UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE ET SCIENCES DE LA MATIERE

N° d'ordre : N° de série :

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Génie des procédés Option : Energétique et Procédés

Présenté par :

BERREBEUH MED HAFED

Thème

Etude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage solaire de certains produits alimentaires

Soutenu publiquement le : 27/06/2009

Devant le jury composé de :

M. S. DOUNIT	M. Conférence	Université Kasdi Merbah, Ouargla	Président
M. B. BOUCHEKIMA	Professeur	Université Kasdi Merbah, Ouargla	Examinateur
M. N. SETTOU	Professeur	Université Kasdi Merbah, Ouargla	Examinateur
M.H. BENMOUSSA	Professeur	Université Elhadj Lakhder Batna	Rapporteur
		- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	T I
M. A. BOUBEKRI	M. Assistant A	Université Kasdi Merbah, Ouargla	Rapporteur

Année universitaire: 2008/2009

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui m'a offert le courage, la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance au Pr. Benmoussa Hocine pour la qualité de son encadrement. Son aide m'a été précieuse.

Je remercie spécialement M. Boubekri A. Ghani de son coencadrement à travers les orientations et les conseils utiles.

Je remercie virement Messieurs le président et membres de jury de bien vouloir accepter de juger ce travail.

J'adresse également mes remerciements aux enseignants Mennouche Djamel, Tidjani Zakaria, Mehaouchi Azdinne pour leurs interventions notamment au niveau programmation.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes enseignants de l'année théorique pour leurs aides et conseils, tous les enseignants sans exception et mes collègues de la promotion énergétique et procèdes.

Je remercie mes responsables et mes collègues de travail (LTPS Ouargla).

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans ce travail en me permettant ainsi de garder un excellent souvenir de ces trois années.

Merci également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, merci à tous mes proches, surtout ma femme, pour son aide et soutient permanents.

Résumé

Dans le but de maitriser le comportement du séchage sous conditions variables cette étude a mis au point une méthode de génération des cinétiques de séchage solaire non régulé à partir des courbes de séchage sous conditions constantes. Parmi quatre modèles investis le modèle à deux termes à été choisi avec bonne corrélation pour décrire le séchage, en couche mince à températures constantes, des dattes Deglet-Nour algériennes. Les cinétiques de séchage solaires simulées à base de trois cycles de température variant par palier relatifs aux trois prototypes de séchoirs (LENREZA-UKMO) vont en bon accord avec la physique du phénomène étudié et qualifient le séchage solaire direct pour le meilleur en termes de durée inférieure à deux journées de séchage du fruit dattier en procédé discontinu.

Mots Clés : séchage solaire, conditions variables, modèle de séchage

Abstract

In order to control the drying behavior under variable conditions a method of generating unregulated solar drying kinetics from drying curves under constant conditions has been developed in this study. Among four usual models the two terms model was selected with good correlation to describe thin layer drying of Deglet-Nour algerian dates at constant temperatures. The simulated solar drying kinetics assuming stepwise temperature change of three cycles relatively to three dryer prototypes (LENREZA-UKMO) show good agreement with the physical phenomenon and lead to the direct solar drying as the best in terms of minor duration less than two days of batch drying process of date palm fruits.

Key words: solar drying, variable conditions, drying model

Liste des tableaux et figures

1- Tableaux

- *Tableau 1-1*: Le phénomène de variation de saturation de vapeur avec la température.
- **Tableau 2-1**: Modèles mathématiques développés par différents auteurs pour les courbes de séchage.
- **Tableau 2-2 :** Résumé des modélisations de séchage des dattes et des produits à structure pulpe- noyau.
- *Tableau 3-1*: Modèles appliqués à la description des courbes de séchage des dattes.
- **Tableau 3-2** : Conditions expérimentales des cinétiques de séchage exploitées
- Tableau 3-3 : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page
 - Tableau 3-4 : Paramètres et critères statistiques selon le modèle Logarithmique
- **Tableau 3-5**: Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Midilli et al.
- **Tableau 3-6**: Paramètres et critères statistiques selon le modèle à deux termes
- *Tableau 4-1*: Valeurs des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 extraits du tableau (3-6)
- **Tableau 4-2:** Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec leurs critères d'analyse statistique.
- *Tableau 5-1* : Informations sur les trois cycles d'évolution de la température.
- **Tableau 5-1:** Informations sur les trois cycles d'évolution de la température.

2- Figures:

- Figure 1.1 : Allure de séchage en fonction du temps.
- Figure 1.2 : Traitement post-récolte de la datte Deglet Nour
- Figure 3-1: Evaluation des coefficients de corrélations à chaque température pour les quatre modèles
- Figure 3-2: Evaluation des erreurs standard à chaque température pour les quatre modèles
- *Figure 3-3* : Evaluation des Chi-carrée à chaque température pour les quatre modèles
- Figure 3-4: L'évolution de teneur en eau réduite avec le temps des points mesures et l'estimation des modèles de Midilli, à deux termes à T = 35 °C
- Figure 3-5: L'évolution de teneur en eau réduite avec le temps des points mesures et l'estimation des modèles à T=45 °C
- *Figure 3-6*: L'évolution de teneur en eau réduite avec le temps des points mesures et l'estimation des modèles à T= 60 °C

- *Figure 3-7*: L'évolution de teneur en eau réduite avec le temps des points mesures et l'estimation des modèles à T= 75 °C.
- *Figure 3-8*: L'évolution de teneur en eau réduite avec le temps des points mesures et l'estimation des modèles à T= 85 °C
- Figure 3-9 : résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 35 °C
- Figure 3-10 : résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 45 °C
- Figure 3-11 : résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 60 °C
- Figure 3-12 : résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 75 °C
- Figure 3-12 : résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 85 °C
- Figure 4-1: Evolution des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 avec la température
- Figure 4-2-a: Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T = 35 °C
- Figure 4-2-b: Teneurs en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en Fonction des teneurs en eau réduite expérimentale à T = 35 °C
- **Figure 4-3-a:** Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T = 75 °C
- Figure 4-3-b: Teneur en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en fonction des teneurs en eau réduite expérimentale à T = 75 °C
- Figure 4-4-a: Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T = 85 °C
- Figure 4-4-b: Teneurs en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en fonction des teneurs en eau réduite expérimentale à $T=85^{\circ}C$
- *Figure (4-5)*: Courbes de séchage simulées par l'équation caractéristique (à T = 40, 45, 50,55 et 60)
- *Figure (4-6)*: Courbes de séchage simulées par l'équation caractéristique (à T = 40, 45, 50,60 et 75)
- Figure 5-1 : Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection naturelle (prototype de laboratoire LENREZA U K M Ouargla)
- Figure 5-2 : Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée (prototype de laboratoire LENREZA U K M Ouargla)
- Figure 5-3 : Schéma descriptif du séchoir solaire direct (Laboratoire LENREZA U K M Ouargla)

- *Figure 5-4*: Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir indirect convectif naturel (1^{er} cycle de la température)
- *Figure 5-5*: Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir indirect convectif forcé (2^{eme} cycle de la température)
- *Figure 5-6* : Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir direct (3^{eme} cycle de la température)
- Figure 5-7 : Organigramme de génération de courbe de séchage par parties
- *Figure 5-8*: Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le premier
- Figure 5-9: Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le deuxième cycle de la température journalière (S Ind. forcé)
- Figure 5-10: Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le troisième cycle de la température journalière (S direct)
- Figure 5-11: Cinétique de séchage solaire simulée pour les trois différentes cycles de la température journalier (S Ind. naturel, forcé et S-direct) avec teneurs en eau initiale égal 0.50 (kg d'eau / kg Ms)

Introduction

Le séchage des produits agroalimentaires est une pratique ayant pour objectif de préserver la qualité du produit et d'augmenter sa durée de vie en stock. En effet il est connu que la dégradation de qualité par infestation microbiologique est étroitement liée à un excès d'humidité.

Les produits alimentaires étant en grande partie classés comme thermosensibles, le séchage solaire de ceux-ci s'avère une technique très convenable par le fait des températures modérées mises en jeu, outre les raisons économiques et environnementales. En revanche le séchage solaire se caractérise par ses conditions variables de l'air séchant dépendant des conditions climatiques, d'où les difficultés de prévision du processus de séchage en termes de comportement physique, de durée de séchage et d'aspect qualité. L'objectif de notre étude consiste à exploiter des cinétiques de séchage obtenues sur des séchoirs convectifs à air chaud à conditions constantes contrôlées pour prédire des cinétiques de séchage solaire sous l'hypothèse de variation de température de l'air par paliers.

Notre travail présenté dans ce manuscrit est logiquement enchainé dans une introduction, cinq chapitres et une conclusion. Dans le premier chapitre on trouve des rappels de notions générales relatives au séchage des produits agroalimentaires notamment le fruit dattier comme produit d'application en raison de son intérêt économique national. Le deuxième chapitre fait le point bibliographique sur les différents types de modèles utilisés pour décrire le séchage des produits agroalimentaires notamment ceux caractérisés par une structure pulpe-noyau. La synthèse bibliographique à conduit au choix de quatre modèles empiriques appropriés au genre de produit étudié qui ont fait objet d'investigation dans la suite de l'étude. Dans le troisième chapitre nous avons exposé une étude de modélisation des cinétiques de séchage des

dattes Deglet-Nour utilisant les données de cinq expériences de séchage effectuées sur un séchoir-pilote automatiquement contrôlé pour des températures de l'air entre 35°C et 85°C et une vitesse constante de 1.5 m/s sous humidité relative ambiante. Moyennant les logiciels Curve-Expert, Excel et Matlab avec une analyse de régression rigoureuse, nous avons réussi à faire le choix d'un modèle empirique décrivant le séchage de la variété des dattes étudiée. Il s'agit d'un modèle exponentiel à deux termes. Dans le quatrième chapitre nous avons procédé au développement d'une équation caractéristique du séchage de cette variété de datte sur la base du modèle déjà choisi mais généralisé et validé pour une plage température entre 30 et 75°C. Le cinquième chapitre a été consacré à la génération d'une cinétique de séchage solaire des dattes sur la base de températures journalières mesurées sur un prototype de séchage solaire (LENREZA Ouargla) puis modelées par une courbe de température à paliers constants. A l'aide d'un programme en Fortran modifié, adapté et amélioré nous avons procédé à la construction, par parties, des courbes simulant le séchage solaire des dattes en changeant les conditions de séchage relatives à chacun des paliers constants de la température de l'air au cours d'une journée de huit heures périodiquement répétée. En fin dans la conclusion nous avons rappelé les principaux résultats obtenus dans cette étude suivis de remarques utiles pour des éventuelles études futures en relation avec la notre.

<u>Chapitre 1</u>: <u>Le séchage des produits agroalimentaires</u> <u>Notions générales</u>

I.1- Le séchage:

I.1.1- Définition :

Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer tout ou partie d'un solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un corps humide (solide ou liquide). Le produit final obtenu étant toujours un solide. En pratique, de nombreux produits alimentaires et biologiques subissent des opérations de séchage lors de leur transformation et / ou de leur conservation. C'est souvent une opération de formulation plus que de fabrication qui intervient avant l'étape de commercialisation et qui contrôle en grande partie la qualité de produit.

Les raisons de sécher sont presque aussi nombreuses que les produits à sécher et elles sont effectuées dans le sens de :

- Permettre ou faciliter la conservation des produits agricoles ou industriels.
- Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport.
- Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit.

I.1.2-<u>Problèmes de séchage</u> [Jean-Jacques Bimbenet (2002)] :

Les deux principaux problèmes techniques attachés au séchage sont :

- Le risque d'altération de la forme de la texture et des qualités nutritionnelles et organoleptiques du produit.
- La consommation d'énergie considérable; à titre d'exemple le séchage absorbe en France 14% de la consommation énergétique industrielle. 40 % de l'énergie consommée en séchage étant imputable aux I A A (Industries Agro-Alimentaires).

On estime que le secteur agroalimentaire consacre 60 % de sa consommation d'énergie au séchage.

I.1.3- <u>Modes de séchage</u> [Gustavo Ernesto (2006)]: On peut distinguer divers procédés de séchage :

-Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression)

-Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse.

Diverses méthodes de chauffage peuvent également être utilisées :

- -convection naturelle, convection forcée
- -conduction
- -rayonnement
- -pertes diélectriques

Le procédé de séchage par convection forcée est la plus répandu.

I.1.4- Processus de séchage par convection :

Dans le séchage par convection, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz (généralement, l'air chaud à faible hygrométrie) caloporteur utilisé comme agent de séchage. Ce courant gazeux assure à la fois l'apport de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et l'enlèvement de la vapeur produite. Entre l'entrée et la sortie du séchoir, le gaz se refroidit en même temps qu'il se charge d'humidité. Dans le cas du solide, on observe une diminution progressive de sa teneur en eau et une augmentation de sa température au cours du séchage /Mouafki A., (2004)/

I.1.5-Principaux agents de l'opération de séchage par convection

I.1.5.1-Le produit à sécher

Le produit à sécher se caractérise par sa masse initiale M_0 , teneur en eau initiale X_0 qui sont déterminés expérimentalement. Pour suivre le processus de séchage on doit relever les valeurs de la masse humide du produit Mh(t) à différents

instants t_i , puis connaissant la masse sèche mesurée on peut obtenir la teneur en eau en fonction du temps sur la base humide ou sèche.

<u>Teneur en eau à base humide (b.h) ou titre en eau</u> [Mennouche D. (2006)]: C'est la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X(t) = \frac{Mh(t) - Ms}{Mh(t)}$$
 (1-1)

Teneur en eau à base sèche (b.s.) ou taux d'humidité [Mennouche D., (2006)]: C'est la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X(t) = \frac{Mh(t) - Ms}{Ms}$$
 (1-2)

Ou : Ms : est la masse sèche mesurée du produit, elle se conserve au cours de l'opération de séchage et se calcule par la formule suivante :

$$Ms = \frac{M_0}{1 + X_0} \tag{1-3}$$

Ou : M₀ est la masse humide initiale du produit.

I.1.5-2 L'air humide

a- Constitution

L'air humide est un mélange d'air et de vapeur d'eau, contenant parfois l'eau liquide.

L'air sec est composé d'environ :

- 78 % de diazote en volume,
- 21 % de dioxygène en volume,
- 1 % d'autres gaz dont :
 - o les gaz rares (principalement de l'argon : 0,9%),
 - o d'autres gaz (dioxyde de carbone, ...).

Au voisinage du sol, l'air contient une quantité très variable de vapeur d'eau, qui dépend des conditions climatiques, et en particulier de la température. En effet le phénomène de saturation de vapeur varie fortement avec la température comme le montre le tableau suivant :

Température de l'air	à -10 °C	à 0 °C	à 10 °C	à 20 °C	à 30 °C	à 40 °C
% de vapeur d'eau		de 0 à 0.6%		de 0 à 2,4%		de 0 à 7,6%

<u>Tableau 1-1</u>: Phénomène de variation de saturation de vapeur avec la température [Encyclopédie libre]

La pression partielle de vapeur d'eau P_{vap} dans l'atmosphère n'est jamais nulle quelque soit le lieu et la saison, même si sa valeur peut varier fortement.

b- Température et humidités

<u>Humidité absolue</u> ω elle est définie pour l'air humide (ou d'autres gaz) comme sa teneur en vapeur d'eau. Elle est limitée par la quantité maximale que le gaz peut absorber avant qu'il y ait saturation à la température de celui-ci [Encyclopédie libre].

$$\omega = 0.622 \frac{P vap}{P - P vap} \Rightarrow P vap = \frac{\omega}{0.622 + \omega} P \tag{1-4}$$

Où P indique la pression totale de l'air.

Humidité relative de l'air (ou degré d'hygrométrie), couramment notée φ, correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température et pression. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport

changera si on change la température ou la pression bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changé. L'humidité relative est mesurée à l'aide d'un hygromètre [Encyclopédie libre]:.

Elle est exprimée le plus souvent en pourcentage et son expression devient :

$$\varphi = \text{Humidit\'e relative (HR)} = \frac{\text{Pvap}}{\text{Psat(T)}} \times 100\%$$
 (1-5)

Expressions de calcul de Psat :

Le calcul approximatif de la pression de vapeur saturante P_{sat} peut se faire à l'aide de plusieurs formules disponibles dans la littérature telles que :

• Formule de Dupré : [Yves Jannot (2005, a)] valable entre -50°C et +200°C pour calculer P_{sat} (T):

$$Psat(T) = \exp\left[46,784 - \frac{6435}{T + 273,15} - 3,868Ln(T + 273,15)\right]$$
 (1-6)

Où:

T: Température en °C

 $P_{sat}(T)$: Pression de saturation en mm Hg.

* Formule de Rankine [Encyclopédie libre]: Elle reprend la précédente avec des coefficients légèrement différents (écart de 0,39 à 4,1 % sur la plage de 5 à 140 °C par rapport aux tables thermodynamiques):

$$\ln p_{sat} = 13, 7 - \frac{5120}{T} \tag{1-7}$$

Avec : P_{sat} : pression de vapeur saturante de l'eau, en atmosphère

T: température absolue, en K

Relation entre l'humidité relative, l'humidité absolue et la température /Jean Cstang, 2003/

$$HR = \frac{P}{Psat(T)} \times \frac{\omega}{(0.622 + \omega)} \times 100\%$$
 (1-8)

I.1.6- Cinétique de séchage:

Les mécanismes de séchage sont complexes parce que plusieurs facteurs influent simultanément sur l'opération. Parmi ces facteurs on peut citer le mode de séchage et les caractères du produit (nature, forme et propriétés physiques) [Benaouda N. (2006)].

Ces causes empêchent de trouver un modèle unique susceptible de représenter la cinétique de séchage dans toutes les situations.

On appelle vitesse de séchage Vs = -dX/dt (kg d'eau par kg de matière sèche par unité de temps), moyenne du rapport de la différence de teneur en eau ΔX par l'intervalle de temps Δt . C'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert.

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

- -La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- -La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

I.1.6.2- Différentes phases d'un séchage convectif :

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant,....). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Tous les travaux de séchage montrent que ces courbes se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on constate l'existence de trois différentes périodes qui se caractérisent par un comportement différent de la vitesse de séchage :

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de la vitesse de séchage. Sur cette courbe figure 1.1 on distingue trois régions explicitées comme suit :

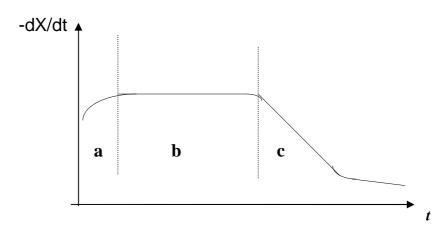


Figure 1.1 : Allure de séchage en fonction du temps

Où,

Région a : Période de mise en température

Région b : Période à allure constante Région c : Période de ralentissement

- Région a (Période d'initiation ou transitoire): C'est la période de mise en température. Quand un produit d'une température de surface T_s et d'une pression partielle de vapeur d'eau P_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur, les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation. L'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur. Si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement du produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si

les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante.

- <u>Région b</u>: C'est la période à vitesse de séchage d'allure constante, elle n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface. L'activité de l'eau à la surface du produit (a_{es}) est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, on peut définir la température du thermomètre humide T_h c'est la température à laquelle le flux de chaleur entrant est égal au flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit.
- <u>Région c (Période de ralentissement)</u>: C'est la période à vitesse de séchage décroissante. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :
- disparition de l'eau libre en surface de produit : ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

I.1.6.3-<u>Influence des caractéristiques de produit à sécher sur la cinétique de</u> séchage :

- a <u>L'épaisseur du produit</u>: si cette épaisseur est de plus en plus grande, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.
- b <u>La diffusivité (D) de l'eau dans le produit</u>: elle varie avec la teneur en eau du produit, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

La résistance mécanique des parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

c- Le croutage : certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent, l'eau évaporée pendant la période à allure constate (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes

concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

I.1.6.4-Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

a -Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe 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 conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes.

b -Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, dans le cas des produits à peau faiblement perméable l'influence de la vitesse de l'air se trouve plus faible. Cette constatation est rapportée par Belarbi (2001) dans le cas du séchage des dattes

c- Influence de l'humidité de l'air

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

I.1.7- Quelques notions sur le séchage solaire :

Le séchage solaire est une opération de séchage utilise l'énergie solaire comme apport d'énergie. Elle présente aujourd'hui un grand intérêt dans le monde industriel grâce à plusieurs raisons :

- Raisons techniques : En général les installations de séchage solaire fonctionnent avec une grande souplesse d'utilisation sans nécessiter de surveillance permanente et beaucoup de maintenance, encore le séchage

solaire est une technique très convenable par le fait des températures modérées.

- Raisons économiques : En comparaison avec le séchage thermique normal le séchage solaire est à moindre coût en investissement et en opération.
- Raisons environnementales : réduire l'exploitation des sources d'énergie influant sur l'environnement surtout les énergies fossiles dont la combustion émet des gaz à effet de serre et participent à la destruction de la couche d'ozone.

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, il constitue un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à moyennes températures

Le séchage solaire se caractérise par ses conditions variables de l'air asséchant (température, humidité relative) dépendant des conditions climatiques.

Différents types de séchoirs solaires (Michel .D (1985):

Il existe une grande variété de séchoirs solaires et selon le point de vue adopté, différentes façons de les classer. On peut, par exemple, retenir comme critère la façon d'exploitation de rayonnements solaires direct ou indirect a- Séchoirs solaires indirects: dans ce type de séchoirs, le rayonnement solaires sert à chauffer l'air à l'aide d'insolateurs-plans. Cet air chaud est ensuite utilisé pour sécher les produits. On distingue deux types:

- Séchoirs solaires indirects à convection naturelle
- Séchoirs solaires indirects à convection forcée

<u>b- Séchoirs solaire directs</u>: Ils sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où, il converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois opaques qu'il rencontre.

<u>c- Séchoirs mixtes</u>: Ces séchoirs combinent les dispositifs de séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

<u>d- Séchoirs hybrides</u>: Les systèmes de séchage solaires actifs (Séchoirs hybrides) utilisent les systèmes de chauffage à énergie solaire et/ou électriques ou par combustible fossile.

1.2-Présentation du produit d'étude : la datte « Deglet-Nour »

1.2.1 - Caractéristiques du fruit :

La datte Deglet-Nour est une variété largement produite dans les pays du Maghreb et particulièrement en Algérie où la production annuelle s'élève à plus de 500x10³ tonnes selon les données de la FAO en 2005. C'est la datte décrite par la norme ONU-CEE DF-08 notamment caractérisée par une teneur en eau de l'ordre de 25%, équilibrée en saccharose et en sucres réducteurs glucose et fructose (sucres totaux 75% en moyenne avec rapport saccharose : sucres réducteurs environ égal à 1.1), de consistance demi-molle et de couleur claire et translucide / Zaid A., 2002/.

Le fruit dattier de cette variété est géométriquement caractérisé par un poids d'environ 12 g, d'une longueur moyenne de 4 à 5 cm et d'un diamètre moyen d'environ 1,8 cm

1.2.2 -Particularités / Sadok .M (1970).]:

La particularité essentielle de cette variété est sa maturité échelonnée sur un même régime, ce qui fait qu'à la récolte, on trouve des dattes à des différents stades de maturité.

De ce fait, la récolte est sous la dépendance des intempéries (pluies, sirocco) et les frais de récolte sont très affectée par ceux du triage. On distingue neuf catégories de tri qui sont les suivants :

- Dattes extra 1^{er} choix généralement exportées

- Dattes marchandes 2^{ème} choix consommés localement et partiellement exportées.

Ces deux catégories ont une teneur en eau entre 25% et 30% en poids.

- Bsers : dattes immatures. Leur pourcentage est variable selon la température du milieu et on peut attendre en année froide jusqu'à 50 % de la récolte.
- Martoubah : fruit presque mur, sa teneur en eau dépasse 25% ce qui le rend sensible à l'altération. Par conséquent, elle nécessite un complément de maturation et un séchage pour la transformer en marchande.
- Frezza ou 'saifi' : datte sèche, sa teneur en eau est de 10 à 16 % et n'ayant pas atteint sa complète maturation. Elle nécessite une réhydratation et un complément de maturation pour la vendre en 'marchande '
- Dattes dite 'caoutchouc 'ou 'mabrouma ': C'est la 3^{éme} qualité réservée aux marchés nationaux. Elle est formées de dattes plus ou moins déformées et plus ou moins élastiques.
- Dattes noires : groupe tout ce qui est détérioré, fermenté, parasité ou décoloré.
- Achef : dattes ratatinées.
- Sich: dattes non fécondées obtenues après un développement parthénocarpique.

1-2-3-<u>Les traitements</u>:

Ils sont nombreux à aspect thermique ou hydro-thermique et parfois chimique. Leur but essentiel est d'augmenter et de transformer les 'bsers', 'frezza' et les 'martoubah' en marchande et extra pour en tirer le maximum de profit. On peut citer essentiellement <u>f Sadok .M (1970)</u>. <u>J</u>:

- La maturation artificielle.
- L'hydratation des frezza (ou saifi).
- Le séchage des 'martoubah 'et des frezza hydratés.
- La conservation.

Les différents traitements de la datte Deglet-Nour rencontrés en pratique depuis la récolte à la commercialisation sont récapitulés sur l'organigramme de la figure (1-2) suivante :

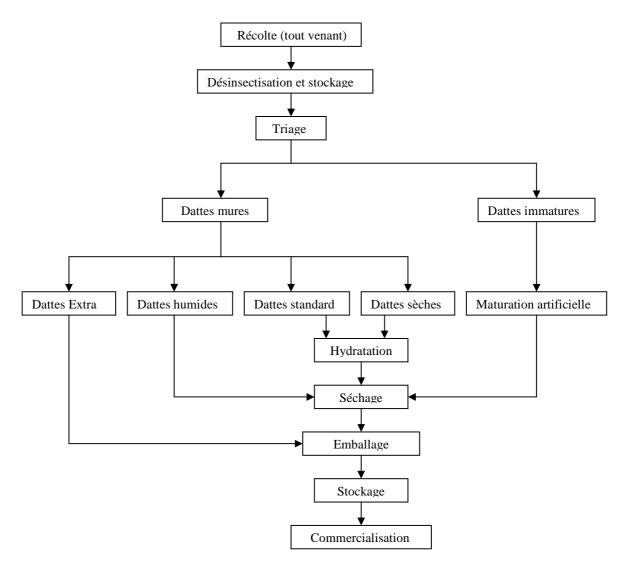


Figure (1-2): Traitements post-récolte de la datte Deglet-Nour

<u>Chapitre II</u>: <u>Etude bibliographique sur les modèles</u> <u>de séchage des produits agroalimentaires</u>

II.1 Introduction

Les premiers travaux scientifiques sur le séchage datent des années 1920, avec tout d'abord Lewis (1921), puis Sherwood qui, en 1929, propose une équation de diffusion avec un coefficient de diffusion constant pour décrire le séchage.

Ce n'est qu'en 1937, dans les travaux de Ceaglske et Hougen, qu'apparaissent le rôle capital joué par le séchage et les limitations de l'écriture purement diffusive.

II.2-Classification des modèles de séchage

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

II.2.1-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.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \vec{\nabla} \Big(D. \vec{\nabla} X \Big) \tag{1.1}$$

Avec:

D : est le coefficient de diffusion massique du produit qui est fonction de l'humidité,

X : humidité du produit

t: temps.

Neumann et Sherwood ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, ainsi l'équation (1.1) devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \tag{1.2}$$

II.2.2-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 ont détaillé plus les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Ils ont permis 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, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker [Mouafki A., (2004)] ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

II.2.3-Les modèles semi- empiriques et empiriques

Ces modèles sont basés essentiellement sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est très limitée pour les raisons que chacun d'eux est spécifique à chaque type de produit ainsi aux conditions expérimentales du séchage, chose qui ne permet pas l'extrapolation au delà des limites de l'expérience. Le tableau ci-dessous résume les modèles mathématiques les plus couramment employés qui ont été développés par différents auteurs pour les courbes de séchage.

N° de modèle	Equation	Appellation
01	XR(t) = exp.(-kt)	Newton
02	$XR(t) = exp.(-kt^n)$	Page
03	$XR(t) = \exp((-k t)^n)$	Page modifié
04	XR(t) = A exp. (-k t)	Henderson et Pabis
05	XR(t) = A exp. (-k t) + B	Logarithmique
06	$XR(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$	Deux termes
07	$XR(t) = 1 + A_1 t + A_2 t^2$	Wang et Singh
08	$t = A_1 \ln (XR) + A_2(\ln(XR))^2$	Thomson

09	$XR(t) = A \exp(-kt) +$ $(1-A) \exp(-kbt)$	Approche diffusion
10	$XR(t) = A \exp(-k_1 t) +$ $(1-A) \exp(-k_2 t)$	Verma
11	$XR(t) = A_1 \exp(-k_1 t) +$ $A_2 \exp(-k_2 t) +$ $A_3 \exp(-k_3 t)$	Henderson et Pabis modifié
12	$XR(t) = A \exp(-k t) +$ $(1-A) \exp(-A k t)$	Deux termes exponentiels
13	$XR(t) = A \exp(-c(t/L^2))$	Equation de diffusion de Fick
14	XR(t) = A exp. (-c (t/L2)n)	Equation II Page modifié
15	$XR(t) = A_1 exp(-k*tn) + A_2 t$	Midilli et autres

<u>Tableau 2-1</u>: Modèles mathématiques développés par différents auteurs pour les courbes de séchage. [Inci Tűrk Toğrul (2003) et Hakan . O (2006)]

II.3-Développement des modèles de séchage des produits agroalimentaires

Des travaux de recherche importants ont été signalés dans la littérature sur la modélisation de séchage en couche mince de différents produits agricoles : (Ross et blanc 1972 ; Wang et Singh 1978 ; Misra et Brooker 1980 ; Syarief et al. 1984; Noomhorn et Verma 1986; Pathk et al. 1991; Muhidong et al. 1992; Hansen et al. 1993).

La plupart des études précédemment rapportées ont été basées sur le séchage en couche mince des produits tels que le maïs, les noix de pécan, le riz, la graine de colza, la luzerne, le kénaf, et le taxol blanc [Bakri H (2000)]. Par contre, les études sur le séchage des dattes sont beaucoup moins disponibles. Pour cela et pour s'aligner avec la logique de notre étude, il est important de citer quelques études relatives aux dattes et à des produits similaires se caractérisant par la structure pulpe-noyau tels que les prunes, les raisins et les abricots.

II.3-1- Etudes sur le séchage des dattes :

<u>Kechaou et al. (1996):</u> Ils ont étudié et modélisé empiriquement la cinétique de séchage des dattes Deglet-Nour tunisiennes. Ils ont déterminé la cinétique de séchage sous des vitesses d'air entre 1 et 3 m/s et des températures allant de 30°C à 70°C. Sur la base de ces expériences, les auteurs ont adapté une courbe de séchage caractéristique donnée par l'expression de l'équation de page.

<u>Bakri H. Hassan et ALI I. Hobani.</u> (2000): Ils ont déterminé expérimentalement des courbes de séchage pour deux catégories de dattes récoltées en Arabie Saoudite (Sukkari et Sakie) à trois températures différentes 70, 80, et 90 C. Parmi trois modèles de séchage qui ont été évalués (modèle exponentiel, équation de page, approximation du modèle de diffusion), les auteurs ont adopté un modèle mathématique selon l'équation de page pour décrire au mieux le séchage en couche mince des deux variétés de dattes étudiées.

<u>Kechaou.</u> N et Mâalej M (2000) Ils ont étudié les caractéristiques d'équation de séchage des dattes Deglet Nour Tunisiennes humides (ou humidifiées artificiellement). Le banc d'essais utilisé pour établir les courbes de séchage fonctionnait avec des températures dans la gamme de 30 à 70°C, des vitesses de courant d'air de 0,95 à 2 ,7 m/s et d'humidité relative de 11 à 47%.

La température de bulbe sèche et la teneur en eau initiale des échantillons avaient un effet majeur sur le comportement de séchage, cependant les vitesses d'air avaient un effet moins significatif. Seulement la décroissance du comportement de séchage a été observée. Le modèle de Guggenheim, Anderson et Poer est démontré être satisfaisant pour décrire les courbes obtenues à 30 ,40 ,50 et 60 °C.

Selon les auteurs, les résultats de ce travail peuvent être utilisés pour développer une méthodologie de travail pour un séchoir opérant à des températures inférieures à 70 °C.

Boubekri A. et al. (2007): Ils ont étudié le séchage solaire du fruit dattier simulé comme séchage convectif à des températures variables par pas constants.

Cette étude du séchage solaire indirect du fruit dattier de variété Deglet-Nour a été faite partant de l'hypothèse de variation de température de l'air par paliers constants. Considérant neuf heures de séchage par jour, une cinétique globale a été simulée numériquement en utilisant des équations modèles, et est construite par tranches relativement au palier de température correspondant. Les résultats obtenus, par confrontation à la littérature disponible, reflètent le comportement au séchage sous conditions variables avec discontinuité de l'opération par la nuit. Il a été mis en évidence que l'humidité normalisée pour le commerce du produit (26% b.h) était atteinte en moins d'une journée de séchage et que le cycle de température journalière prédominé par le palier 60°C mènerait à un produit final dans un état de qualité optimal.

II.3.2-<u>Etudes sur la modélisation des cinétiques de séchage d'autres</u> produits à structure pulpe-noyau

Etant donnée la rareté des études de séchage sur les dattes et afin d'enrichir notre étude, nous allons examiner quelques travaux de modélisation disponibles dans la littérature et traitant des produits structuralement semblables, c'est-à-dire, ceux constitués par une pulpe, un noyau et éventuellement à peau faiblement perméable.

II.3.2.1- Les abricots:

<u>Ínci Tűrk Toğrul et al . (2003):</u> Ils ont étudié la modélisation de la cinétique de séchage de l'abricot.

Le comportement du séchage des abricots simples, accrochées dans le sens d'écoulement d'air chaud dans une chambre de séchage, a été étudié. Dans les expériences, l'air a été passé par la chambre à une série de débits (0.2, 0.5, 1.0 et 1.5 m/s) et températures (50, 60, 70 et 80 °C). Afin d'obtenir des données

de séchage, les changements de la masse et des températures intérieures des abricots ont été enregistrés aussi bien que les propriétés d'air de séchage. Les variations des taux de séchage en fonction du temps et la teneur en eau ont été employées pour examiner quatorze modèles différents de séchage en monocouche. Les modèles examinés sont donnés dans le tableau n° 2-1 et un nouveau modèle a été développé. Parmi tous les modèles, le modèle logarithmique a été trouvé le meilleur pour expliquer le comportement de séchage des abricots. Les effets des débits et des températures d'air de séchage sur les constantes et les coefficients des modèles ont été également étudiés par analyse de régression multiple. Il a été constaté que le nouveau modèle pourrait représenter la cinétique de séchage d'abricot simple à une précision de 99.9 %. Le transfert d'humidité à partir des abricots se produisant au cours de la période de décroissante du séchage a été caractérisé par la détermination expérimentale du coefficient de diffusion apparent dans l'air. Il a été trouvé, par analyse de régression multiple, que les coefficients de diffusion pourraient être exprimés à un précision de 97.3%, selon les débits d'air et les températures interne de l'abricot simple.

<u>Oğuz Bozkır (2005):</u> Il a étudié le séchage en couche mince et la modélisation mathématique pour les abricots secs lavés.

Un modèle mathématique a été développé pour le séchage des abricots secs lavés. Les expériences ont été effectuées à des températures de l'air du 35 °C, 40 °C, 45 °C, et 50 °C. L'air de séchage étant à des vitesses de 1 m/s, 1.2 m/s, 1.4 m/s, 1.6 m/s, 1.8 m/s, et 2 m/s. Les données obtenues à partir des expériences ont été analysées par l'équation de séchage de Page. Les comparaisons et les corrélations des résultats indiquent que la validation du modèle établi est plutôt raisonnable.

II.3.2. 2- Les prunes :

<u>Hakan Okyay</u> et al. (2006) ont étudié le modèle de séchage en couche mince pour les prunes traitées et non traitées.

Dans cette étude, un séchoir expérimental a été utilisé pour le séchage en couche mince des prunes traitées et non traitées, et les taux d'humidité en fonction du temps de séchage ont été comparés pour 14 modèles mathématiques différents (modèles montrés sur le tableau n° 2-1 sauf le modèle de Verma). L'effet de la température de l'air de séchage et la vitesse sur les coefficients du modèle plus adapté de rapport d'humidité ont été déterminés par la méthode de régression multiple. La racine carrée d'erreur quadratique moyenne (REQM) et la Chi-2. (x²) ont été employées pour la détermination du meilleur modèle approprié. Le modèle de Midilli a été trouvé meilleur pour expliquer le comportement de séchage des prunes traitées et non traitées. Il est possible de prévoir la teneur en eau du produit avec un modèle généralisé montrant l'effet de la température de l'air et de la vitesse de séchage avec la gamme de 60 - 80 °C et 1.0 - 3.0 m/s. La diffusivité efficace s'est avérée entre 1.197x10⁻⁷ et 4.551x10⁻⁷ m²/s pour les prunes traitées et entre 1.179x10⁻⁹ et 6.671x10⁻⁹ m²/s pour les prunes non traitées.

R.K. Goyal a. *et al.* (2007) ont étudié la modélisation mathématique de la cinétique de séchage en couche mince de la prune dans un séchoir tunnel.

La cinétique de séchage de la prune (avec certains prétraitements) dans un séchoir tunnel a été étudiée à des températures de l'air 55, 60 et 65 °C. Le séchage des tranches de prune s'est produit dans la période de décroissance. Il a été constaté que les tranches de prune traitées ont séché plus rapidement. Six modèles de séchage en couche mince ont été adaptés aux données expérimentales de taux d'humidité. Parmi les modèles mathématiques étudiées, le modèle logarithmique a décrit d'une manière satisfaisante le comportement au séchage des tranches de prune avec des valeurs du coefficient de détermination (R²) élevées. La diffusivité efficace (Deff) de la

prune a augmenté à mesure que la température de l'air de séchage augmentait. Les valeurs de D_{eff} étaient plus hautes pour les échantillons traités.

Kamil Sacilik et al. (2006) ont étudié le séchage des prunes dans un séchoir convectif à air chaud; la vitesse de l'air de séchage est de 0.8 m/s et la température de l'air est dans la gamme de 50-70 C. La cinétique de séchage a été décrite, à partir des échantillons d'essai, en appliquant le modèle de diffusion de Fick et la diffusivité efficace a été calculée. La dépendance de la température et de la diffusivité efficace a été décrite par le rapport type d'Arrhenius. Les données expérimentales de séchage de la prune ont été employées pour adapter le meilleur modèle parmi les modèles de page, logarithmique et l'approximation de la diffusion. Les évaluations par le modèle de deux- termes étaient en bon accord avec les données expérimentales obtenues. Le coefficient de détermination (R²) a été employé comme critère primaire de comparaison pour choisir le meilleur modèle pour adapter les quatre modèles aux données expérimentales. En outre, les valeurs plus basses de la déviation relative moyenne pour cent EMD, racine carrée d'erreur quadratique moyenne (REQM) et le Chi-2. (x²) ont été choisies comme critères de comparaison pour la qualité de l'ajustement des données expérimentales obtenues.

Récapitulation

A la fin de ces citations bibliographique on trouve intéressant de récapituler, dans le tableau suivant, les informations extraites sur (paragraphes (II.2-1), (II.2-2)) sur la modélisation des cinétiques de séchage des dattes et des produits structuralement semblables. :

Produit d`étude	Auteur	N• modèle utilises	('ritères de choir	
	Kechaou et al. (1996), (2000)	1,2 et 4 du tableau n° 2-1	- Le cœfficient de détermination le plus élevé	approprié L'équation de page
Les dattes	BAKRI H. HASSAN et ALI I. HOBANI. (2000)	Les modèles 1,2 du tableau n° 2-1	La recherchebibliographiqueL`interprétation des figures	L'équation de page XR (t) = exp (-kt ⁿ)
Boubekri A, Benmoussa H et Mennouche Curv		Quelque modèle du CurveExpert 1.3.	-L'erreur standard minimale - Le cœfficient du corrélation le plus élevé	Logarithmique $XR(t) = A_1$ $exp(-kt) + A_2$
Les abricots	Ínci Tűrk Toğrul et al. (2003)	Les modèles de 01 à 14 indiqués dans le tableau n° 2-1	- Chi-2. (x²) minimale - REQM minimale - E S M l'erreur systématique moyenne (M B E) minimale - Le cœfficient de corrélation le plus élevé.	Logarithmique $XR(t) = A_1$ $exp(-kt) + A_2$
	Oğuz Bozkır (2005)	L'équation de page	- Comparaison entre les valeurs de l`exposons de séchage expérimentale et calculé avec le cœfficient du corrélation	L'équation de page XR (t) = exp (-kt ⁿ)
Les prunes	Hakan Les moueles		- Chi-2. (x²) minimale - REQM minimale - (E-F) l'efficacité de modélisation le plus élevé	Midilli et autres $XR(t) = A_1 \exp(-kt^n) + A_2 t$

	R.K. Goyal a. et al. (2007)	1,2 et 3 et 4 et 7 du tableau n° 2-1	- Chi-2. (x²) minimale - REQM minimale - Le coefficient du corrélation le plus élevé	Logarithmique $XR(t) = A_1$ $exp(-kt) + A_2$
Les prunes	Kamil Sacilik a, Ahmet Konuralp Elicin a, Guran Unal b (2006)	2,4 et 5 et 6 du tableau n° 2-1	- Chi-2. (x²) minimale - REQM minimale - EMD la déviation relative moyenne pour cent minimale - Le coefficient de détermination (R²) le plus élevé	Deux termes $XR(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$

<u>Tableau 2-2</u>: Résumé des modélisations de séchage des dattes et des produits à structure pulpe-noyau

D'après ce tableau on peut ressortir que parmi les modèles les plus couramment utilisés pour le séchage de ce genre de produits et qu'on peut juger comme les plus appropriés, du moins pour une première sélection, sont les suivants :

- 1)- Equation de Page
- 2) Modèle Logarithmique
- 3)- Modèle de Midilli et autres
- 4)- Modèle à Deux termes

<u>Chapitre III : Modélisation des cinétiques</u> <u>de séchage de la datte</u>

III .1- Objectif et logique de raisonnement :

Dans ce chapitre on s'intéresse à exploiter les résultats expérimentaux des courbes de séchage X(t) de la datte algérienne (variété Deglet-Nour préalablement hydratée) obtenues sur des séchoirs convectifs à air chaud à vitesse d'air constante de 1.5 m/s à cinq températures différentes 35, 45, et 60, 75 et 85 °C et différentes teneurs en eau initiales X₀ comme montrées sur le tableau 3-2. C'est sur la base de ces données qu'on essayera de rechercher un modèle mathématique approprié pouvant décrire le comportement physique lors du séchage de la datte et ce parmi les quatre modèles de séchage issus de l'étude bibliographique du chapitre précédent (cf. tableau 2-2). Il s'agit donc de l'équation de Page, du modèle de Midilli et autres, du modèle logarithmique et du modèle à deux termes (cf. tableau 3-1).

Le problème posé est de trouver les valeurs optimales des paramètres des différents modèles à chaque température, déterminer le modèle approprié utilisant une analyse de régression.

N	Nom du modèle	Expression du modèle
01	l'équation de page	$XR(t) = exp(-kt^n)$
02	Logarithmique	$XR(t) = A_1 \exp(-k t) + A_2$
03	Midilli et autres	$XR(t) = A_1 exp. (-k t^n) + A_2 t$
04	deux termes	$XR(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$

<u>Tableau 3-1:</u> Modèles appliqués à la description des courbes de séchage des dattes.

Avec XR représentant la teneur en eau réduite donnée par la relation suivante:

$$XR(t) = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$
 (3-1)

Où,

- X (t) dénote la teneur en eau instantanée en kg eau/ kg de matière sèche

- X₀ dénote la teneur en eau initiale en kg eau/ kg de matière sèche
- Xeq représente la teneur en eau d'équilibre calculée selon Kechaou et Maalej (1998) par la relation donnée ci-dessous :

$$\frac{X_{eq}}{X_{m}} = \frac{C.K.HR}{(1 - K.HR).(1 - K.HR + C.K.HR)}$$
(3-2)

Avec,

C=1.514 e-09 exp [61089 / R.T]

 $K = 72.765 \exp \left[-11710 / R.T\right]$

Xm=1.067 e-09 exp [47614 / R.T]

Où R [J/mol.K] représente la constante des gaz parfaits, T [K] la température absolue et HR l'humidité relative de l'air.

Les calculs des XR (t) à partir des X (t) sont effectués par Excel.

III .2- Source des données

Les données exploitées dans cette partie de l'étude sont tirées des résultats déterminés expérimentalement par Boubekri A.et al. (2007;a) pour des cinétiques de séchage des dattes Deglet-Nour effectuées sur un séchoir pilote installé au laboratoire de séchage du département de génie des procédés alimentaires (Food process engineering) de AgroparisTech (ex-ENSIA) Massy (France).

Il est utile de noter ici que les échantillons séchés, dans les expériences exploitées, représentent des dattes triées et classées comme catégorie naturellement sèche (dessèchement à l'arbre par climat chaud) qui ont été préalablement réhydratées par trempage à l'eau chaude ultra pure permettant ainsi d'assurer une teneur en eau initiale au séchage de l'ordre de 0.5 kg d'eau/kg de matière sèche. Les conditions opératoires des essais utilisés sont récapitulées dans le tableau (3-2) ci-dessous.

Essai	Température	Température	Erreur	HR	Erreur	X0	Vitesse
N ullet	Imposée •C	moyenne	Standard	moy	Standard	kg d`eau /kg Ms	d'air
		mesurée •C					m /s
01	35	37.26	0.15	0.11	0.01	0.563282	1.5
02	45	46.96	0.49	0.08	0.01	0.452787	1.5
03	60	61.48	0.73	0.02	0.00	0.490737	1.5
04	75	75.51	0.72	0.01	0.00	0.482896	1.5
05	85	85.26	1.83	0.00	0.00	0.494686	1.5

<u>Tableau 3-2</u>: Conditions expérimentales des cinétiques de séchage exploitées.

III .3- Procédure d'analyse des données

La procédure d'analyse des données qu'on a suivi consiste à calculer les valeurs des paramètres du modèle examiné, les valeurs des coefficients de corrélation et l'erreur standard appliqués aux différentes températures de l'air (cf. tableau 3-2). Ensuite on tracera les figures représentant les points mesurés et l'estimation de chaque modèle à différentes températures suivi, à chaque fois d'une analyse de la dispersion des résidus.

Les calculs d'analyse et les représentations graphiques correspondantes (figures d'analyse des résidus, figures représentatives) ont été effectués à l'aide du logiciel CurveExpert 1.3 utilisant une technique de régression non linéaire.

La méthode utilisée est dite de Levenberg-Marquardt, laquelle est détaillée en annexe-3, pour plus d'informations. Cette même logique d'analyse a été utilisée par *Lamharrar A. et al.* (2005)

III .3.1- Analyse de régression

III .3.1.1-<u>Définition</u>: 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 .3.1.2- Erreur standard d'évaluation :

L'erreur standard sera strictement positive, avec une plus petite erreur standard qui représente la meilleure forme de la courbe .Elle est définie comme suit :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}}}$$
(3-3)

Où y=f(xi) dénote la valeur calculée par le modèle de régression, yi dénote les données mesurées, et le nparam est le nombre de paramètres dans le modèle particulier (afin que le dénominateur soit le nombre de degrés de liberté). L'erreur standard d'évaluation mesure l'étendue des données mesurées autour de la courbe de la régression. Pour une meilleure qualité du modèle, l'erreur standard doit s'approcher de zéro.

III .3.1.3- <u>Le coefficient de corrélation</u>

Une autre mesure de la performance de la forme de la courbe est le coefficient de corrélation. Pour expliquer la signification de cette mesure, nous devons revenir aux données pointe et définir la déviation standard qui mesure l'étendue des données autour de la moyenne :

$$S_t = \sum_{i=1}^{n_{point}} (\bar{y} - yi)^2$$
 (3-4)

Où la moyenne des données pointe y (y bar) est donné simplement par :

$$\overline{y} = \frac{1}{n_{point}} \sum_{i-1}^{n_{point}} y_i$$
 (3-5)

La quantité St considère l'étendue autour d'une ligne constante (la moyenne) par opposition à l'étendue autour du modèle du régression. C'est l'incertitude de la variable dépendante avant régression. Nous définissons aussi la déviation de la courbe appropriée comme :

$$S_r = \sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2$$
 (3-6)

Notez la ressemblance de cette expression à l'erreur standard de l'évaluation donnée au-dessus; cette quantité mesure également l'étendue des points autour de la fonction appropriée. Donc, l'amélioration (ou réduction de l'erreur) à décrire les données par un modèle de régression peut être mesurée en soustrayant les deux quantités parce que la magnitude de la quantité est dépendante sur l'échelle des données, cette différence est normalisée pour céder :

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_c}} \tag{3-7}$$

où r est défini comme le coefficient de la corrélation. Comme le modèle de régression non linéaire décrit mieux les données, le coefficient de la corrélation approchera d'unité.

III .3.1.4- Fonction Chi-2: Se prononce "Qui-deux".

Ce terme se rencontre partout en modélisation de données. Il recouvre plusieurs réalités, étroitement liées, mais différentes. Il est définie comme suit :

$$\chi^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{po \text{ int}}} (y_{i} - f(x_{i}))^{2}}{n_{ponts} - n_{param}}$$
 (3-8)

III .3.2- Analyse des résidus:

Les résidus ou " erreurs observées " sont définis comme étant les différences entre les valeurs observées et les valeurs estimées par un modèle de régression, ils ont la particularité de représenter la partie non

expliquée par l'équation de régression. On les note communément comme suit :

$$r\acute{e}sidu = ei = yi - f(xi)$$
 (3-9)

Où yi est la valeur mesurée à xi, et f(xi) est la valeur prédite à xi.

L'analyse des résidus a pour objectif de tester la validité d'un modèle de régression. Elle permet de déceler les défaillances d'un modèle.

Ces distances sont montrées comme barres ou points sur l'intrigue résiduelle; les magnitudes des points des données sont remplacées simplement par le résidu défini au-dessus. Les résidus peuvent fournir une indication de la performance d'un modèle particulier.

Du point de vue optimale, les résidus devraient exposer une dispersion aléatoire autour de zéro qui indique que les points des données sont distribués aléatoirement autour de la courbe.

Donc si le modèle représente bien le phénomène étudié, on doit observer un bruit centré de dispersion aléatoire.

III .4 <u>Détermination du modèle approprié :</u>

Le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de séchage de la datte Deglet-Nour, dans notre présente étude, est basé sur la confrontation des courbes estimées par chacun des quatre modèles à celles expérimentales avec analyse des résidus en appliquant aux différentes températures. On a procédé d'autre part à l'analyse statistique utilisant les critères suivants :

- Une erreur standard de l'évaluation (S) minimale.
- Un coefficient de corrélation (r) élevé. Une fonction Chi-2 minimale.

III .4.1- Résultats et discussion :

III .4.1.1- Paramètres statistiques :

La modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de la datte est présentée numériquement (valeurs des paramètres, critères statistiques pour chaque modèle) dans les quatre tableaux (3-3), (3-4),(3-5) et (3-6) suivants:

Modèle N°	Essai N°	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	01	35 ℃	n = 0.8166625 k = 0.0006939	0.0063651	0.0059138	0.9990948
	02	45 ℃	n = 0.8138573 k = 0.0011637	0.0034380	0.0051426	0.9993616
	03	60 ℃	n = 0.6031755 k = 0.0085334	0.0747232	0.0177190	0.9933040
	04	75 ℃	n = 0.5750129 k = 0.0158555	0.0306458	0.0179607	0.9942866
	05	85 ℃	n = 0.5212275 k = 0.0262042	0.0248927	0.0182181	0.9944400

<u>Tableau 3-3</u>: Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page

Pour l'équation de Page, les valeurs d'erreur standard (S) sont de 1'ordre de 1/1000 à 35, 45 °C et de 1'ordre de 1/100 à 60, 75 et 85 °C. La même remarque est observée pour le Chi-carrée. Les valeurs du coefficient de corrélation (r)sont supérieures à 0,999pour 35°C et 45 °C et sont entre 0,993 et 0,994 à 60, 75 et 85 °C.

Modèle	Essai	T [°C]	Paramètres	Chi	Erreur	coeff. de
N °	Ν°	I [C]	de modèle	carrée	Standard (S)	Corrélation (r)
	01	35 ℃	$A_1 = 0.5757896$ k = 0.00035933 $A_2 = 0.4208226$	0.0042378	0.0048387	0.9993974
	02	45 ℃	$A_1 = 0.6075555$ K = 0.0005923 $A_2 = 0.3836107$	0.0010415	0.0028414	0.9998067
02	03	60 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.5635410$ $\mathbf{K} = 0.0013740$ $\mathbf{A_2} = 0.4108082$	0.0100447	0. 0065100	0.9991026
	04	75 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.5873113$ $\mathbf{K} = 0.0025439$ $\mathbf{A_2} = 0.3783573$	0.0144761	0.0124096	0.997305 33
	05	85 ℃	$A_1 = 0.5782128$ K = 0.0030369 $A_2 = 0.3546533$	0.0248927	0.0182181	0.9944400

<u>Tableau 3-4:</u> Paramètres et critères statistiques selon le modèle Logarithmique

Dans le cas du modèle Logarithmique les valeurs de l'erreur standard (S) sont de l'ordre de 1/1000 à 35, 45 et 60 °C et de l'ordre de 1/100 à 75 et 85 °C. Avec les mêmes constatations déjà signalées avec le modèle de Page pour

le Chi-carrée. Les valeurs de coefficient de corrélation (r) restent dans l'ordre de 0,999 à 35, 45 et 60 ° C et aux valeurs de 0,997 et 0,994 pour 75 et 85 °C.

Modèle N°	Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
	01	35 ℃	A_1 = 1.0140326 K = 0.0007980 N = 0.8194568 A_2 = 1.3958099e-005	0.0019049	0.0032528	0.9997292
03	02	45 ℃	$A_1 = 0.9980270$ K = 0.0006723 n = 0.9244965 $A_2 = 5.0726301e-005$	0.0006896	0.0023211	0.9998720
	03	60 °C	A_1 = 1.0246192 K = 0.0043625 n= 0.74619282 A_2 = 7.7662953e-005	0.0026397	0.0033444	0.9997642
	04	75 ℃	A_1 = 1.0390744 K = 0.0120566 n = 0.6583659 A_2 = 9.4797311e-005	0.0031542	0.0058237	0.9994135
	05	85 ℃	A_1 = 1.0390764 K = 0.0120566 n = 0.6583608 A_2 = 9.4795506e-005	0.0031541	0.0058237	0.9994135

<u>Tableau 3-5</u>: Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Midilli et al.

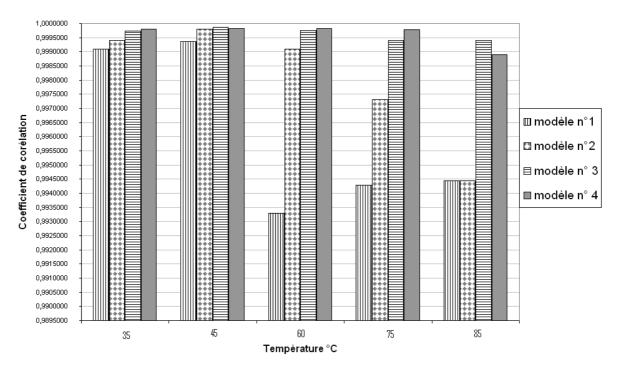
Pour le modèle Midilli et al. les valeurs de l'erreur standard (S) sont de l'ordre de 1/1000 à 35, 45, 60,75 et 85 ° C et la même remarque pour le Chi-carrée sauf à 45°C où leur valeur est de l'ordre de 1/10000. Les valeurs du coefficient de corrélation (r) restent supérieures à 0,999 pour les cinq températures.

Modèle N°	Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
04	01	35 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.8771908$ $\mathbf{k_1} = 0.0001173$ $\mathbf{A_2} = 0.1292621$ $\mathbf{K_2} = 0.0012130$	0.0014302	0.0028188	0.9997967
	02	45 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.5965621$ $\mathbf{k_1} = 0.0001004$ $\mathbf{A_2} = 0.3963464$ $\mathbf{K_2} = 0.0007878$	0.0009799	0.0027657	0.9998183
	03	60 °C	$\mathbf{A_1} = 0.4221895$ $\mathbf{k_1} = 0.0020239$ $\mathbf{A_2} = 0.5707012$ $\mathbf{K_2} = 0.0001309$	0.0018789	0.0028214	0.9998322
	04	75 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.6055541$ $\mathbf{k_1} = 0.0003383$ $\mathbf{A_2} = 0.3892891$ $\mathbf{K_2} = 0.0046894$	0.0011296	0.0034850	0.9997900
	05	85 ℃	$\mathbf{A_1} = 0.6025850$ $\mathbf{k_1} = 0.0004279$ $\mathbf{A_2} = 0.3762320$ $\mathbf{K_2} = 0.0067392$	0.0049701	0.0081952	0.9988924

<u>Tableau 3-6</u>: Paramètres et critères statistiques selon le modèle à deux termes

Pour le modèle à deux termes, les valeurs d'erreur standard (S) sont de l'ordre de 1/1000 à 35 , 45 , 60 et 75 ° C mais à 85 °C elles sont plutôt vers l'ordre de 1/100 (0.0081952) et la même remarque pour le Chi-carrée à 35 , 60 , 75 et 85 ° C, seulement à 45 ° C sa valeur est près de l'ordre de 1/1000. Les valeurs du coefficient de corrélation (r) restent toujours supérieures à 0,999 pour les cinq températures.

D'après la lecture globale des tableaux 3-3, 3-4, 3-5 et 3-6, du point de vue comparatif, on a remarqué que les valeurs des trois critères statistiques utilisés paraissent très proches, ce qui rend difficile de bien distinguer entre les quatre modèles. Pour cela et afin de permettre une comparaison plus claire on a choisi la représentation graphique sous forme d'histogrammes comparatifs des valeurs de chacun des critères statistiques pour les cinq températures utilisées en application aux quatre modèles examinés.



<u>Figure 3-1</u>: Evaluation des coefficients de corrélations à chaque température pour les quatre modèles

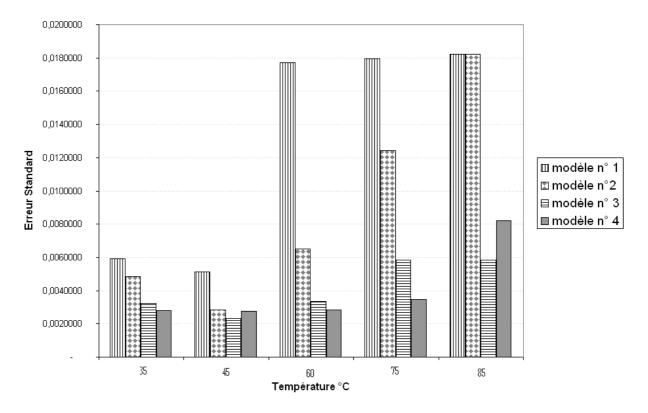


Figure 3-2 : Evaluation des erreurs standard à chaque température pour les quatre modèles

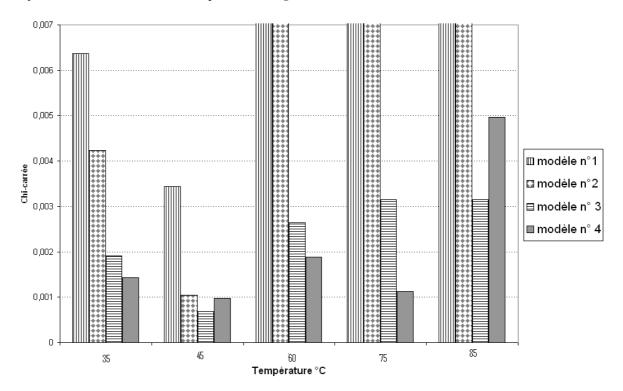


Figure 3-3 : Evaluation des Chi carrée à chaque température pour les quatre modèles

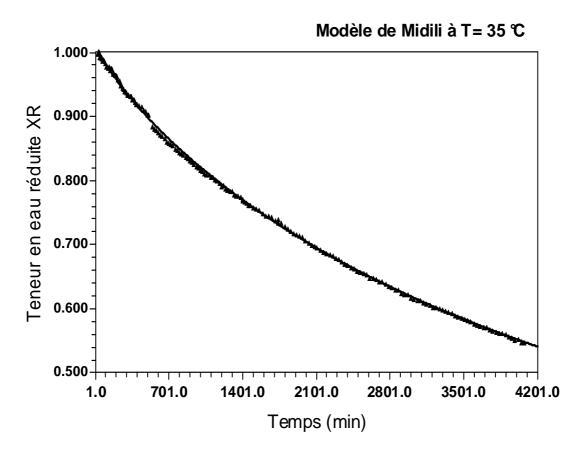
D'après les figures 3-1, 3-2 et 3-3 on peut ressortir l'ensemble des observations suivantes :

- Les valeurs les plus élevées des coefficients de corrélations correspondent au modèle à deux termes notamment à 35, 60 et 75 °C. Elles correspondent aussi bien au modèle de Midilli et al. notamment à 45 et 85 °C.
- Les valeurs minimales des erreurs standards de même que la fonction chicarrée minimale correspondent au modèle à deux termes à 35 , 60 , 75 °C et au modèle Midilli et al. notamment à 45, 85 °C.

Vues ces observations et afin de raffiner notre choix, on va exposer dans la suite des comparaisons par représentation graphique et analyse des résidus portant uniquement sur les deux derniers modèles à savoir modèle de Midilli et modèle à deux termes.

(Les graphiques relatifs aux autres modèles sont exposés dans l'annexe n° 03 en fin de ce mémoire.)

III -4-1-2- Figures représentatives et interprétation :



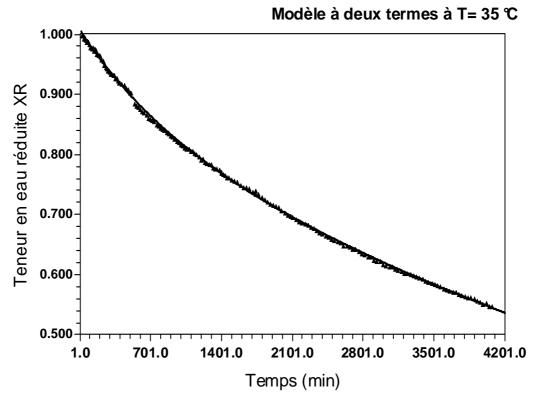
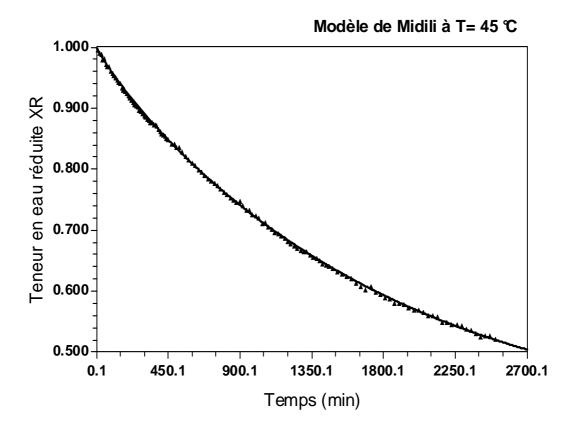
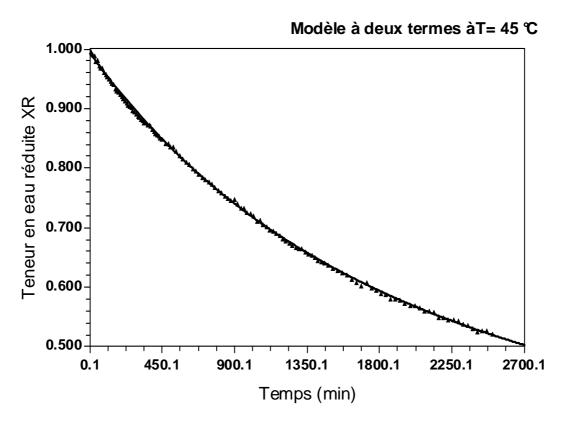
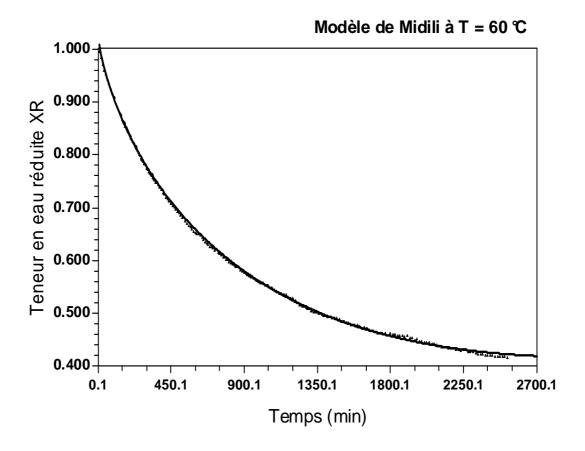


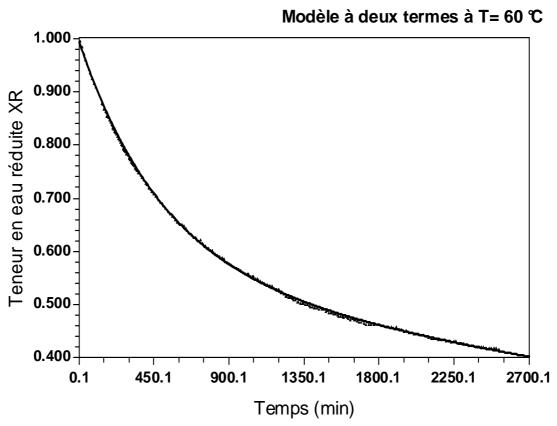
Figure 3-4: L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés et l'estimation des modèles de Midilli, à deux termes à T=35 °C



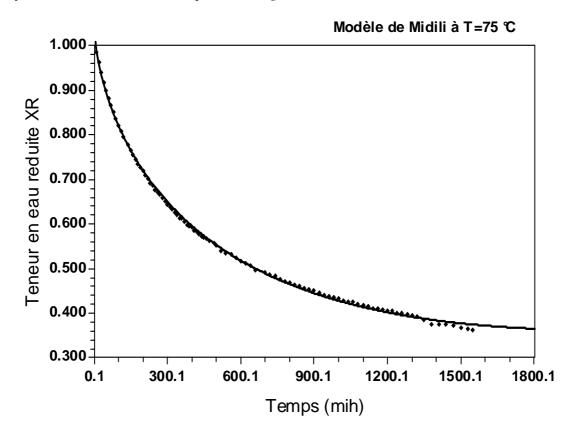


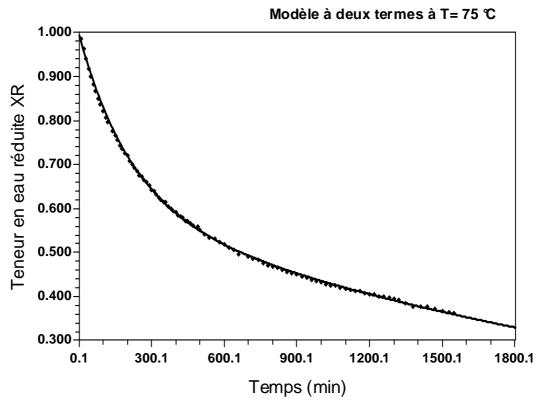
<u>Figure 3-5:</u> L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés et l'estimation des modèles à T=45 °C



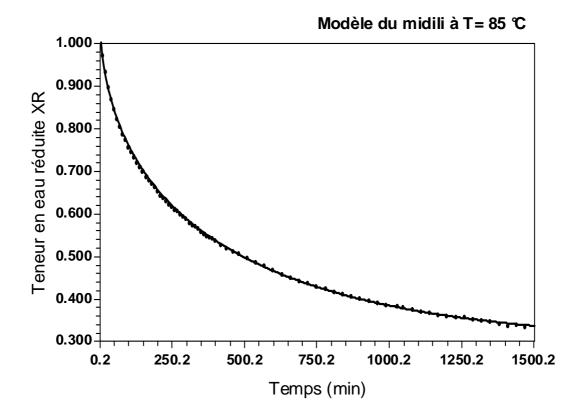


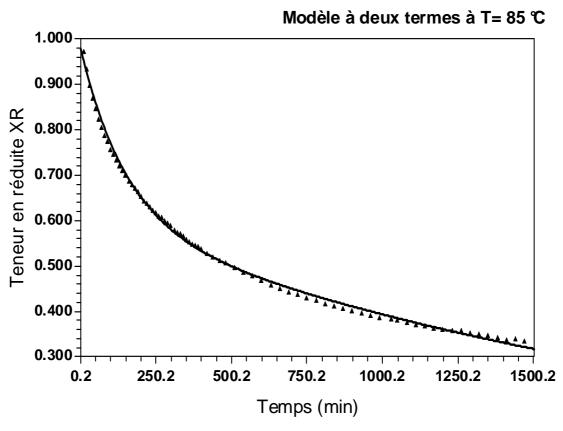
<u>Figure 3-6:</u> L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés et l'estimation des modèles à T=60 °C





<u>Figure 3-7:</u> L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés et l'estimation des modèles à T=75 °C





<u>Figure 3-8:</u> L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés et l'estimation des modèles à T=85 °C

L'interprétation des figures ci-dessus représentant l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps (pour les cinq températures appliquées)nous a conduit aux constatations suivantes :

- Les courbes prédites par le modèle de Midilli et al. sont presque totalement confondues avec les courbes expérimentales à 35 et 45 °C mais pour 60 et 75 °C celles-ci sont légèrement éloignées, en comparaison avec le modèle à deux termes.
- Les courbes prédites par le modèle à deux termes sont pratiquement confondues avec les courbes expérimentales pour les températures 35,45,60 et 75 °C.

III -4-1-3- Analyse des résidus:

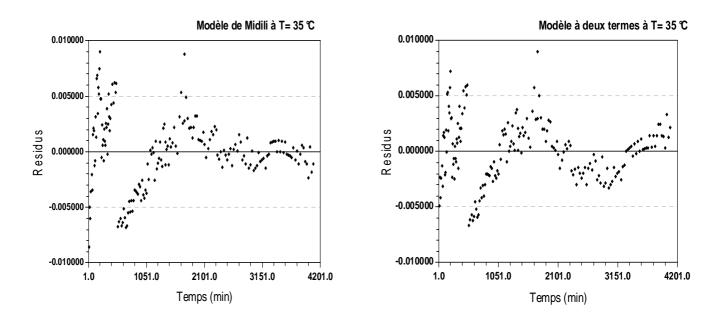


Figure 3-9: résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 35 °C

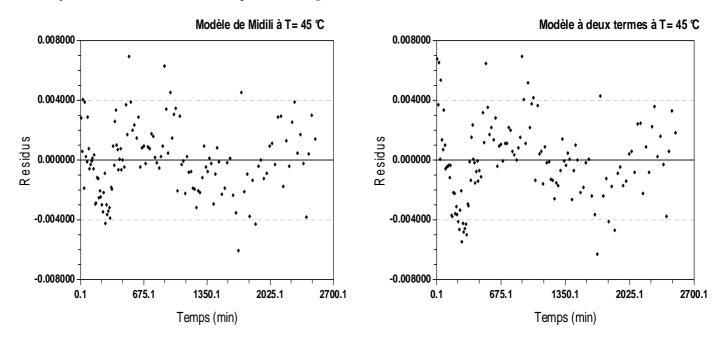


Figure 3-10: résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 45 °C

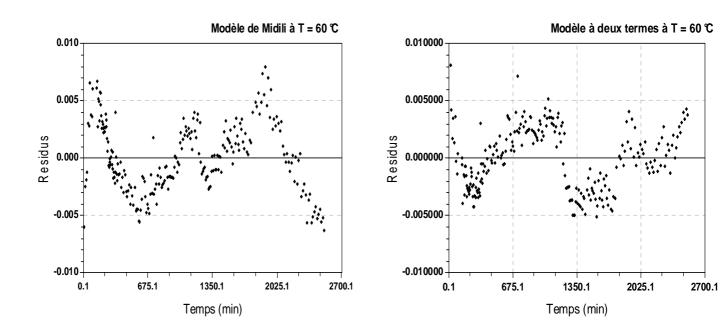


Figure 3-11: résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 60 °C

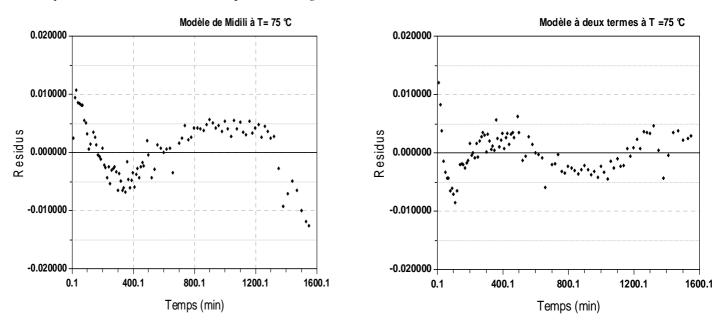


Figure 3-12: résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 75 °C

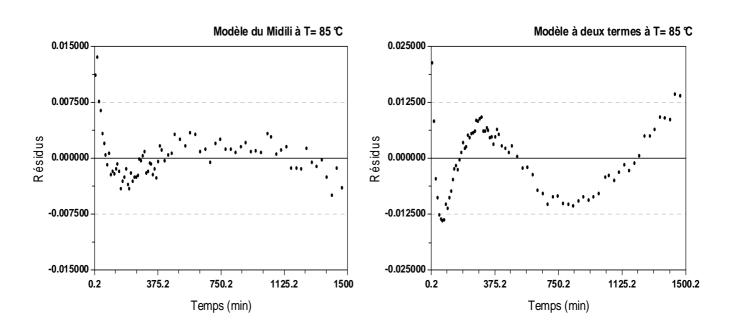


Figure 3-13: résidus réalisés sur les modèles de Midilli, à deux termes à 85 °C

Interprétation : En examinant cas par cas les figures (3-9), (3-10), (3-11) et (3-12) il est possible de noter les observations suivantes :

. - Les valeurs des résidus correspondant au modèle de Midili et au modèle à deux termes sont faibles avec une répartition qui semble relativement aléatoire.

C'est sur la base de cette analyse qu'on peut affirmer que ces deux modèles représentent bien le phénomène physique étudié. Mais si on fait une comparaison très précise entre les valeurs des résidus correspondant à ces deux modèles on remarque que les résidus correspondant au modèle à deux termes sont plus centrés par rapport à ceux du modèle de Midili à 35, 60 et 75 °C.

Enfin si on rassemble les résultats d'analyse obtenus le long de ce chapitre on peut adopter le choix de l'équation du modèle à deux termes comme étant la plus appropriée pour décrire le séchage en couche mince de la variété de datte Deglet-Nour dans une plage de températures de35,45, 60 et 75 °C. Il est aussi utile de noter que la température de séchage assez élevée de 85°C n'a pas donné de résultats satisfaisants lors de la modélisation pour ce modèle. Cette remarque fait limiter la plage de validité en température du modèle choisi, mais ne pose pas de problème réel dans la pratique de séchage des dattes. En effet, les sources bibliographiques disponibles [Belarbi A, 2001, Boubekri A., (2007,a) et Zaid A., 2002.] montrent le problème de noircissement du fruit lors du séchage au-delà de 70°C.

Enfin l'expression de l'équation du modèle approprié pour décrire le séchage en couche mince de la datte Deglet-Nour de la région Oued Righ dans le sud-est algérien est donnée par :

$$XR(t) = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t)$$
 (3-10)

Les valeurs des paramètres de cette équation pour chacune des températures de séchage appliquées sont détaillés dans le tableau 3-6 présenté au début de ce paragraphe.

<u>Chapitre IV- Développement d'une équation générale</u> de séchage en couche mince de la datte Deglet-Nour

IV.1-Objectif:

Dans ce chapitre on va exploiter les résultats du chapitre précédent pour essayer de définir une équation générale valable pour le séchage en couche mince de la variété de datte Deglet-Nour et ce sur la base du modèle à deux termes précédemment défini comme modèle approprié pour notre produit d'étude. Cette partie du travail nous permettra, par la suite, la construction d'une cinétique de séchage par partie qui simulerait le séchage solaire de ce produit. Pour cela nous allons suivre la même procédure de résonnement utilisée dans le troisième chapitre qui se base sur les critères d'analyse exposés dans le paragraphe (§ III -4-1)

IV .2- Rappel du modèle choisi

Il s'agit du modèle à deux termes donné par l'expression ci-dessous :

$$XR(t) = A_1 exp(-k_1t) + A_2 exp(-k_2t)$$
 (4-1)

Pour établir une équation générale, on a besoin d'exprimer les paramètres A_1,A_2,K_1 et K_2 (tableau **4-1**) en fonction de la température de l'air de séchage étant donné que les courbes expérimentales ont été établies [Boubekri A., (2007,a)] sous vitesse constante (V=1,5 m/ s) et à humidité relative ambiante non contrôlée.

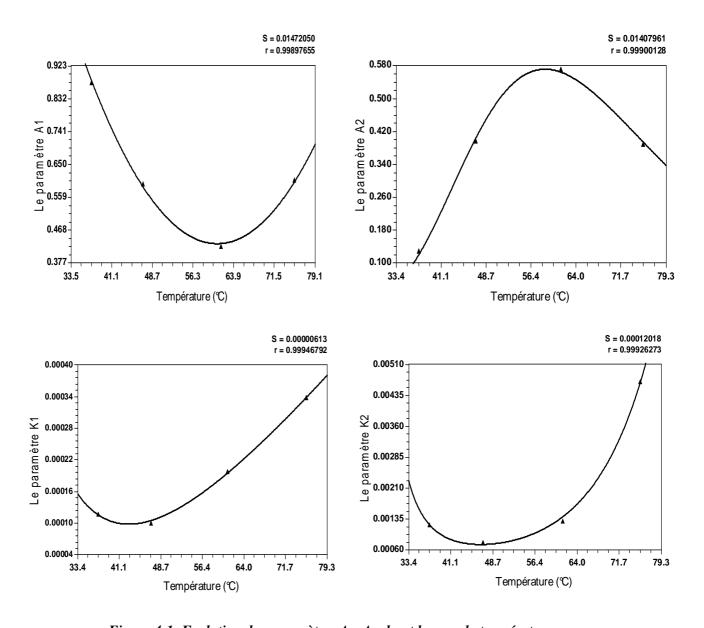
Température °C	A_{I}	K_1	A_2	K ₂
35	0.8771908	0.0001173	0.1292621	0.0012130
45	0.5965621	0.0001004	0.3963464	0.0007878
60	0.4221895	0.0002024	0.5707012	0.0001309
75	0.6055541	0.0003383	0.3892891	0.0046894

<u>Tableau 4-1:</u> Valeurs des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 extraites du tableau (3-6)

IV .3- Expression des paramètres du modèle en fonction de la température :

Les résultas suivants sont obtenus par un lissage de courbe à l'aide du logiciel CURVE-EXPERT1.3 pour chacun des paramètres en utilisant la fonction recherche du meilleur modèle.

Les relations empiriques ainsi retrouvées entre les paramètres de l'équation (4 –1) et la température sont développées et sont représentées graphiquement dans les *Figures 4-1* puis récapitulées dans le tableau (4-2) accompagné des coefficients et critères statistiques (Erreur Standard, coefficient de corrélation et Chi-carrée) de chaque équation .



<u>Figure 4-1:</u> Evolution des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 avec la température

Paramè- tre	Equation appropriée	Valeurs des Coefficients	Erreur Standard (S)	Coeff. de corrélation (r)
$\mathbf{A_1}$	$A_1 = a + bT + cT^2$	a = 3.4501838 b = -0.0994169 c = 0.0008183	0.0147205	0.9989766
K ₁	$K_1 = a + bT + c/T^2$	a =-0.0006463 b =1.1929858e-005 c = 0.4352074	0. 0000061	0. 9994679
\mathbf{A}_2	A_2 = exp (a+b/T+cln(T))	a = 64.614667 b = -754.50348 c = -12.847423	0.0140796	0.9990013
K ₂	K_2 = exp (a+b/T+c. ln(T))	a =-96.116664 b =854.71788 c =18.368524	0. 0001202	0.9992627

<u>Tableau 4-2</u>: Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec leurs critères d'analyse statistique

IV .4- Validation de l'équation générale de séchage

Dans le but de définir l'intervalle de validité de l'équation générale de séchage à paramètres variables ainsi retrouvée, on va appliquer celle-ci pour chacune des températures utilisées dans les expériences exploitées dans notre étude.

Pour cela on procède de la manière suivante :

Pour une bonne vérification de cette nouvelle équation empirique générale XR = f(t,T) on va tracer deux types de courbes à l'aide d'un petit programme Matlab7 (voir l'annexe n° 04) :

- -Tracés des courbes représentant les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle, en fonction du temps pour chacune des cinq températures indiquées dans le tableau 3-2
- Tracés des courbes représentant les teneurs en eau réduites prédites par le modèle, en fonction des teneurs en eau réduites expérimentales (soient les courbes y=x) pour chacune des cinq températures indiquées dans le tableau 3-2.

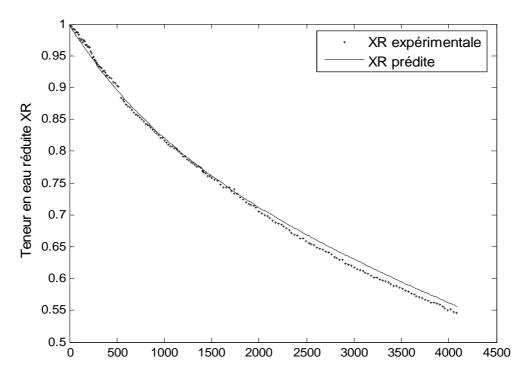


Figure 4-2-a: Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T=35 °C

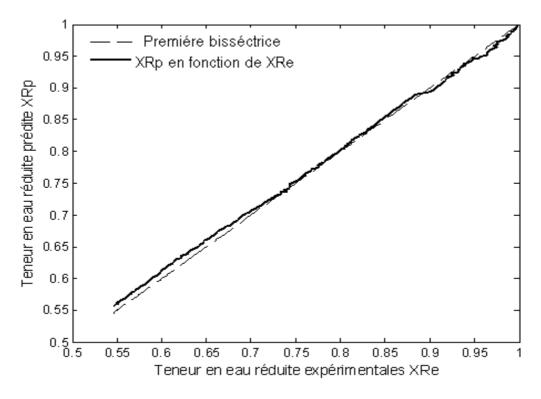


Figure 4-2-b: Teneurs en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en fonction des teneurs en eau réduite expérimentale à T=35°C

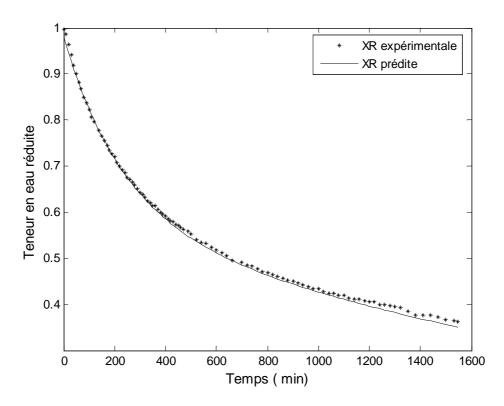


Figure 4-3-a; Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T = 75 °C

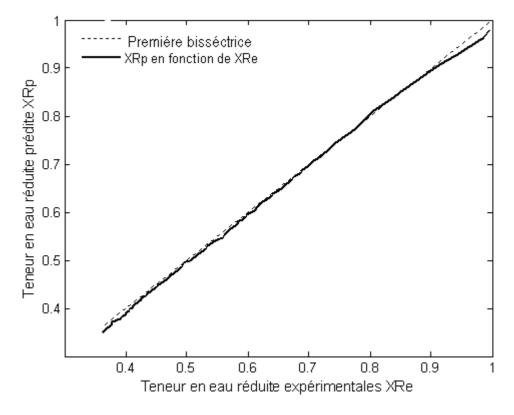


Figure 4-3-b : Teneur en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en fonction du teneurs en eau réduite expérimentale à $T=75^{\circ}C$

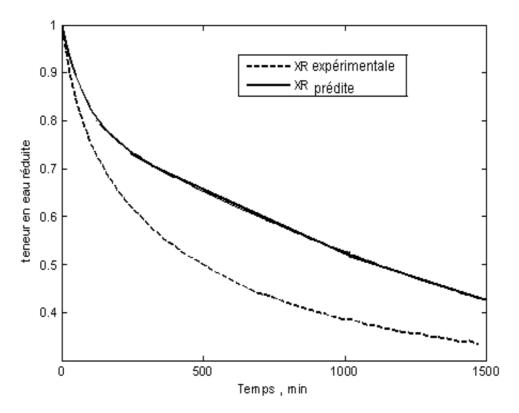


Figure 4-4-a; Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle à deux termes à T=85 °C

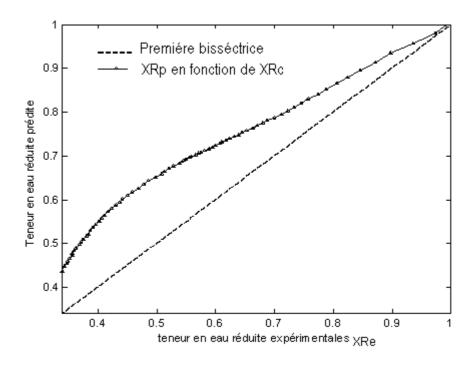


Figure 4-4-b: Teneurs en eau réduite prédite par le modèle à deux termes en fonction des teneurs en eau réduite expérimentale à $T=85^{\circ}C$

IV.5- Application de l'équation caractéristique

Dans le but de vérifier la validité du modèle pour décrire correctement et logiquement le comportement physique du produit, on a choisi de représenter les courbes de séchage simulées sous des températures combinées entre elles dont on dispose ou on ne dispose pas les données expérimentales. Les figures (4-5) et (4-6) montrent des allures très satisfaisantes en se référant à la physique du problème. On remarque bien, comme attendu, que la vitesse de séchage augmente avec la température de l'air, ce qui entraine un ordre logique des courbes des deux figures en fonction des températures croissantes des températures de l'air asséchant.

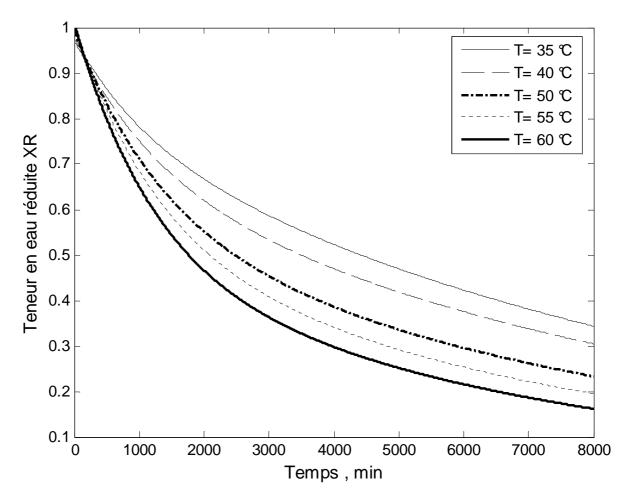


Figure (4-5) : Courbes de séchage simulées par l'équation caractéristique (à T = 35, 40, 50,55 et 60 °C)

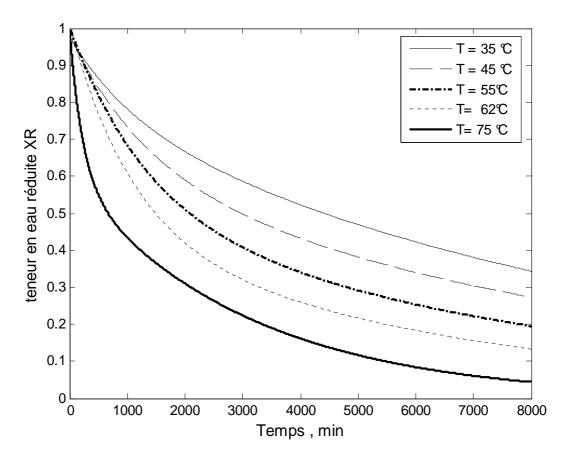


Figure (4-6): Courbes de séchage simulées par l'équation caractéristique (à T = 35,45,55,62 et 75 °C)

IV.6- Résultats et discussion

La confrontation des courbes simulées par le modèle général à deux termes avec les courbes expérimentales montre un bon accord pour les températures de séchage utilisées (figures n°: 4-2-a , 4-2-b , 4-3-a et 4-2-b) sauf dans le cas de la température 85°C comme on l'a déjà mentionné dans le chapitre précédent. C'est ce qu'on peut voir clairement sur les figures n°: 4-4-b et 4-4-b où la prédiction par le modèle s'éloigne nettement des données expérimentales. Ces résultats nous permettent d'accepter le modèle à deux termes dans sa forme générale fonction du temps et de la température comme équation générale de séchage de la datte Deglet-Nour sur une plage de validité des températures de séchage allant de 35°C à 75°C. Cette plage de température couvre, en pratique, les valeurs optimales des températures appliquées par les industriels lors des procédés de traitements post-récolte de cette variété de dattes.

Expressions de l'équation générale et des paramètres du modèle :

Enfin pour récapituler, on donne ci-dessous les expressions finales adoptées pour l'équation générale selon le modèle à deux termes avec les expressions des différents paramètres en fonction du temps et de la température de l'air de séchage.

$$XR(t, T) = A_1(T) \exp(-k_1(T) t) + A_2(T) \exp(-k_2(T) t)$$
 (4-2)

Avec:

 $A_1(T) = 3.4501838 \text{-} 0.0994169T \text{+} 0.0008183 \ T^2$

 $k_1(T) = -0.0006463 + 1.1929858e - 0.05T + 0.4352074/(T^2)$

 $A_2(T) = \exp(64.614667-754.503480/T-12.847423\ln(T))$

 $k_2(T) = \exp(-96.116664 + 854.71788/T + 18.368524\ln(T))$

Avec $35^{\circ}C \le T \le 75^{\circ}C$

<u>Chapitre V:</u> <u>Génération d'une cinétique de séchage solaire</u> <u>sur l'hypothèse de température variable par paliers</u>

V.1-<u>Objectif et procédure</u>:

L'objectif de ce chapitre est de générer une cinétique de séchage solaire simulée sur l'hypothèse de température variable par paliers. Cette procédure va être appliquée ensuite à trois situations différentes selon des types de séchoirs solaires utilisés et on discutera alors la durée de séchage pour chaque application, l'effet de la teneur en eau initiale du produit et on comparera les cinétiques obtenues.

La logique de la procédure suivie consiste à construire une cinétique de séchage solaire reposant sur l'hypothèse que l'évolution de la température dans la chambre de séchage se fait suivant plusieurs paliers de températures constantes le long de la journée. Les mesures des températures journalières ont été obtenues expérimentalement sur trois différents prototypes de séchoirs solaires (Laboratoire LENREZA, UKM Ouargla) au niveau des chambres de séchage. Par la procédure proposée dans cette méthode, la cinétique de séchage solaire construite devrait permettre, connaissant l'évolution de la température journalière, de prédire le temps de séchage et, éventuellement, l'état de qualité en utilisant un séchoir indirect non ventilé et non régulé en température, un séchoir solaire indirect ventilé à température contrôlée et un séchoir solaire direct. Les différents calculs et traitements de données ont été effectués à l'aide du logiciel de calcul scientifique MATLAB 7.0. Enfin la construction de la cinétique de séchage globale simulée a été faite par un programme de calcul écrit en Fortran et exécuté à l'aide du compilateur Visual Fortran 5.0.

Pour permettre la construction par parties de la cinétique simulée de séchage solaire on a intégré l'équation empirique XR = f(t,T) dans le programme de calcul en utilisant l'équation générale développée dans le chapitre(IV). Cela

nous a permis d'utiliser la même équation pour des températures de séchage différentes. Finalement, en application de cette méthode, nous avons des cinétiques simulées de séchage solaire relativement à trois différents cycles de température correspondants aux trois prototypes de séchage solaire du laboratoire LENREZA (UKM Ouargla).

V.2- Situation bibliographique

L'hypothèse d'une cinétique de séchage construite par tranches peut être justifiée par quelques études disponibles dans la littérature. Dans ce sens Benmoussa H. (1989) a étudié expérimentalement l'effet de conditions variables sur les cinétiques de séchage des billes d'argile par pratique de saut de température de l'air et des phases de relaxation. L'auteur a constaté qu'un passage de 26°C à 52°C fait que le comportement physique du produit rejoint la cinétique de 52°C dans un temps de réponse de quinze minutes probablement dû à l'inertie du système qui fait que le passage de température ne peut être brutal. Cette constatation a été confirmée par Bennamoun et Belhamri (2006) lors de la modélisation du séchage solaire des raisins utilisant un modèle diffusif tenant compte des conditions variables de l'air et du tassement du produit. Par ailleurs Benaouda N. et Belhamel M. (2006), ont aussi utilisé un modèle de transferts thermo massiques obéissant à la loi de Fick, et ont obtenu une cinétique simulée de séchage solaire des prunes dont l'allure est semblable à celle présentée dans les résultats de ce chapitre, et ce dans le cas d'un séchoir non régulé en température.

V.3- Traitement des données et procédure de calcul

Afin de permettre la génération d'une cinétique de séchage simulée en accord avec la réalité des phénomènes, l'information sur les mécanismes internes et le comportement physique du produit a été assurée par les cinétiques expérimentales de séchage convectif à air chaud du produit considéré, aux

températures moyennées sur les courbes d'évolution issues des trois séchoirs solaires.

V.3.1- Hypothèses et simplifications

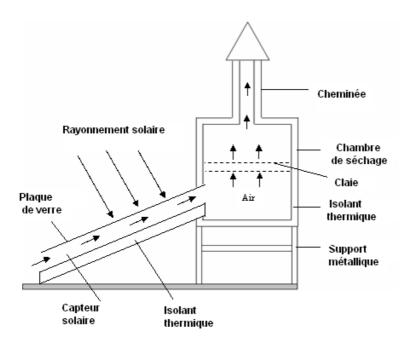
- a- On admet que la température de séchage dans la chambre évolue par paliers constants comme montré typiquement sur les figures (5-4) (5-5) (5-6).
- b- Le séchage se poursuit par répétition du même cycle de température journalière (soient 08 heures de séchage par jour) jusqu'à obtention de la teneur en eau finale recherchée, sachant que l'opération s'arrête la nuit.
- c- Le produit est placé sur une seule claie et étalé en couche mince.
- d- La vitesse moyenne de l'air traversant la chambre de séchage est supposée constante.
- e- L'humidité relative moyenne de l'air dans la chambre de séchage est considérée constante sur chacun des paliers de température.
- f- La teneur en eau du produit évolue suivant la cinétique de séchage en couche mince relative à chacun des paliers de température dans la chambre.

V.3.2- Evolution de la température de séchage

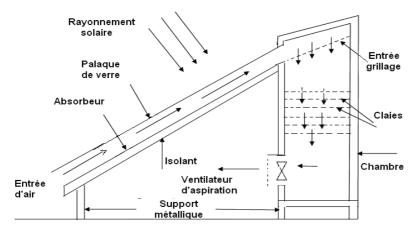
Dans le but d'avoir plusieurs applications, nous avons exploité les mesures de températures journalières effectuées sur trois types de séchoirs solaires pour obtenir trois courbes de températures, modelées par paliers constants (courbe modèle T[°C]=f(temps)), relativement à chacun des dispositifs ci-dessous mentionnés et schématisés par les figures 5-1, 5-2 et 5-3.

- Séchoir indirect à convection naturelle (non ventilé)
- Séchoir indirect à convection forcée (ventilé)
- Séchoir direct

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers

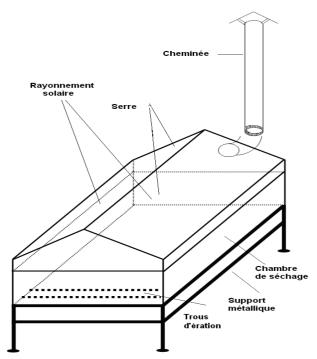


<u>Figure 5-1 :</u> Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection naturelle (prototype de laboratoire LENREZA U K M Ouargla)



<u>Figure 5-2 :</u> Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée (prototype de laboratoire LENREZA U K M Ouargla)

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers



<u>Figure 5-3:</u> Schéma descriptif du séchoir solaire direct (Laboratoire LENREZA UK M Ouargla)

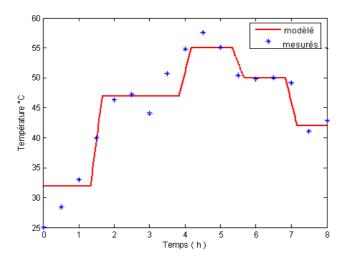
L'opération de construction des courbes modèles d'évolution de température a été faite par détermination de valeurs moyennes pouvant être acceptées sur des intervalles de temps raisonnables. Dans le tableau (5-1) ci-dessous nous avons récapitulé les choix adoptés pour modeler les paliers de température.

cycle de	Source des	Sécho	oir d'étude	Paliers de	Courbe
température n°	données	Type	Schématisé par	température en °C	donnée par
01	P FE Séchage solaire des dattes	indirect naturel	Figure 5-1	32, 42,47, 50 et 55.	Figure 5-4
02	P FE Séchage solaire des dattes	indirect forcé	Figure 5-2	42,48, 52 et 47.	Figure 5-5
03	PFE Séchage des boues d'épuration	direct	Figure 5-3	59.5, 67.5 , 72.5 et 62.5 .	Figure 5-6

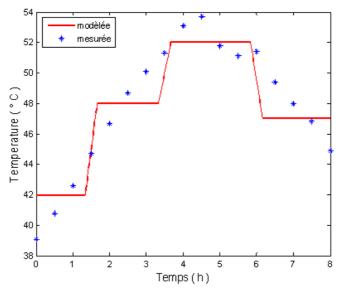
<u>Tableau 5-1:</u> Informations sur les trois cycles d'évolution de la température .

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers

Les courbes de température typique ainsi obtenues à partir des courbes réelles des séchoirs solaires, comme indiqué dans le tableau 5-1, sont illustrées sur les figures (5-4), (5-5) et (5-6).

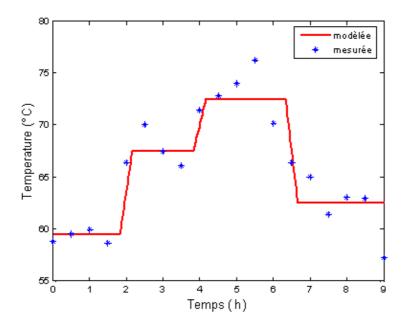


<u>Figure 5-4:</u> Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir indirect convectif naturel (1^{er} cycle de la température)



<u>Figure 5-5:</u> Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir indirect convectif forcé (2^{eme} cycle de la température)

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers



<u>Figure 5-6:</u> Evolution de température journalière modelée à partir des données mesurées dans un séchoir direct (3^{eme} cycle de la température)

V.3.3- Obtention de la cinétique de séchage globale

Tenant compte des hypothèses ci-dessus admises et moyennant les cycles de températures par paliers et les équations modèles des cinétiques de séchage relatives, on a procédé à la construction d'une cinétique de séchage globale à l'aide d'un programme de calcul en Fortran qui travaille selon la logique montrée par l'organigramme de la figure 5-7.

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers

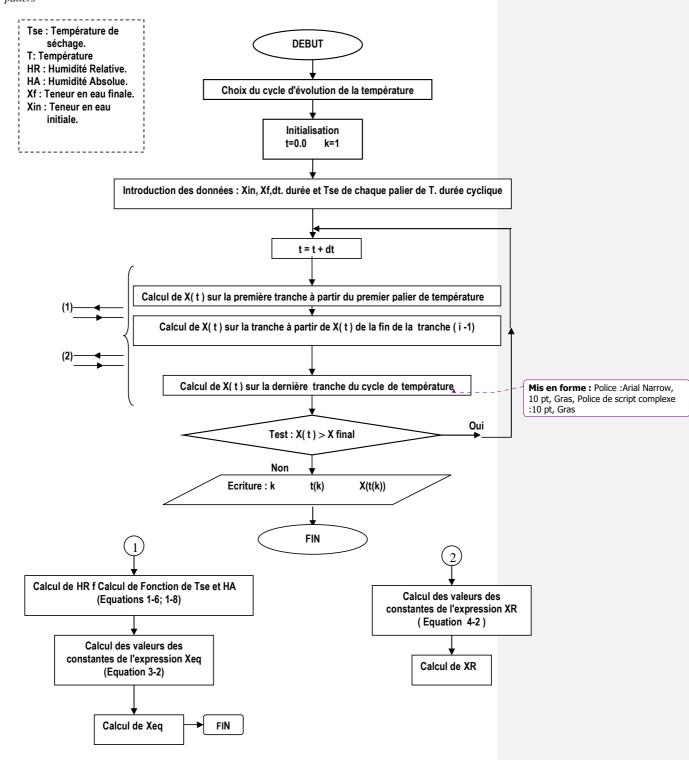


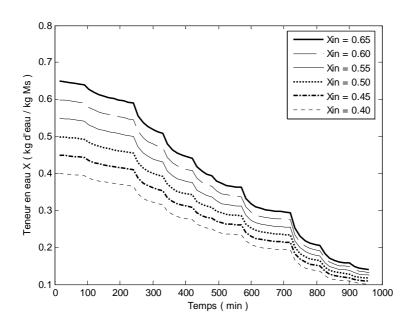
Figure 5-7 : Organigramme de génération de courbe de séchage par parties

On note ici que le calcul de la teneur en eau à chaque instant est assuré par deux sous programmes intégrés, le premier étant du type Subroutine (1) nous permet l'obtention des valeurs de la teneur en eau d'équilibre en calculant d'abord les valeurs d'humidité relative de l'air à la température correspondante. HR% est alors exprimée à l'aide de la relation (1-8) avec l'utilisation de l'expression de P_{sat} de l'équation (1-6) du premier chapitre. La teneur en eau d'équilibre est calculée à l'aide de l'expression donnée par Kechaou N. et al. (2000) pour la datte Deglet-Nour tunisienne (équation (3-2) du chapitre III). Le deuxième sous-programme étant du type Function (2) permet l'obtention la teneur en eau réduite à partir de l'équation empirique XR=f(t,T), chacune dans les conditions physiques appropriées.

V.4-Résultats et discussion

Les applications numériques de la procédure exposée ont porté sur trois exemples de cycles de température journalière modelés sur la base de mesures réelles effectués sur trois différents types séchoirs solaires (cf. Figures 5-1, 5-2 et 5-3). Dans chacun des trois cas, différentes valeurs de teneurs en eau initiales ont été essayées. On compte huit heures de séchage par jour pour les deux premières applications et neuf heures pour la troisième sachant que la cinétique construite peut aller au-delà d'une journée en cas où la teneur en eau finale recherchée n'est pas encore atteinte. Dans une telle situation le séchage est arrêté par la nuit et le produit est alors conservé dans des conditions hermétiques pour éviter toute réhumidification éventuelle.

Dans les figures (5-7), (5-8) et (5-9) on donne les courbes présentant les teneurs en eau en fonction du temps, simulées par la méthode de construction par parties pour le séchage solaire de la datte Deglet-Nour utilisant différentes teneurs en eau initiales et appliquées aux trois types de séchoirs solaires.



<u>Figure 5-8:</u> Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le premier cycle de la température journalière (S – Ind naturel)

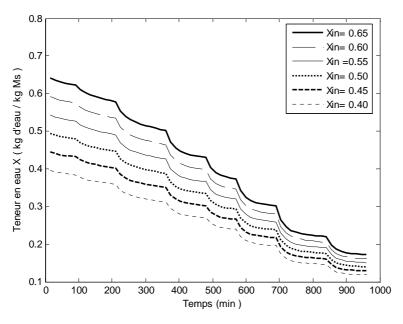
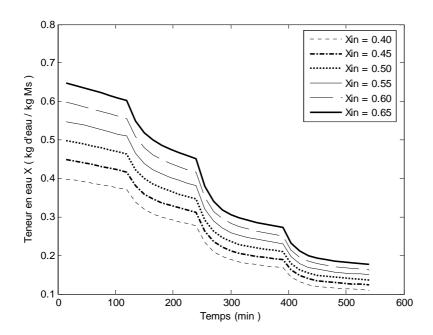


Figure 5-9: Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le deuxième cycle de la température journalière (S – Ind forcé)

Chapitre V : Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de température variable par paliers



<u>Figure 5-10:</u> Cinétiques de séchage solaire simulées avec différentes teneurs en eau initiales (0.4, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 et 0.65) pour le troisième cycle de la température journalière (S – direct)

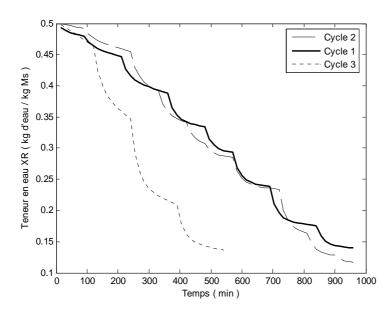
D'après ces figures on remarqué que l'allure générale des cinétiques obtenues semble aller dans le sens favorable à la logique adoptée au départ. Sur les figures (5-8), (5-9) et (5-10) on peut voir une perte de masse d'eau plus ou moins importante relativement au palier de température utilisé. La différence en perte de masse est aussi lisible en comparant sur la figure 5-13 les trois cycles de températures appliqués.

Xin	Temps du séchage solaire [h] pour atteindre X= 0.35 (kg d'eau						
(kg d'eau / kg Ms)	/ kg Ms)						
	1 ^{er} cycle	2 ^{eme} cycle	3 ^{eme} cycle				
0.40	4.20	3.58	2.13				
0.45	5.65	6.00	2.83				
0.50	6.25	6.66	3.5				
0.55	7.33	8.16	4.00				
0.60	8.30	9.16	4.13				

<u>Tableau 5-2:</u> Temps du séchage solaire des dattes Deglet-Nour avec les trois cycles de la température précédemment cités.

Toutefois dans le contexte de ce travail on ne peut restreindre la discussion aux aspects physiques et numériques sans regarder le coté qualité du produit séché. Dans la logique de cette vision et moyennant plusieurs applications du programme de calcul, on a montré sur le tableau (5-2) les durées de séchage, relativement à chacun des cycles de température, permettant d'atteindre l'humidité normale préconisée par les normes internationales pour la commercialisation de la variété de dattes étudiée, soit 26%(à base humide) qui revient à une teneur en eau de 0.35 kg eau/kg de matière sèche. Les valeurs des teneurs en eau initiales essayées couvrent la plage des teneurs rencontrées en pratique et pouvant rejoindre l'une des deux situations :

- a- Cas des dattes de variété Deglet-Nour naturellement fraiche et hyper humide récoltée à environ 0.35% (b.h) soit une teneur en eau à base sèche d'environ 0.54 kg/kg. C'est aussi le cas d'autres variétés de dattes (catégories prédominées par les sucres de glucose et fructose) aussitôt récoltées à l'état prématuré de crainte des conditions climatiques trop humides et pluvieuses (Barreveld W.H., 1993; Zaid A., 2002)
- b- Cas des dattes Deglet-Nour récoltées sèches (par climat chaud ou problème d'irrigation irrégulière) et ayant subi une réhydratation.



<u>Figure 5-11:</u> Cinétique de séchage solaire simulée pour les trois différentes cycles de la température journalier (S – Ind naturel, forcé et S-direct) avec teneurs en eau initiale égal 0.50 (kg d'eau / kg Ms)

Dans la figurea (5-11) on compare la même courbe de séchage partant d'une teneur en eau initiale de 0.50 (kg d'eau / kg matière sèche) mais obtenue avec différents cycles de température donc différents séchoirs solaires. Il est nettement remarqué sur ces figures que le processus de séchage est plus rapide sur le séchoir solaire direct du fait des températures assez élevées mises en jeu (dominance de 70°C et 60°C). On peut aussi lire sur la même figure (5-11) que pour les deux séchoirs indirects (ventilé et non ventilé) on obtient des courbes à allure comparable. C'est aussi probablement du aux cycles semblables de températures plutôt modérées (cf. figures (5-4) et (5-5)) sachant que selon des données bibliographiques la vitesse de l'air n'a pas un grand effet sur le séchage des dattes et des produits à peau faiblement perméable. Si on restreint la comparaison au point de vue durée de séchage en référence au tableau (5-2) on peut affirmer que le meilleur choix serait d'utiliser le séchoir solaire direct sous réserve, bien entendu, de l'état de qualité du produit.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons contribué à l'étude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage solaire du fruit dattier. Nous avons procédé à une modélisation empirique des cinétiques de séchage des dattes sous différentes conditions constantes pour permettre l'obtention d'une cinétique simulée du séchage solaire de ce fruit. Une méthode de construction par parties de la cinétique simulée a été adoptée sur la base de courbes de température journalières relevées sur trois différents prototypes de séchoirs solaires de laboratoire (indirect à convection naturelle, indirect à convection forcée et un séchoir direct). Les courbes de températures ont été modelées par une succession de paliers constants.

Le lissage des courbes expérimentales de séchage utilisant une analyse de régression non-linéaire moyennant le logiciel CurveExpert nous a conduit, avec satisfaction, à un modèle à deux termes exponentiels lequel a été ensuite généralisé sur une plage de températures de séchage entre 30 et 70°C. Les paramètres de l'équation du modèle généralisé ont été correctement corrélés avec la température de l'air asséchant et la plage de validité des températures a été vérifiée par les données bibliographiques comme étant l'intervalle de température de traitement des dattes assurant la bonne qualité du produit final.

D'autre part, les cinétiques simulées de séchage solaire semblent logiques et satisfaisantes du point de vue durée de séchage jusqu'à l'humidité commerciale requise (soit 0.26% à base humide) ne dépassant pas les deux journées pour les différentes teneurs en eau initiales essayées. L'application de cette même procédure selon les courbes de températures issues de trois types différents de séchoirs solaires a montré un bon accord avec le comportement physique attendu et a révélé une durée de séchage plus réduite dans le cas du séchoir

Conclusion

Il est utile de noter en fin que cette étude a été limitée au séchage en couche mince du fruit dattier utilisant une seule claie, mais pour un travail plus développé il serait important de faire l'application à d'autres produits. L'application utilisant des claies multiples est possible si on définit des paliers de températures relativement à chaque claie avec prise en compte de la chute de température qui peut être mesurée entre deux claies successives.

Afin de permettre la validation expérimentale de la procédure suivie dans notre étude, il est souhaitable, dans des études a venir, de disposer des courbes expérimentales sur séchoirs solaires en discontinu avec des équations modèles validées pour différents produits alimentaires.

Sommaire

Nomenclature
Liste des tableaux et graphes
Introduction
Chapitre I: Le séchage des produits agroalimentaires Notions générales
I.1-séchage
I.1.1- Définition
I.1.2- Problèmes de séchage
I.1.3- Modes de séchage
I.1.4- Processus de séchage par convection
I.1.5-Principaux agents de l'opération de séchage par convection
I.1.5.1- Produit à sécher
I.1.5-2 L`air humide
I.1.6- Cinétique de séchage
I.1.7-Quelques notions sur le séchage solaire
I.2-Présentation du produit d'étude : la datte « Deglet-Nour »
I 2.1 - Caractéristiques du fruit
I.2.2– Particularités
I -2-3–Traitements.
Chapitre II: Etude bibliographique sur les modèles de séchage des produits
agroalimentaires
II.1-Introduction
II.2-Classification des modèles de séchage
II.2.1-Les modèles diffusifs
II.2.2-Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse
II.2.3-Les modèles semi- empiriques et empiriques
II.2- Développement des modélisations de séchage des produits agroalimentaires
II.2-1- Etudes sur le séchage des dattes.
II.2-2- Etudes sur la modélisation des cinétiques de séchage d'autres produits à
structure pulpe-noyau
II.2-2- 1- Les abricots.
II.2-2- 2- Les prunes
Récapitulation
Chapitre III: Modélisation des cinétiques de séchage de la datte
III .1- Objectif et logique de raisonnement
III .2- source des données
III .3- Procédure d`analyse des données
III .3-1- Analyse de régression
III. 3.2- Analyse des résidus
III .4 - Détermination du modèle approprié
- Résultats et discussion

Sommaire

Chapitre IV- Développement d'une équation générale de séchage en couche	
mince de la datte Deglet-Nour	59
IV .1- Objectif	59
IV .2- Rappel du modèle choisi	59
IV .3- Expression des paramètres du modèle en fonction de la température	60
IV .4- Validation de l'équation générale de séchage	61
IV.5-Application de l'équation caractéristique	65
IV.6-Résultats et discussion	66
Chapitre V: Génération d'une cinétique de séchage solaire sur l'hypothèse de	
température variable par paliers	69
V.1-Objectif et procédure	69
V.2-Situation bibliographique	70
V.3- Traitement des données et procédure de calcul	70
V.3.1- Hypothèses et simplifications	71
V.3.2-Evolution de la température de séchage	71
V.3.3- Obtention de la cinétique de séchage globale	75
V.4-Résultats et discussion	77
Conclusion	83
Références bibliographiques	86
Annexes:	
Annexe 01: Eléments statistiques mentionnés dans l'étude bibliographique	90
Annexe 02 : Théorie de la méthode Levenberg-Marquardt	93
Annexe 03: Graphiques complémentaires (Chapitre III)	98
Annexe 04: Routines de calcul sur Matlab	102