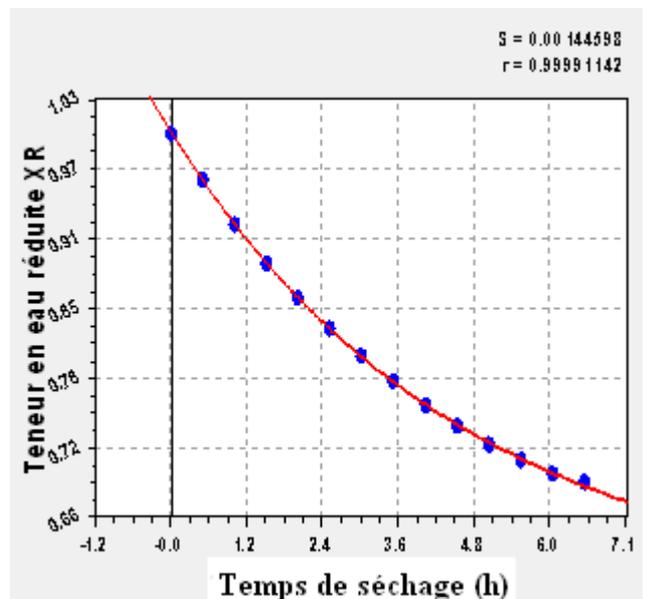


40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C

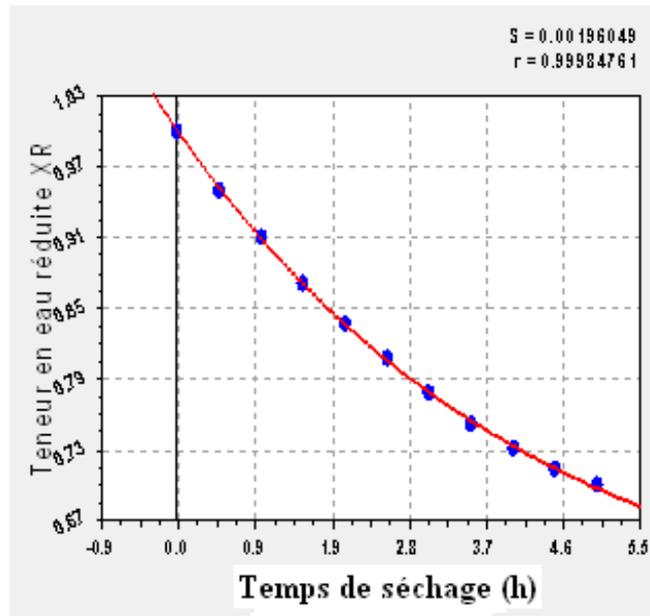
#### 4/ Modèle logarithmique :



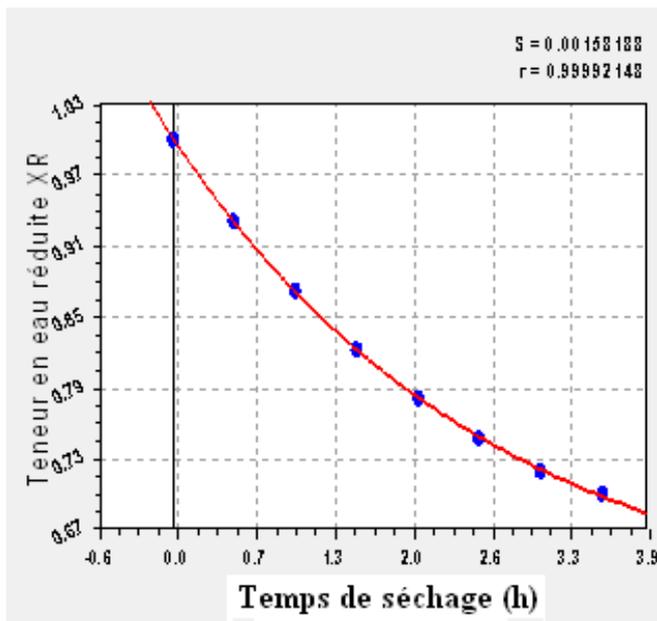
T = 50 °C



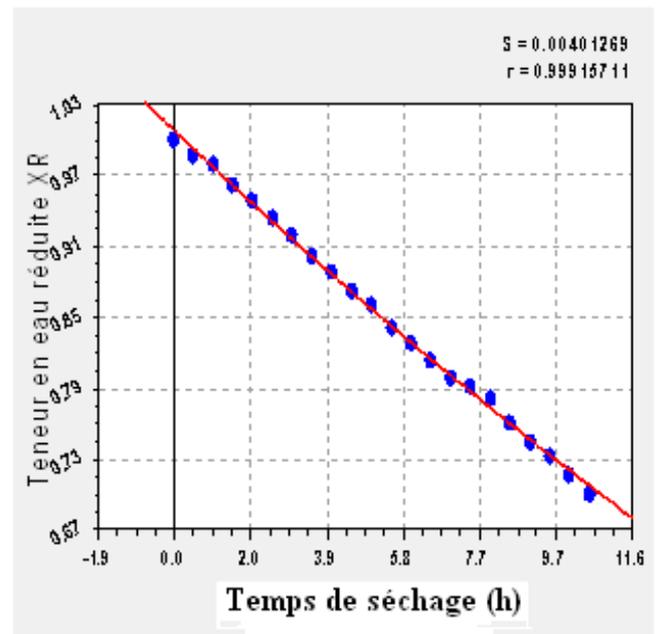
T = 55 °C



**T = 60 °C**

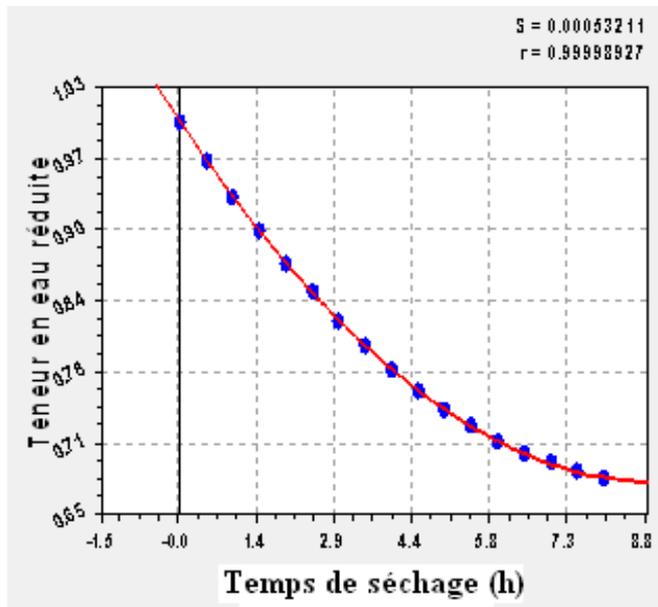


**T = 65 °C**

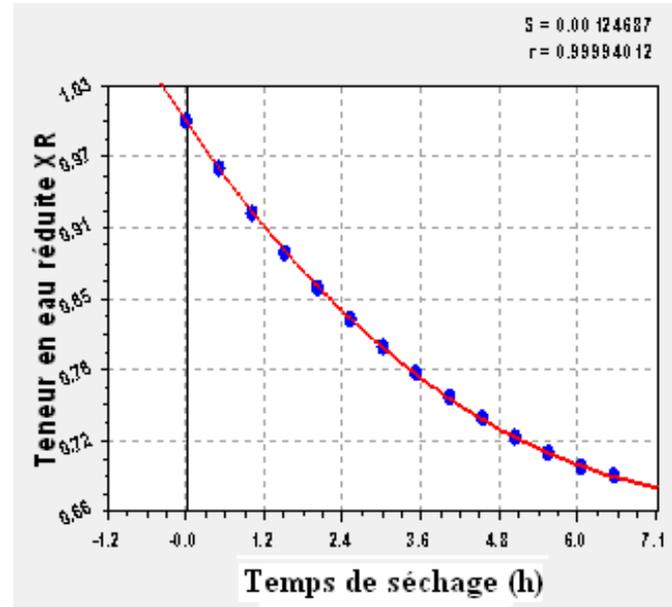


**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**

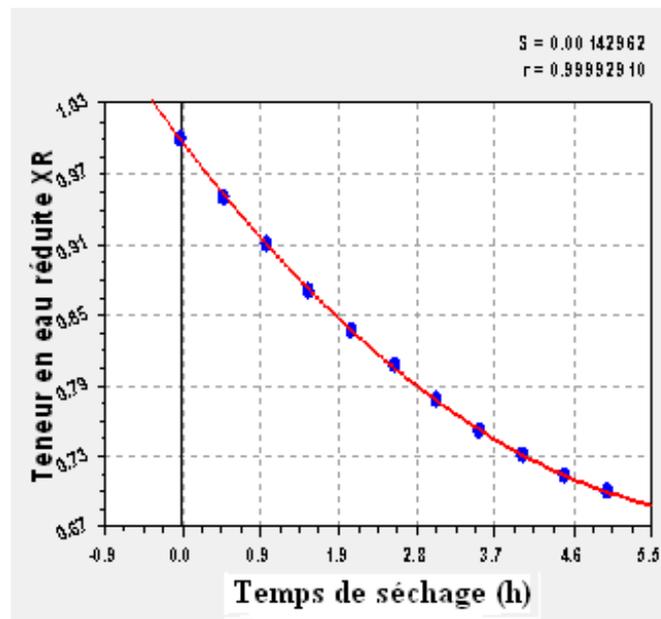
## 5/Modèle de Deux termes :



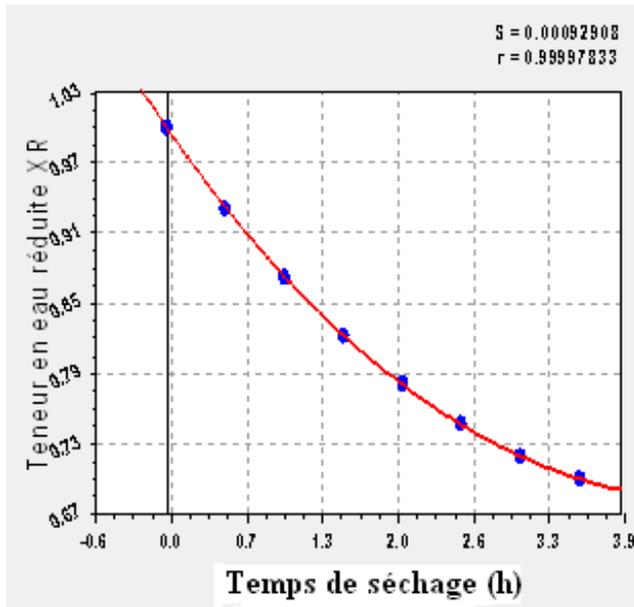
$T = 50\text{ °C}$



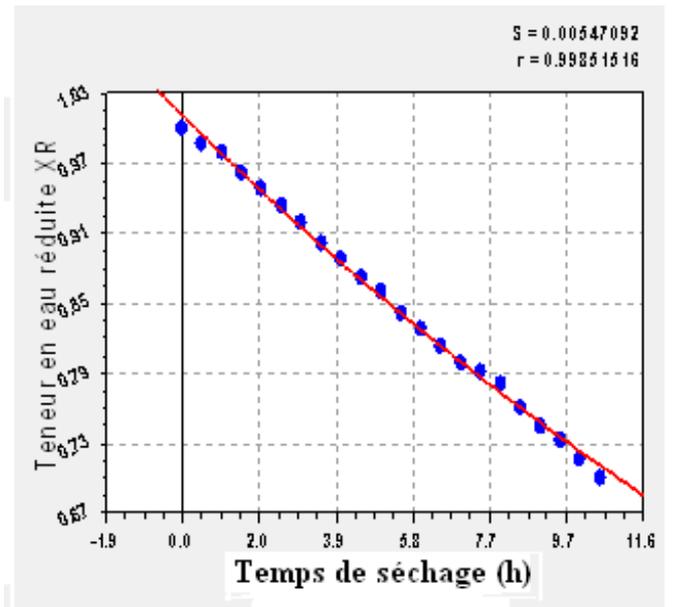
$T = 55\text{ °C}$



$T = 60\text{ °C}$

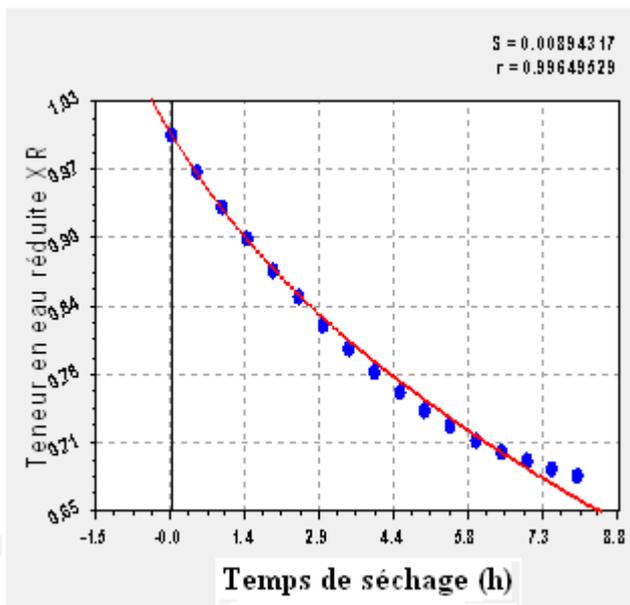


$T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

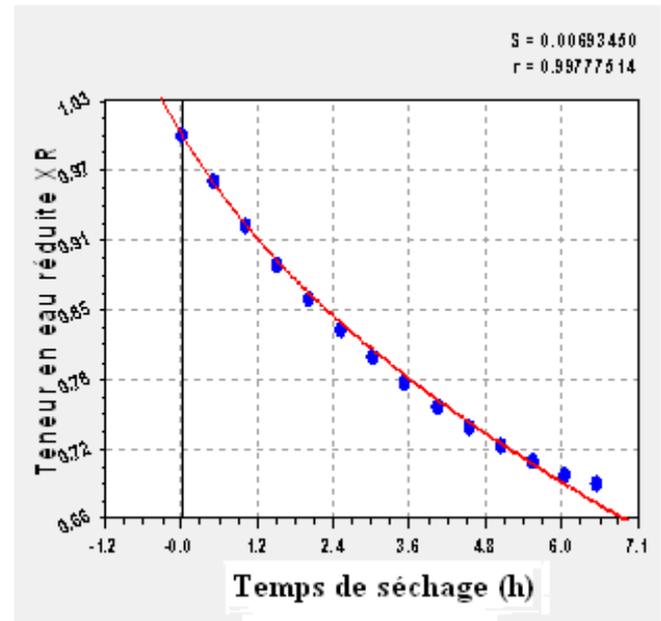


$40.4\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 53.4\text{ }^\circ\text{C}$

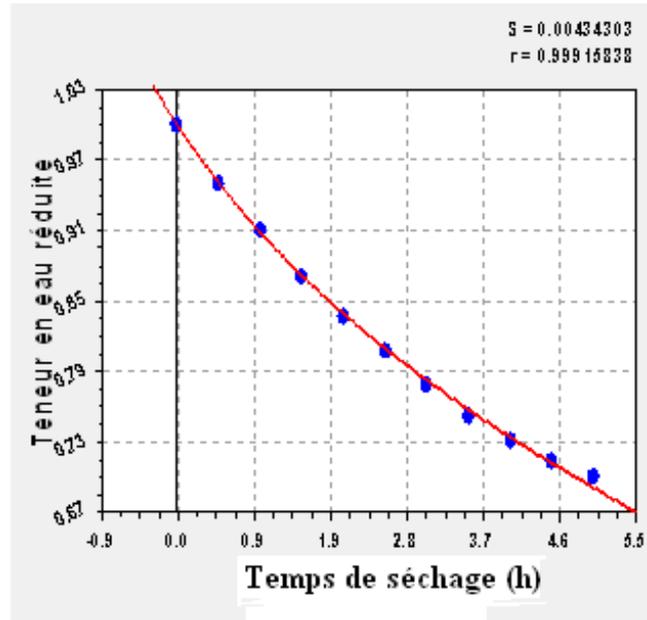
**6/Modèle de Deux termes exponentiels :**



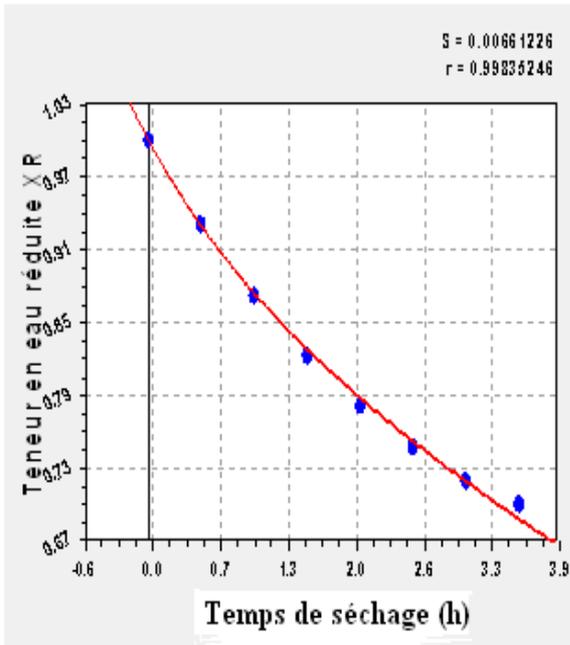
$T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$



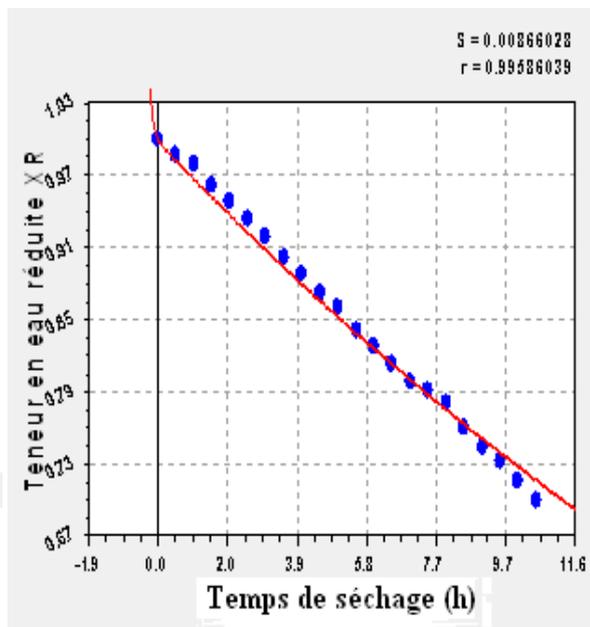
$T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$



**T = 60 °C**

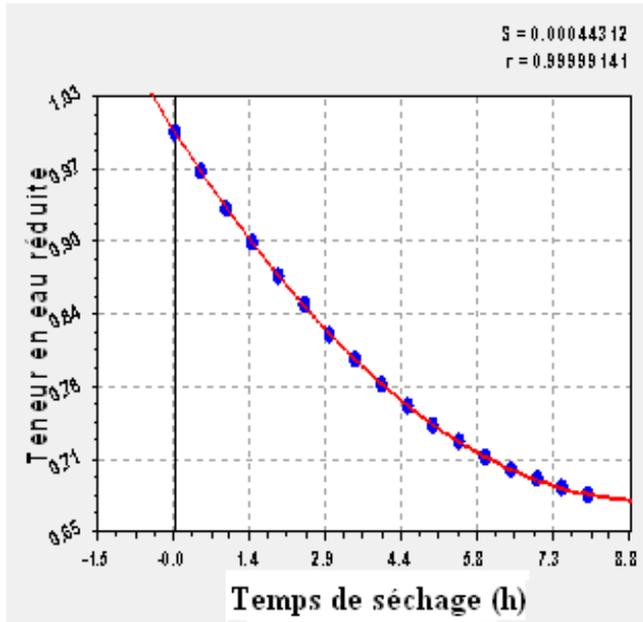


**T = 65 °C**

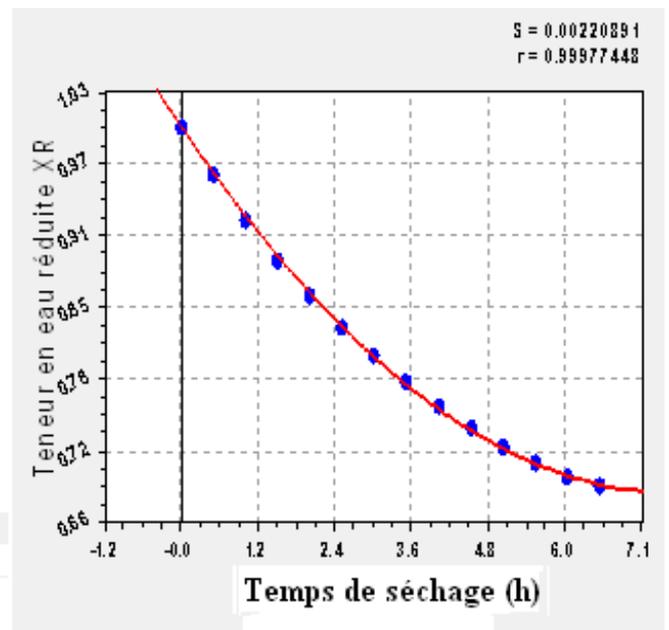


**40.4°C ≤ T ≤ 53.4°C**

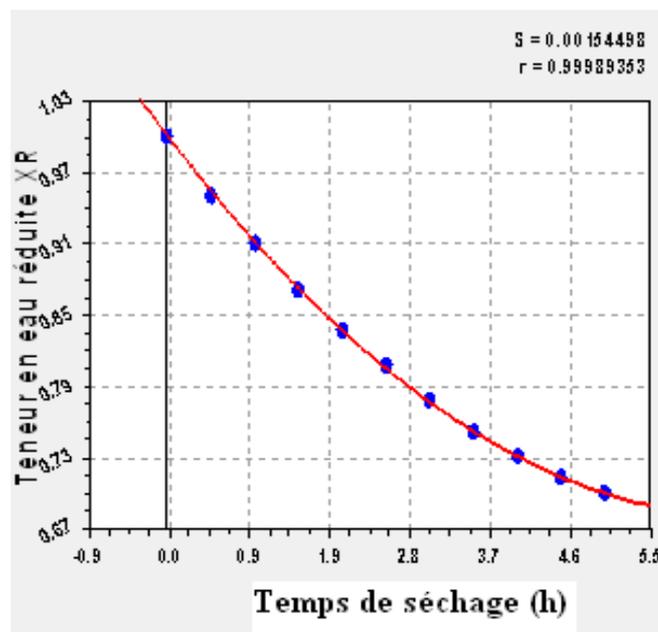
## 7/Modèle de Wang et Singh :



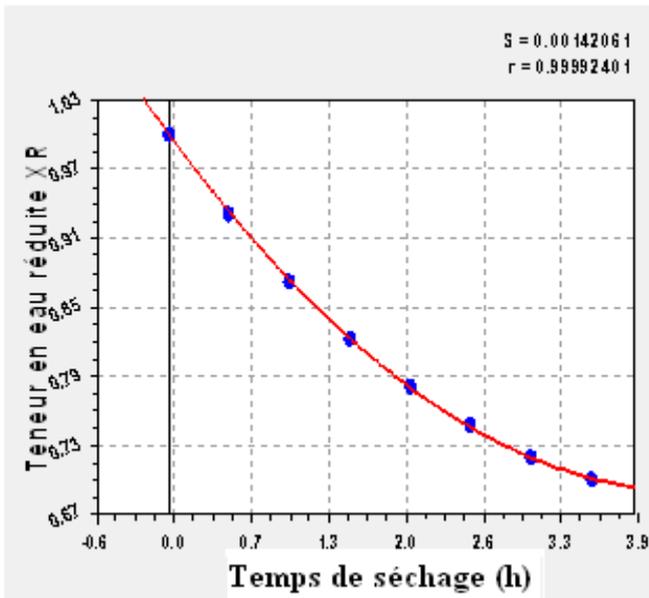
$T = 50\text{ °C}$



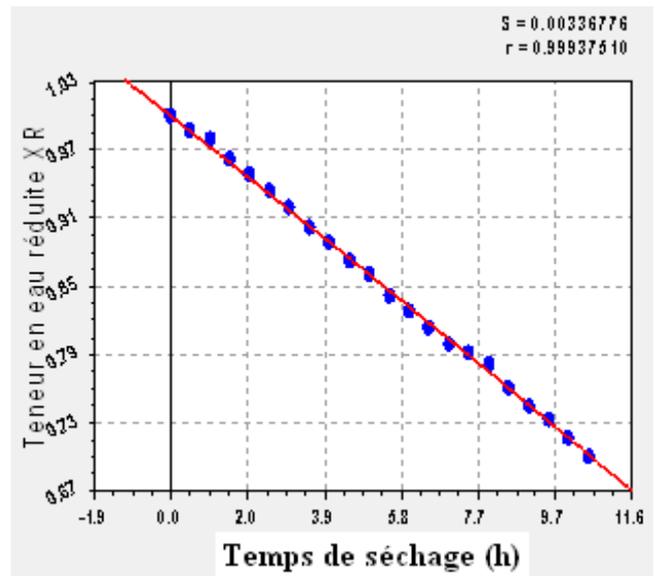
$T = 55\text{ °C}$



$T = 60\text{ °C}$

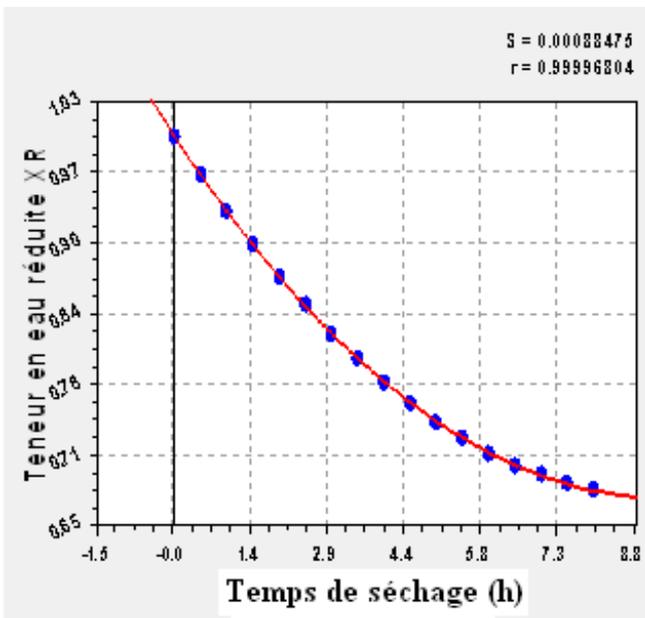


$T = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$

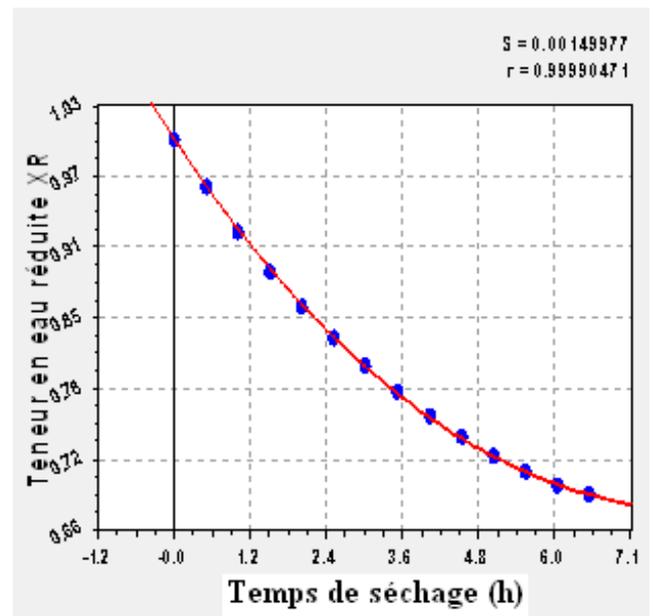


$40.4 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 53.4 \text{ } ^\circ\text{C}$

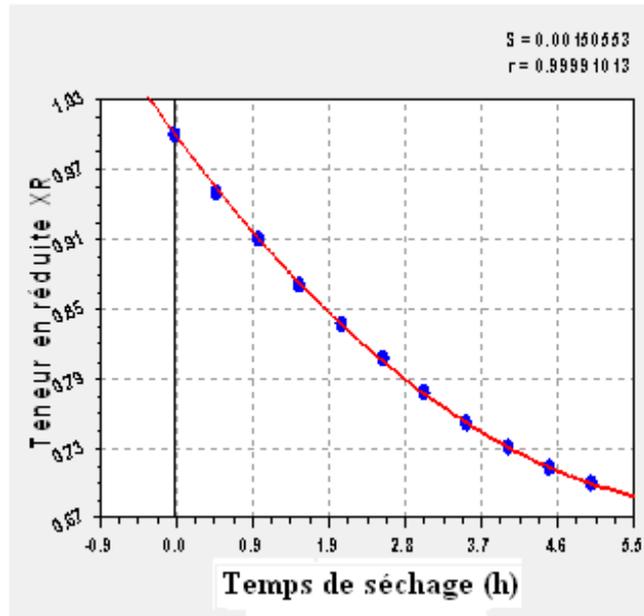
**8/Modèle approche de la diffusion :**



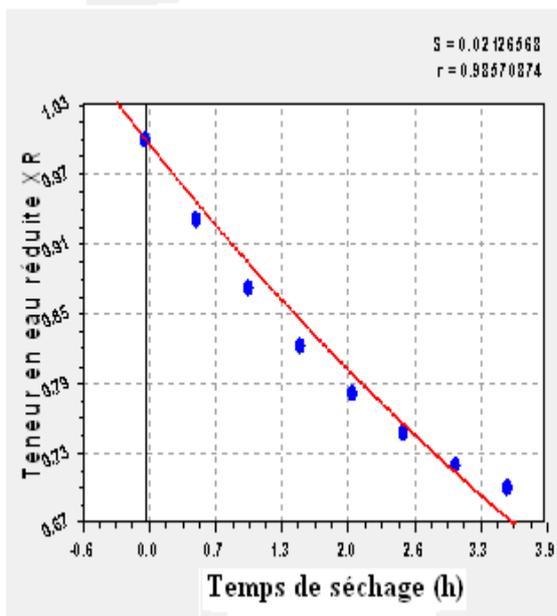
$T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$



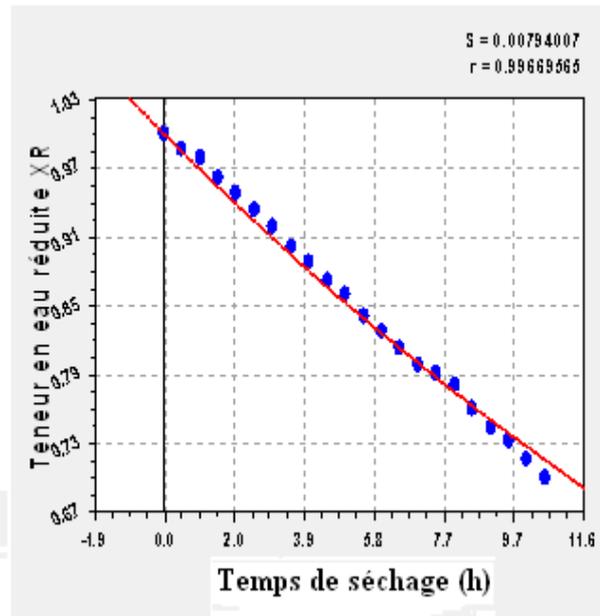
$T = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$



**T = 60 °C**

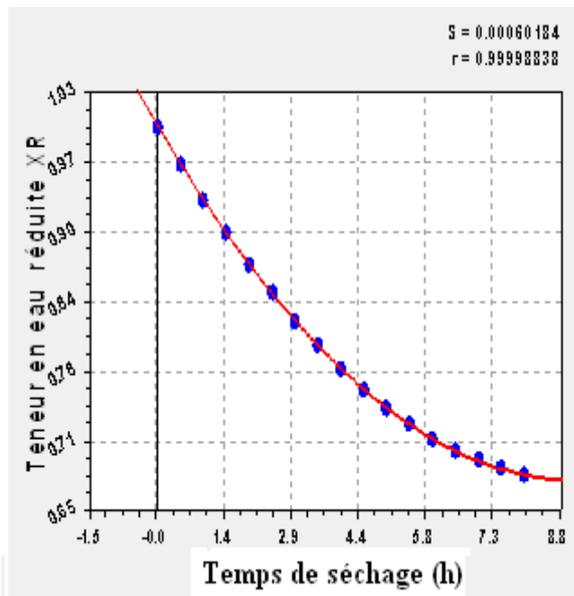


**T = 65 °C**

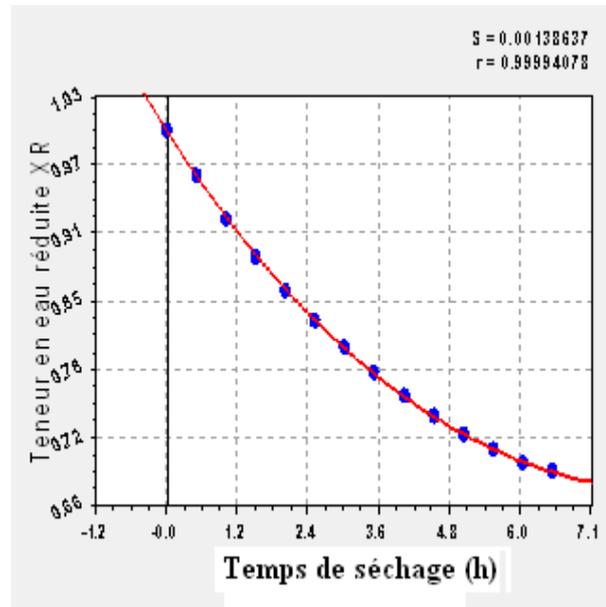


**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**

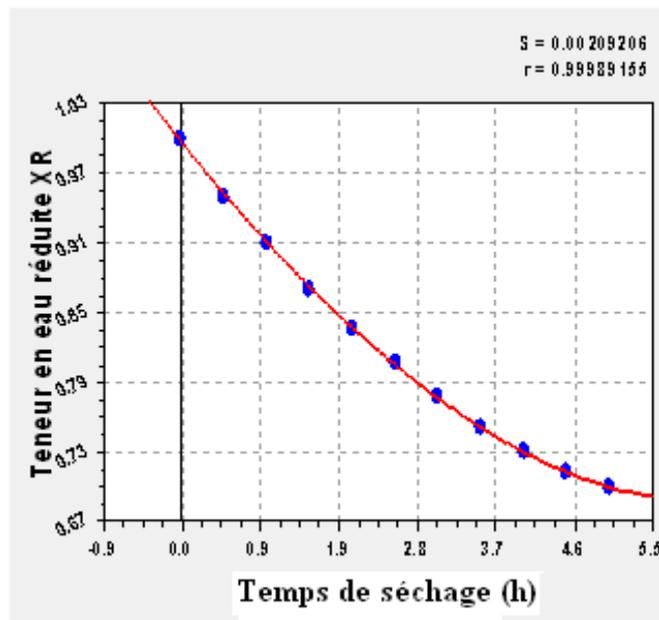
## 9/Modèle de Henderson et pabis modifié :



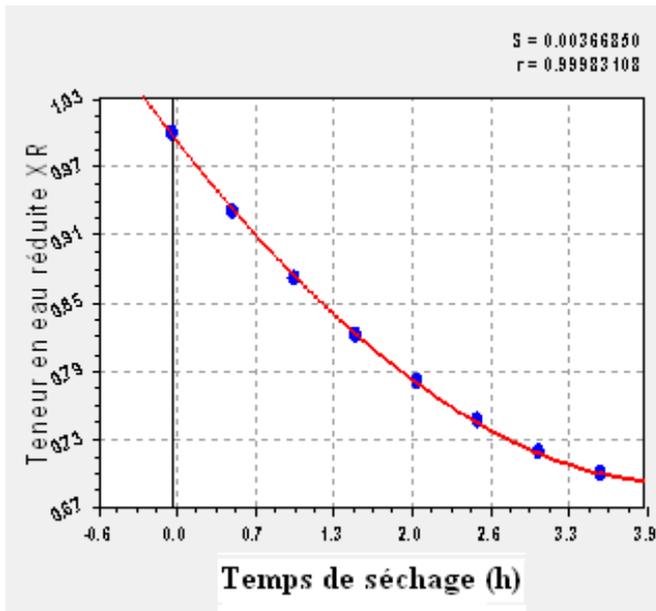
T = 50 °C



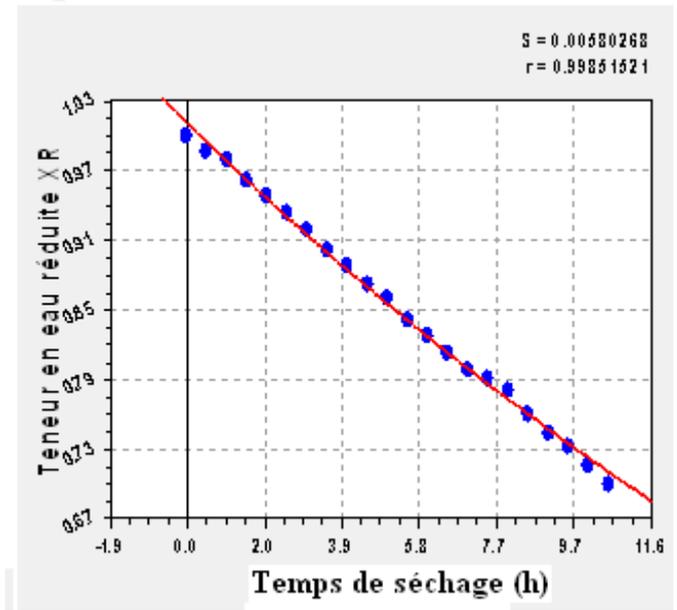
T = 55 °C



T = 60 °C

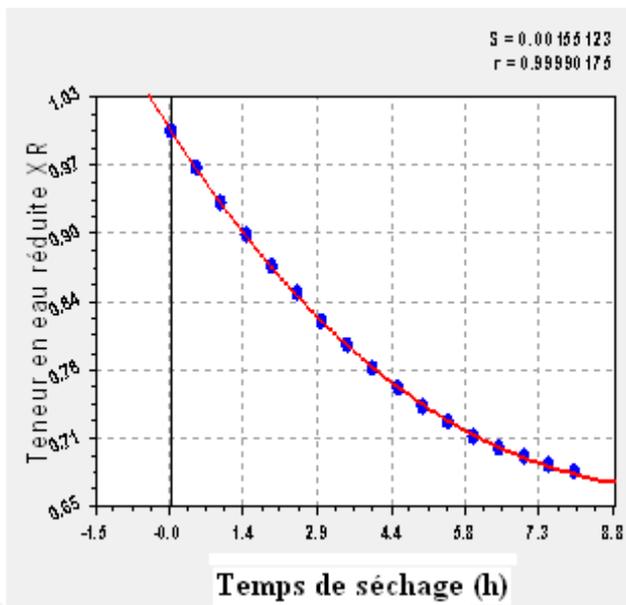


$T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

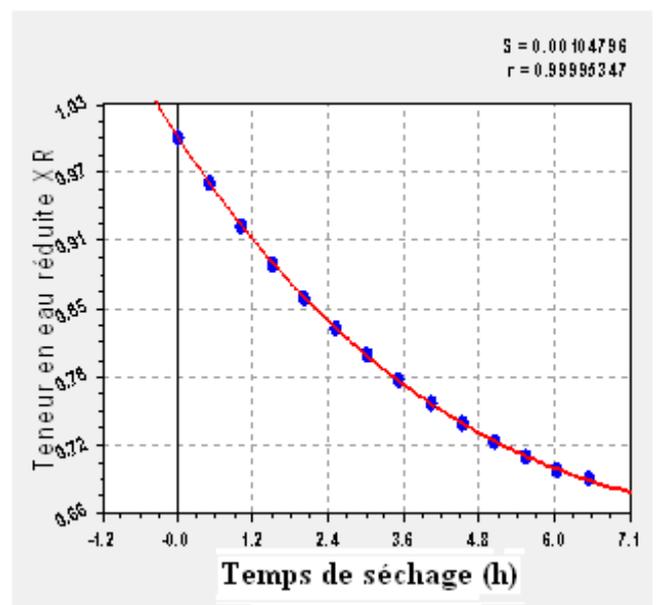


$40.4 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 53.4 \text{ }^\circ\text{C}$

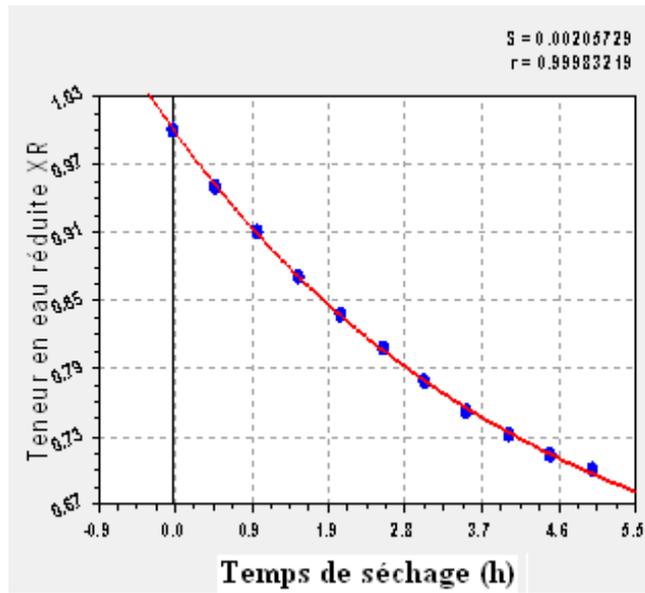
### 10/Modèle de Verma et autres



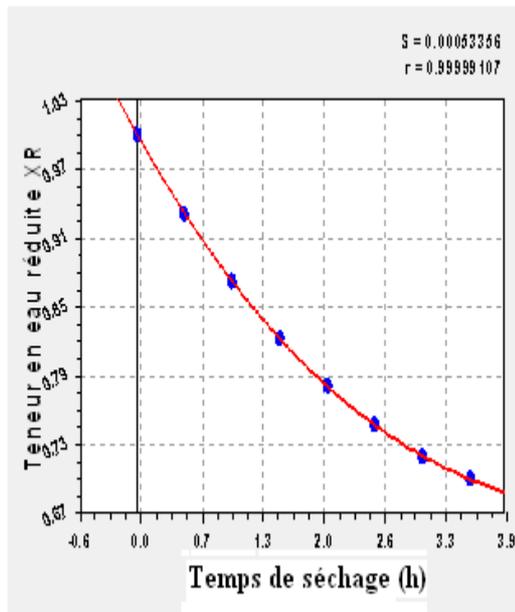
$T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$



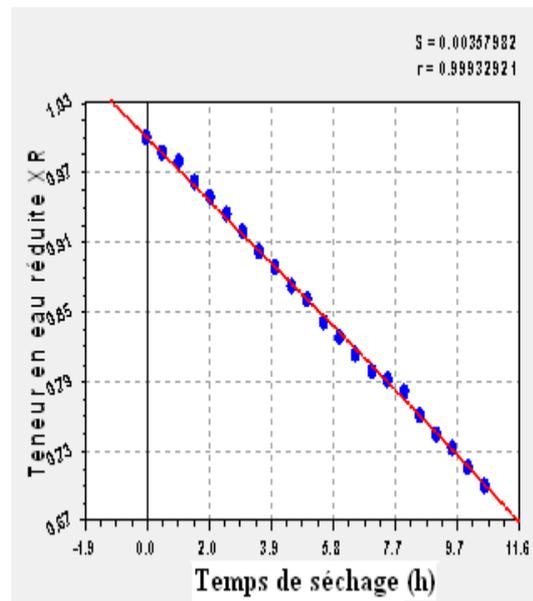
$T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$



**T = 60 °C**

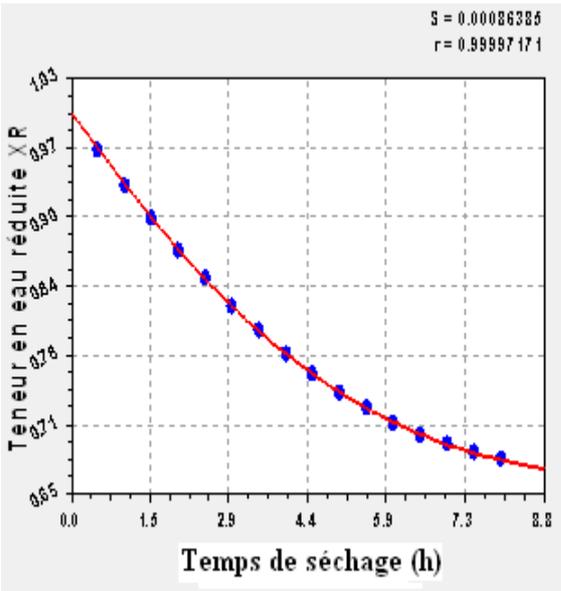


**T = 65 °C**

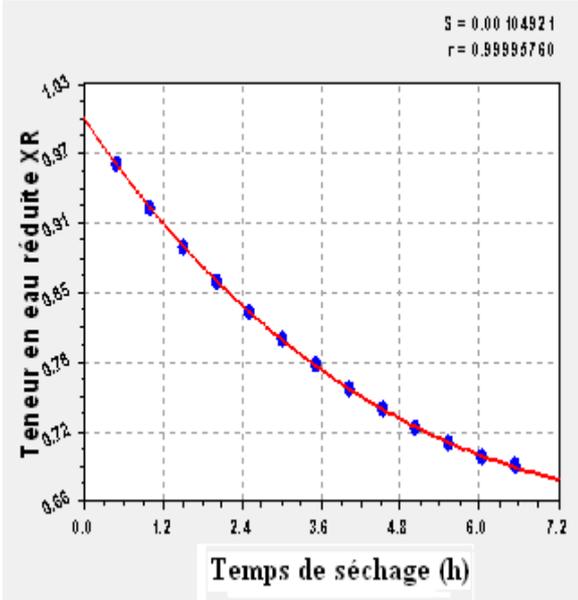


**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**

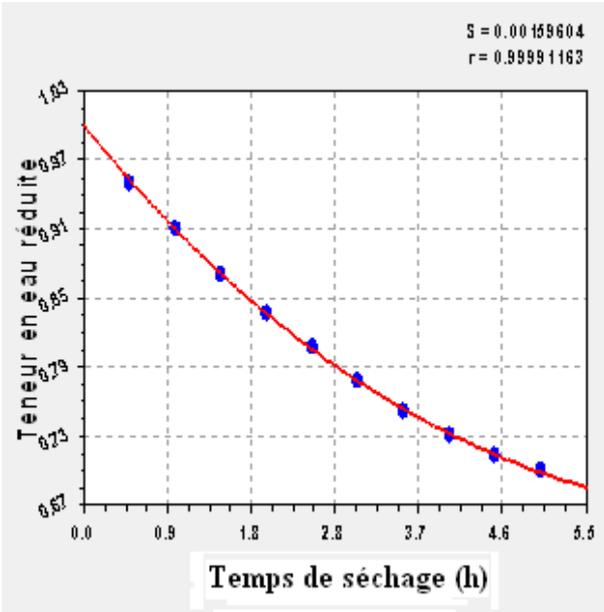
**11/Modèle de Midilli et Kucuk :**



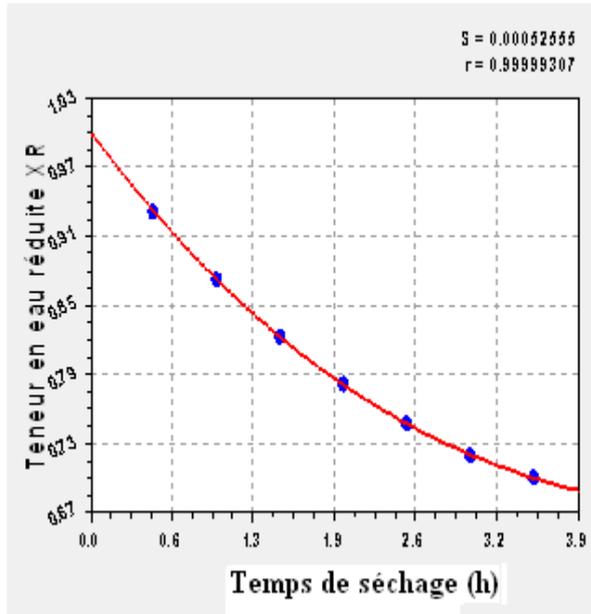
**T =50 °C**



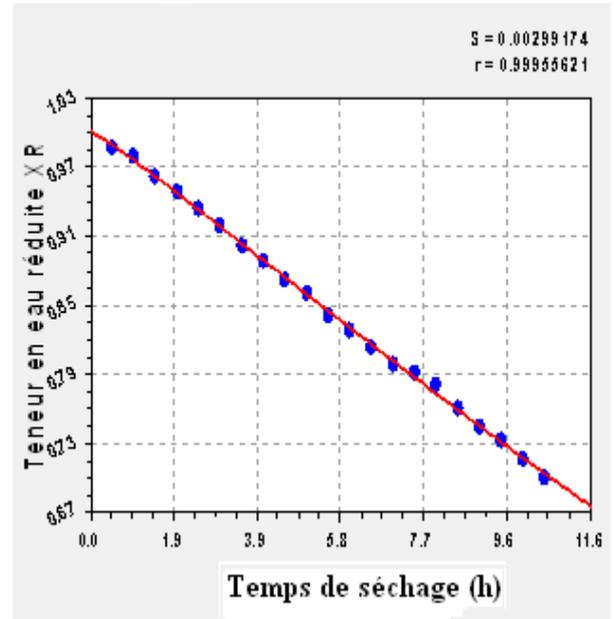
**T =55 °C**



**T =60 °C**

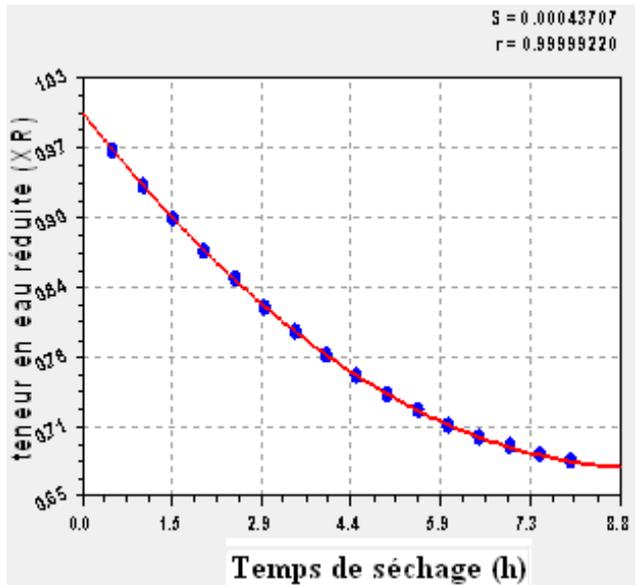


$T = 65\text{ °C}$

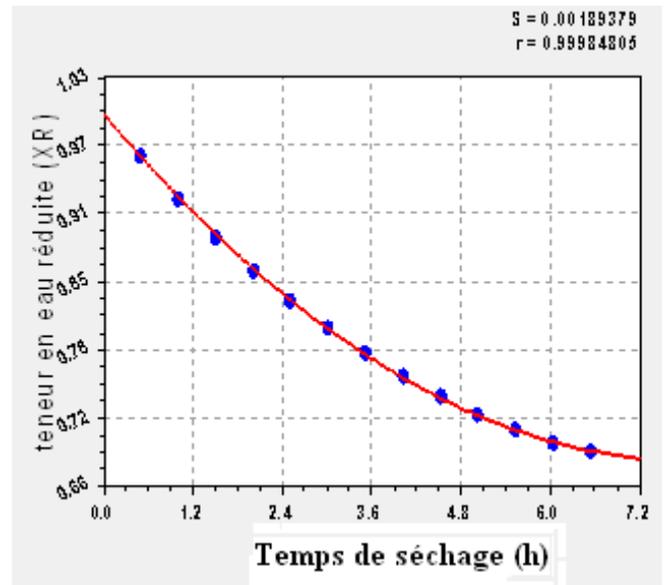


$40.4\text{ °C} \leq T \leq 53.4\text{ °C}$

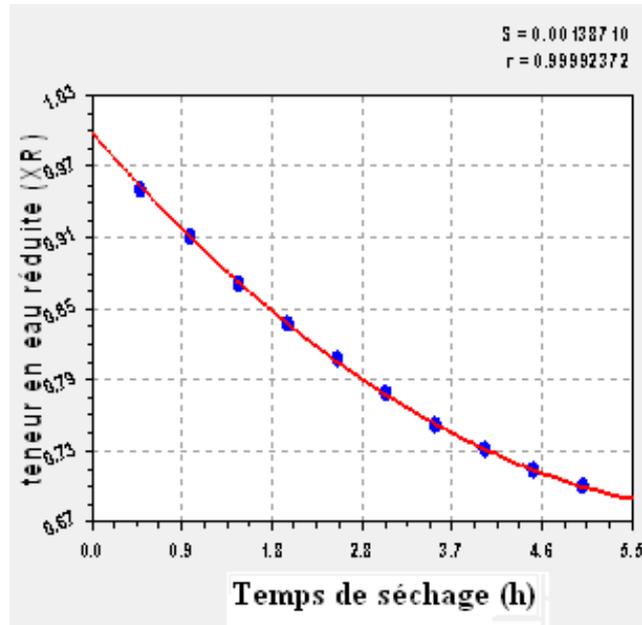
## 12/Modèle Parabolique :



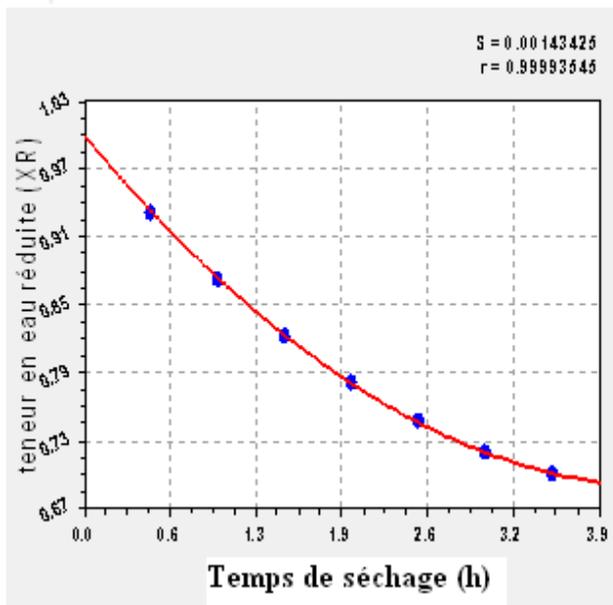
$T = 50\text{ °C}$



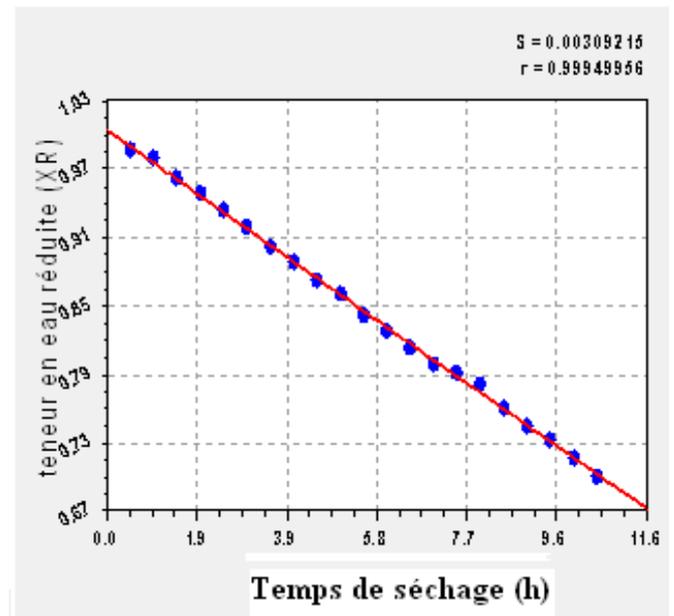
$T = 55\text{ °C}$



**T = 60 °C**

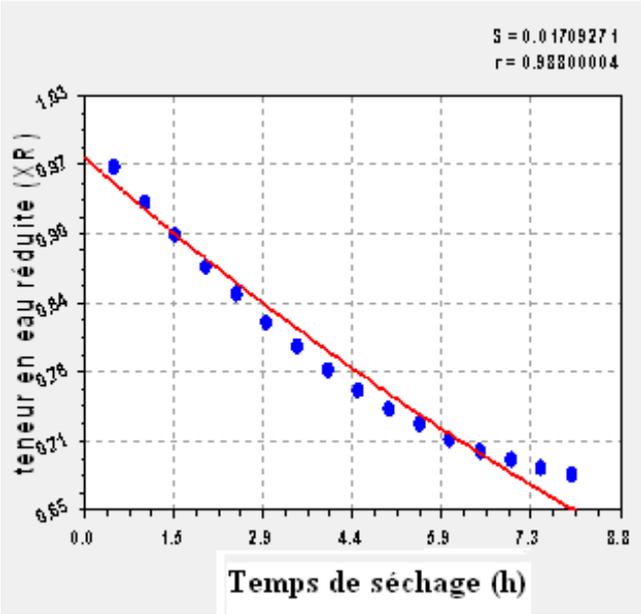


**T = 65 °C**

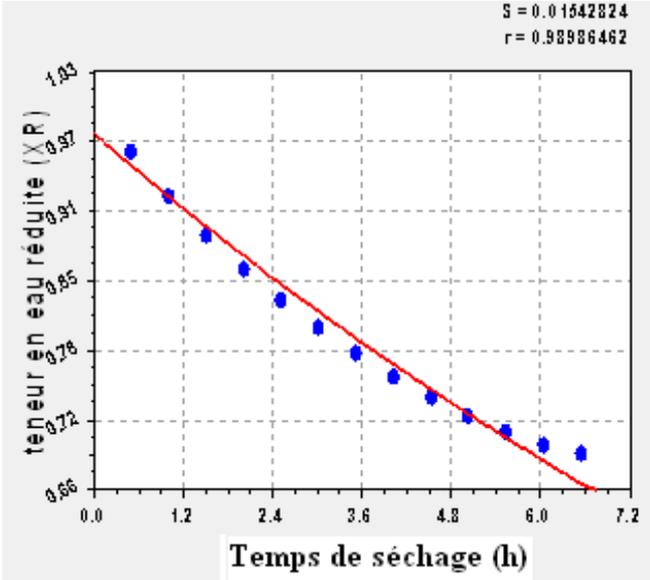


**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**

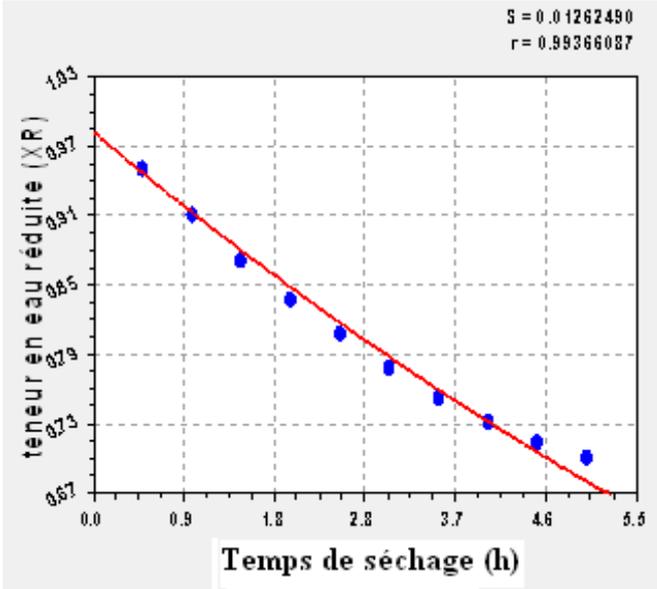
13/Modèle de diffusion de Fick :



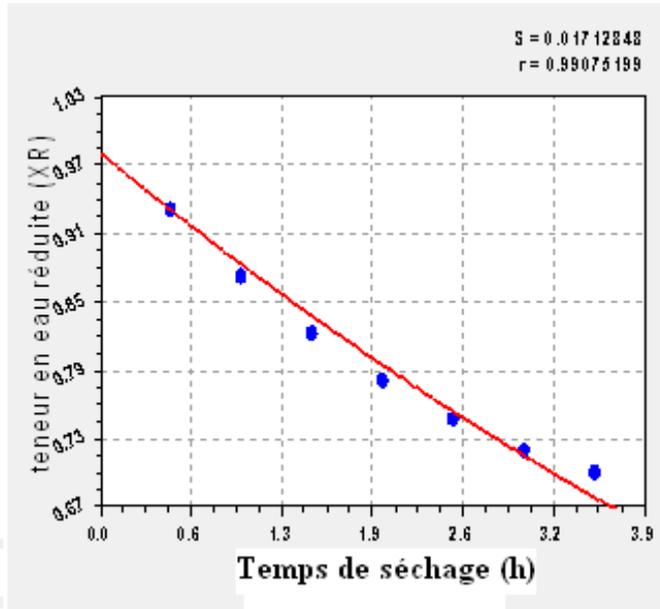
T = 50°C



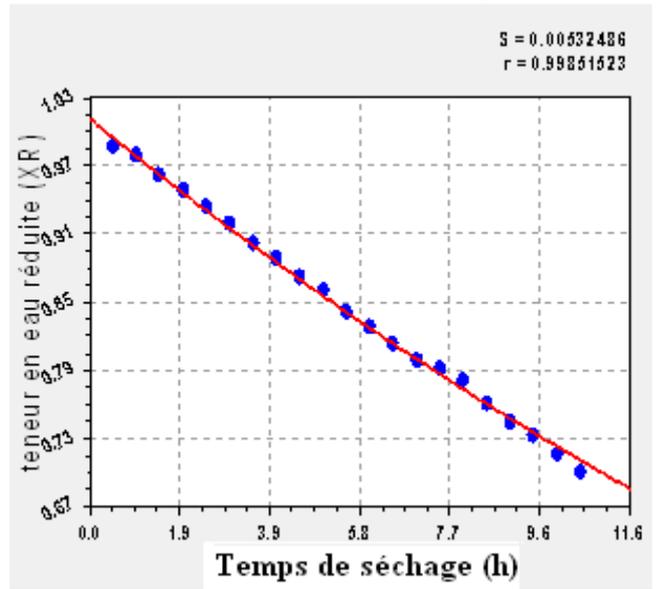
T = 55 °C



T = 60 °C



**T = 65 °C**



**40.4 °C ≤ T ≤ 53.4 °C**