



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences

Spécialité : MECANIQUE

Option : ENERGETIQUE

PAR

Miloud LAHBARI

Thème

ETUDE ET SIMULATION DU SECHAGE DE L'ABRICOT :
APPLICATION A QUELQUES VARIETES DE LA REGION DES AURES

Soutenu publiquement le : 10/03/2015

Devant le jury composé de :

Dr. Mohamed SIAMEUR	Pr. à l'Université de Batna	Président
Dr. Hocine BENMOUSSA	Pr. à l'Université de Batna	Rapporteur
Dr. Abdelghani BOUBEKRI	Pr.à l'Université d'Ouargla	Examineur
Dr. Noureddine MOUMMI	Pr. à l'Université de Biskra	Examineur
Dr. Mayouf SI ABDALLAH	M.C.A à l'Université de M'sila	Examineur
Dr. Djamel FAHLOUL	Pr. à l'Université de Batna	Invité



Louange à Dieu, le Maître de l'Univers, le Clément, le Miséricordieux

Dédicaces

A la mémoire de mon père

A Toute ma famille

Miloud.

Tables des matières

Nomenclature

Introduction générale

Partie Théorique

Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

1.1 Description du fruit.....	1
1.2 Histoire et origine.....	1
1.3 Etymologie de l'abricot.....	2
1.4 Importance économique.....	2
1.4.1 Alimentation.....	2
1.4.2 Cosmétique.....	2
1.5 Production mondiale.....	3
1.6 Anatomie du fruit.....	4
1.7 Valeur nutritionnelle.....	5
1.8 Variétés des abricots.....	6
1.9 Production des abricots en Algérie.....	7
1.9.1 Production de la région du Hodna.....	7
1.9.2 Production de la région des Aurès.....	8
1.10 Difficultés rencontrés pour commercialiser l'abricot des Aurès.....	9
1.10.1 Maturité de l'abricot.....	10
1.10.2 Récolte des abricots.....	10
1.11 Normes internationales des abricots secs.....	10
1.11.1 Champ d'application.....	10
1.11.2 Description.....	11
1.11.3 Critères de qualité.....	11
1.11.4 Définition des défauts.....	12
1.11.5 Conditionnement.....	12

Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

2.1 Définition du séchage.....	13
2.2 Objectif du séchage.....	14
2.3 Avantages et inconvénients du séchage.....	14
2.3.1 Avantages.....	14
2.3.2 Inconvénients.....	15
2.4 Cinétique de séchage.....	15
2.4.1 Périodes de séchage.....	16
2.4.2 Représentation des différentes étapes par le diagramme de l'air humide.....	17
2.5 Transfert de chaleur et de matière.....	18
2.5.1 Transfert de chaleur.....	18
2.5.1.1 Conduction.....	18
2.5.1.2 Convection.....	19

2.5.1.3 Rayonnement.....	19
2.5.2 Transfert de matière.....	20
2.5.2.1 Migration de vapeur d'eau.....	21
2.5.2.1.1 Teneur en eau.....	21
2.5.2.1.2 Activité de l'eau.....	22
2.5.2.2 Taux d'humidité à l'équilibre.....	23
2.6 Isothermes de sorption.....	23
2.6.1 Relation eau-produit.....	23
2.6.2 L'eau et ces différents états de liaisons.....	24
2.6.3 Teneur en eau d'un produit.....	24
2.6.4 Analogie activité de l'eau-humidité relative.....	25
2.7 Mesure de l'activité de l'eau.....	26
2.7.1 Ou mesure-t-on l'activité de l'eau.....	26
2.7.2 Comment mesure-t-on l'activité de l'eau.....	26
2.8 Teneur en eau - Activité de l'eau.....	27
2.9 Représentation des isothermes de sorption.....	27
2.9.1 Définition.....	27
2.9.2 Formes et modèles des isothermes de sorption.....	28
2.9.2.1 Forme générale des isothermes.....	28
2.9.2.2 Modélisation des courbes de sorption.....	29
2.9.2.3 Les modèles.....	30
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes	
3.1 Séchage des fruits et légumes.....	34
3.2 Séchage solaire.....	35
3.4 Brunissement enzymatique.....	36
3.4.1 Définition.....	36
3.4.2 Mécanismes et facteurs d'activité.....	36
3.4.3 Facteurs d'activité.....	37
3.4.4 Préservation des aliments contre le brunissement enzymatique.....	37
3.5 Brunissement non enzymatique.....	37
3.5.1 Facteurs influençant le brunissement non enzymatique.....	38
3.5.2 Prévention du brunissement non enzymatique.....	38
3.6 Prétraitement.....	38
3.6.1 Prétraitement chimique.....	39
3.6.1.1 Trempage dans des solutions alcalines.....	39
3.6.1.2 Sulfitage.....	39
3.6.1.3 Méthode utilisée.....	
3.6.2 Prétraitement mécanique.....	39
3.6.3 Prétraitement thermique.....	40
3.6.3.1 Blanchiment.....	40
3.6.3.2 Avantages du blanchiment.....	40

3.6.3.3 Inconvénients du blanchiment.....	40
3.7 Altération des fruits et légumes lors de séchage.....	41
3.8 Qualité des produits séchés.....	41
3.9 Altération des produits déshydratés.....	42
3.10 Réhydratation.....	43
3.11 Revue bibliographique sur le séchage d'abricot.....	44

Partie Expérimentale

Chapitre 1 : Matériel et méthodes

1 .1 Matériel (technique et végétal).....	50
1 .1.1 Matériel technique.....	50
1 .1 .2 Matériel végétal.....	55
1 .2 Conduite des expériences.....	56
1 .2.1 Paramètres enregistrés.....	56
1 .2.2 Collecte des données.....	56
1 .2.2.1 Paramètres avant le séchage.....	56
1 .2.2.2 Etude de l'évolution du séchage.....	57
1.3 Modèles de séchage.....	58
1.3.1 Classification des modèles de séchage.....	58
1.3.1.1 Les modèles diffusifs.....	58
1.3.1.2 Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.....	59
1.3.1.3 Les modèles semi- empiriques et empiriques.....	59
1.4 Développement des modèles de séchage des produits agroalimentaires.....	59
1.5 Modélisation mathématique des courbes de séchage.....	60
1.5.1 Procédure d`analyse des données.....	60
1.5.2 Analyse de régression.....	60
1.5.2.1 Le coefficient de corrélation.....	61
1.5.2.2 Fonction Chi-2 ou χ^2	62
1.5.2.3 Détermination du modèle approprié.....	62
1.6 Détermination expérimentale des isothermes de sorption	62
1.6.1 Mise en œuvre de l'équilibre.....	62
1.6.2 Humidités relatives fixées par des solutions salines saturées, d'acides ou glycérol.....	63
1.7 Méthode expérimentale.....	64
1.7.1 Le but	64
1.7.2 Préparation du produit	64
1.7.3 Obtention d'un point de la courbe des isothermes.....	65
1.7.4 Méthode	66
Préparation des récipients et des solutions de sels saturées.....	67
Prises de masse et fin de l'expérience.....	68

Chapitre 2 : Résultats et discussions

2.1 Détermination la teneur en eau en base sèche.....	74
2.2 Courbes de séchage et interprétation.....	74
2.2.1 Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t.....	75
2.2.2 Évolution de la masse en fonction du temps t	76
2.2.3 Évolution des cinétiques de séchage en fonction du temps t.....	77
2.2.4 Variation des vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau X.....	79
2.3 Modélisation des cinétiques de séchage.....	81
2.3.1 Les paramètres statistiques.....	81
2.3.2 Détermination du modèle approprié.....	81
2.3.3 Application de l'équation du modèle approprié (Two-Term).....	83
2.4 Développement d'une équation générale de séchage d'abricots.....	85
2.4.1 Expression des paramètres du modèle en fonction de la température.....	85
2.4.2 Expressions de l'équation générale et des paramètres du modèle.....	90
2.5 Détermination de la teneur en eau de l'équilibre.....	91
2.6 Modélisation.....	94
2.6.1 Interprétation.....	97
2.6.2 Choix du modèle.....	97

Conclusion générale

Références bibliographiques

Nomenclature

P_p	Pression de vapeur d'eau de produit (Pa)
P_a	Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
P_v	Pression de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa)
P_{as}	Pression partielle de l'air sec (Pa)
P_{at}	Pression atmosphérique (Pa)
P_{asat}	Pression partielle de vapeur saturante (Pa)
a_w	Activité de l'eau
Hr	Humidité relative %
Hr_a	Humidité relative de l'air %
r^s	Humidité spécifique de l'air (kg/kg AS)
L	Dimension caractéristique du produit (m)
S	Surface d'échange du produit (m ²)
MS	Matière sèche
m	Masse du produit (kg)
m_h	Masse humide (kg)
m_s	Masse sèche du produit (kg)
m_v	Masse de vapeur d'eau (kg)
m_{as}	Masse d'air sec (kg)
n_s	Taux d'humidité (kg H ₂ O/kg AS)
X	Teneur en eau du produit (base sèche) (kg H ₂ O/kg MS)
X_h	Teneur en eau du produit (base humide) (kg H ₂ O/kg produit)
$X_{éq}$	Teneur en eau d'équilibre (kg H ₂ O/kg MS)
X_m	Teneur en eau pour une monocouche absorbée (kg H ₂ O/kg MS)
T	Température (°C)
T_s	Température à la surface du produit (°C)
T_a	Température de l'air loin du produit (°C)
T_{as}	Température sèche de l'air (°C), elle est la même que T_a
T_h	Température humide de l'air (°C)
T_r	Température de rosée (°C)
V_a	Vitesse de l'air (m/s)
φ_a	Flux de chaleur de l'air (W)
h_s	Enthalpie spécifique (J.kg ⁻¹)
v	Volume spécifique (m ³)
v_{AH}	Volume d'air humide (m ³)
m_e	Masse d'eau (kg)
l	Chaleur de condensation de l'eau pure (J.kg ⁻¹ C ⁻¹)
Hm	Chaleur de sorption monocouche (J.kg ⁻¹ C ⁻¹)
Hn	Chaleur de sorption multicouche (J.kg ⁻¹ C ⁻¹)
A, B, C, K	Paramètres des modèles de sorption (dépendant de la température)
C_0, K_0	Constantes
a, b, c, d	Coefficients des modèles de sorption
r	Coefficient de corrélation
s	Coefficient d'erreur standard

Introduction générale

En Algérie, l'abricotier possède une place privilégiée dans la vie des agriculteurs, vue la superficie qu'il occupe et son importance dans le marché national, c'est l'espèce fruitière la plus cultivée devant le pommier, le poirier et le pêcher ^[4], [ITAF : Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne]

Les vergers d'abricotiers, constituent l'une des meilleures richesses de l'Algérie, notamment dans la région des Aurès (la wilaya de Batna particulièrement), qui constitue l'une des régions les plus productives. En effet, elle occupe la première place à l'échelle nationale.

L'abricotier est cultivé à Batna par 1500 producteurs sur 4500 hectares soit 25% du total de la superficie consacrée à l'arboriculture fruitière [DSA : Direction des services agricoles de Batna. 2011]. Selon les données relevées sur place, la wilaya a enregistré pour l'année 2011 une récolte record dépassant les 600000 quintaux avec une qualité meilleure pour le fruit de la dite année.

A part son apport nutritif, l'abricot est largement consommé en Algérie pour ses vertus thérapeutiques confirmées sur la santé des consommateurs ^[52].

Par manque de moyens de transformation ou de conservation de grande capacité dans la région, les producteurs sont obligés à céder leur marchandise à des prix dérisoires ou à se débarrasser de cette production par crainte du fait que l'abricot est un fruit très périssable, d'où on est confronté à une situation économique délicate et persévérante à l'égard du secteur agro-alimentaire et nécessite donc une solution adéquate. Il est donc temps de réfléchir à adopter des solutions limitant les dégâts causées par ces pertes. Pour valoriser cette importante denrée alimentaire sur le marché local ou à l'étranger, il est essentiel de prévoir les meilleures méthodes pour la préserver pour la plus longue durée possible.

L'objectif de ce présent travail de thèse était de contribuer par une solution technique au problème auquel est confrontée la production de ce fruit qui se détériore rapidement après mûrissement à cause de sa forte teneur en eau (plus de 84% pour la majorité des variétés cultivées ^{[13], [56]}). Il est bien connu que la dégradation de qualité d'un produit par infection microbologique est étroitement liée à l'excès d'humidité.

Le séchage des produits agroalimentaires est présenté parmi les meilleures opérations, pouvant donner la solution espérée car, il peut assurer : la préservation de la qualité du produit et l'augmentation de sa durée de vie lors de son stockage avant consommation.

Le séchage solaire s'avère mieux adapté aux produits alimentaires à cause de leur thermo sensibilités importantes et des températures modérées mises en jeu, outre les raisons économiques et environnementales.

Par contre le séchage à air chaud se caractérise par ses conditions variables ^[8] de l'air séchant dépendant des conditions imposées, d'où les difficultés de prévision du processus de séchage en termes de comportement physique, de durée de séchage et d'aspect qualité, mais de point de vue rendement économique, il est meilleur par rapport aux autres procédés vu sa simplicité, sa rapidité et sa consommation raisonnable en énergie.

Cette thèse est présentée en deux parties (une théorique et l'autre expérimentale), une introduction et une conclusion générale.

Dans la première partie on a essayé d'apporter le maximum de renseignements dans le premier chapitre sur l'abricot en tant que matériel végétal en examinant son histoire, ses caractéristiques, sa composition et les variétés les plus répandues dans le monde et dans la région de l'étude.

De la même façon, on a traité dans le deuxième chapitre la théorie du séchage : son rôle, ses avantages et inconvénients en détaillant le concept des isothermes de sorption et leur modélisation mathématique, quant au troisième chapitre on s'est intéressé au séchage particulier des fruits et légumes en évoquant les différents points qu'on doit surmonter lors de leur manipulation comme la qualité du produit final et les traitements préventifs nécessaires sans oublier le résumé donné en fin de ce chapitre et qui traite les travaux établis sur le séchage des abricots.

La deuxième partie se compose de deux chapitres dont le premier est consacré aux manipulations pratiques réalisées au laboratoire de séchage de l'école de Massy : Utilisation du séchoir pilote à air chaud, conduite du séchage, matériel technique et végétal utilisé en passant par le matériel du laboratoire utilisé pour l'obtention des isothermes de sorption en présentant à la fin de ce chapitre les méthodes de simulation statistiques des courbes de séchage et des isothermes obtenues expérimentalement.

Dans ce même chapitre, on a introduit les travaux entrepris à l'université de Batna sur le séchage solaire et à air qui restent dans la phase d'expérimentation mais qui semblent donner des résultats très favorable quant à la poursuite de recherche dans ce domaine afin d'arriver à maîtriser cette technique de conservation d'une façon solide, pour les aliments produits en Algérie.

Le deuxième chapitre de cette partie est réservé à l'interprétation des résultats expérimentaux et la modélisation des cinétiques de séchage des trois variétés d'abricot utilisées 'Louzi, Rosé et Khed Erroumia', pour les températures choisies suivantes: 30, 40, 50 et 60°C et une modélisation des courbes des isothermes réalisées sur deux variétés uniquement: Louzi et Rosé, pour deux températures : 30 et 60°C.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale ou on a remis en vue les résultats obtenus et présenté quelques travaux réalisés et d'autres perspectives en parallèle à ce travail de thèse.

Ce travail a contribué à la production de plusieurs travaux de recherche sous forme d'articles dans plusieurs revues et congrées scientifiques et de mémoires de projets de fin d'études pour Ingénieurs, DEUA, License et Master, parmi lesquels, on peut citer :

- 1- Abdeddaim M. Sariak R., Fahloul D., Bacha A., **Lahbari M. (2013)** : *Conception et réalisation d'un séchoir à air chaud pour fruits et légumes*. (SMSTS'2013), 25-28 Mars, Iles de Kerkennah - Sfax, Tunisie, 2013
- 2- **Lahbari M.**, Benmoussa H., Mezdour S., Fahloul D. **(2013)** : *Cinétiques de séchage et modèle mathématique de quelques variétés d'abricot produites dans la région de Batna (est d'Algérie)*. 4^{ème} Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies de Séchage (SMSTS'2013), 25-28 Mars, Iles de Kerkennah - Sfax, Tunisie
- 3- Fahloul, D., **Lahbari**, M., Benmoussa, H., Mezdour, S. **(2009)**: *Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots*. International journal of food, agriculture and environment, vol. 7, n°2, pp. 117-121 WFL publisher, Helsinki, FINLANDE

Partie Théorique

Chapitre 1
*Généralités sur
l'abricot*

1.1 Description du fruit

L'abricot ^[1] est le fruit d'un arbre généralement de petite taille appelé abricotier, de la famille des Rosacées. Le nom scientifique de l'abricotier est : *Prunus armeniaca* (Prune d'Arménie)



Figure 1.1 : Abricots à maturité; entier et en coupe.

C'est un fruit charnu, une drupe, de forme arrondie, possédant un noyau dur contenant une seule grosse graine (Figure I.1), ou amande.

La chair est sucrée, peu juteuse, jaune orangée et ferme, la teneur en carotène ou provitamine A est élevée, c'est elle qui donne la couleur orangée et l'abricot est riche en pectines qui se gonflent facilement d'eau et qui lui confèrent son côté moelleux. L'abricot se sépare aisément en suivant le sillon médian.

La peau veloutée, dont la couleur peut aller du jaune au rouge, est parfois piquetée de « taches de roussure » et se mange.

La couleur rouge n'est pas gage de maturité (le degré de maturité est apprécié par le parfum et la souplesse du fruit) et l'abricot mûrit après sa cueillette, il est climactérique.

1.2. Histoire et origine

L'abricot et la pêche sont les deux fruits à noyaux du genre *Prunus* originaires de l'Asie. Ce sont les Chinois qui, les premiers, l'ont domestiqué, il y a au moins 4000 ans. De la Chine, l'abricot a gagné l'Inde puis l'Italie et la Grèce, en suivant la Route de la Soie, un siècle avant notre ère.

En Afrique du nord et en France, il a été introduit aux environs du XV^{ème} siècle.



1.3. Etymologie de l'abricot

Le mot est passé du latin au français via le grec ancien, l'arabe et le catalan. Les Romains le nommaient *praecoquum*, c'est-à-dire « le fruit précoce ». Les Grecs l'empruntèrent aux Romains sous la forme *πραικόκιον* (praikokion).

Les Arabes l'empruntèrent aux Grecs sous la forme البرقوق (Al-barqouq) et les Catalans l'empruntèrent aux Arabes sous la forme *abercoc* en agglutinant l'article défini au substantif. Le mot est passé en français au XVI^e siècle. Al-barqouq désigne aujourd'hui, au Maghreb, la prune, alors que l'abricot se dit 'mech mech', mot d'origine persane. En arménien l'abricot est appelé "tsiran" depuis la nuit des temps.

I.4 Importance Economique

I.4.1 Alimentation

On consomme l'abricot frais, mais aussi séché (abricot sec) ou préparé de diverses façons: compote, confitures, tartes, abricots au sirop (en conserves), ainsi que dans des plats salés.

- **Abricot frais** : l'abricot est extrêmement aisé à manger, c'est l'aliment parfait pour les petits, il est tendre et ne coule pas.
- **Abricot sec**: Venant essentiellement de Turquie (goût de muscat, belle couleur), de Californie (peu sucré, goût acidulé), d'Australie (acidulé, parfois trempé dans un bain de sucre) ou d'Iran (de couleur jaune-pâle). Ce genre d'abricot est largement consommé seul comme par les sportifs et les cosmonautes ou associé comme on l'utilise par exemple ici en Algérie dans nos recettes des Tajines lors des occasions, dans les fêtes ou pendant le mois Ramadhan.

Parmi les régions célèbres pour leurs abricots séchés: le Ladakh en Inde et les Aurès en Algérie (abricot très sec se dit *Afermas* en Chaoui ou *Fermas* en arabe parlée, on l'utilise presque à l'échelle de toute l'Algérie comme ingrédient lors de la préparation de plusieurs recettes traditionnelles tel que le Couscous à gros grains).

- **Abricot confit** : c'était l'une des spécialités de la conserverie Doxa en suisse.
- **Jus d'abricot** : il en faut un grand nombre pour produire du jus. c'est le jus de fruit à base d'abricot produit à la conserverie de N'gaous qui a rendu célèbre cette ville.
- L'abricot se retrouve également dans la confection du pain à l'abricot, en conserve, en tarte et bien sûr, en confiture.

I.4.2 Cosmétique



Partie Théorique
Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

L'huile de noyau d'abricot est composée de 90% d'acides gras insaturés (vitamines F). Ce sont pour 2/3 des acides oléiques et pour 1/3 des acides linoléiques.

Les acides gras insaturés assurent l'état liquide du corps gras à température ambiante. Ils ont des fonctions de défense, de préservation et de réparation vitales pour l'organisme. De plus, les acides gras essentiels permettent de rééquilibrer l'apport lipidique de la peau.

Ainsi, l'huile de noyau d'abricot est nourrissante, convient bien pour les massages et revitalise les peaux fatiguées.

I.5 Production mondiale

La culture de l'abricotier s'est développée autour du bassin méditerranéen et en Asie centrale, aujourd'hui encore, c'est dans ce périmètre que se situent les principaux pays producteurs. Nous trouvons ailleurs quelques bassins secondaires, dont les plus importants sont les USA, la Chine et l'Afrique du Sud ^[56].

Selon les chiffres données de l'année 2009 FAO (Tableau I.1):

La Turquie est le principal producteur d'abricots et plus particulièrement dans la région de Malatya, elle domine ainsi la production mondiale avec environ 695300 tonnes d'abricots produits en 2009, suivie de l'Iran avec 397700 tonnes.

La majeure partie de la production turque et iranienne est destinée au séchage ce qui explique la présence abondante sur notre marché de l'abricot sec provenant de ces deux pays de manière presque exclusive.

Tableau 1.1 : Production mondiale en tonnes [FAOSTAT (FAO) 2009].

Production d'abricot en tonnes.	
Turquie	695 364
Iran	397 700
Ouzbékistan	290 000
Italie	233 600
Algérie	202 806
Pakistan	193 936
France	190 382
Maroc	122 798

En Afrique, l'Algérie occupe la première place avec 25% de la production africaine, la deuxième et la troisième place reviennent au Maroc et à l'Afrique du Sud avec des tonnages représentant respectivement 21,5% et 20,8% de la production africaine (F.A.O., 2009).

1.6 Anatomie du fruit



Partie Théorique
Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

Le fruit de l'abricotier est une drupe, c'est à dire un fruit simple charnu à noyau qui dérive d'un ovaire infère à un carpelle situé dans le conceptacle caduque au sommet duquel sont fixées les pièces florales.

La partie externe du péricarpe (mésocarpe et épicarpe) est charnue et comestible (Figure I.2) et la partie interne (endocarpe) est lignifiée (noyau) ; cette partie entoure et protège la graine.

On observe à la base du fruit la cicatrice du pédoncule floral et au sommet le point de chute du style. Le sillon que l'on observe sur un côté du fruit représente la suture carpellaire qui s'étend de l'attache du pédoncule à l'apex ^[ii].

Le fruit provient donc d'un seul carpelle, dans lequel une seule graine (parfois deux) se développe.

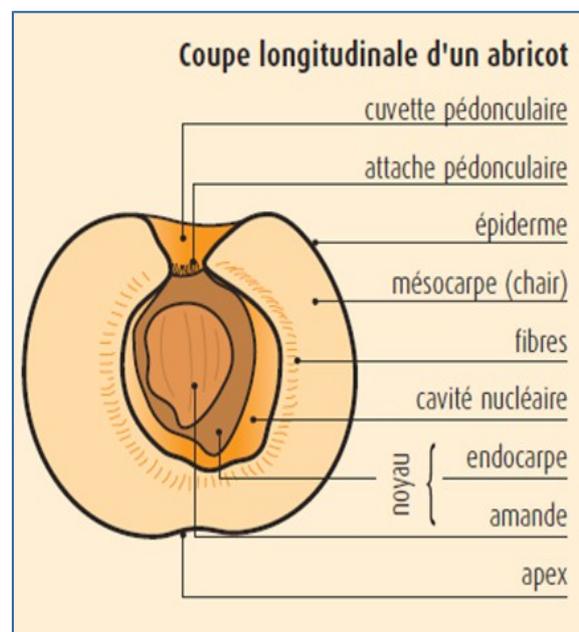


Figure I.2 : Coupe longitudinale d'un abricot ^[ii].

Le mésocarpe est un tissu majoritairement parenchymateux qui devient mou lorsque le fruit est mûr il est fortement vascularisé. Chez les fruits mûrs, le mésocarpe et l'endocarpe sont séparés par une cavité nucléaire.

Le noyau, dans la majorité des variétés est donc libre ou faiblement adhérent, d'où la classification en drupe de ce fruit. Pour certaines variétés, cependant, le noyau est très adhérent.

1.7 Valeur nutritionnelle :



Partie Théorique
Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

Les abricots sont une bonne source de fibres alimentaires (pectines), de potassium et une très bonne source de bêta-carotène (vitamine A) et de vitamine C.

Les pectines, se gonflent facilement d'eau et confèrent du moelleux à sa chair (Tableau 1.2).

L'abricot peut être consommé frais, séché ou sous forme de jus, de marmelade et de confiture. Son contenu en fibres, en antioxydants et en plusieurs autres nutriments fait de l'abricot un fruit particulièrement intéressant pour la santé.

Plusieurs études prospectives et épidémiologiques ont démontré qu'une consommation élevée de fruits diminuait le risque de maladies cardiovasculaires, de certains cancers et d'autres maladies chroniques.

Les abricots contiennent différents antioxydants, particulièrement des flavonoïdes mais le contenu en antioxydants des abricots séchés serait plus élevé que celui des abricots frais.

L'abricot contient principalement du bêta-carotène, un caroténoïde contribuant largement à sa couleur orangée, ainsi qu'une petite quantité de lycopène. Dans l'organisme, le bêta-carotène a la capacité de se transformer en vitamine A.

Tableau 1.2: Valeurs nutritionnelles pour 100g d'abricot ^[iii].

Abricot cru (d'après ANSES 2013 ^[ii], valeur nutritive pour 100 g)			
eau : 86,1 g	cendres totales : 0,75 g	fibres : 1,70 g	valeur énergétique : 49,1 kcal
protéines : 0,90 g	lipides : 0,20 g	glucides : 9,01 g	sucres simples : 8,02 g
Sels minéraux et oligo-éléments			
potassium : 237 mg	phosphore : 16,6 mg	calcium : 15,6 mg	magnésium : 8,67 mg
sodium : <2,2 mg	fer : 0,32 mg	zinc : 0.139 mg	cuivre : 0,066 mg
Vitamines			
vitamine C : 5,45 mg	vitamine B1 : 26,7 µg	vitamine B2 : 37 µg	vitamine B3 : 500 µg
vitamine B5 : 240 µg	vitamine B6 : 62,7 µg	vitamine B9 : 6 µg	vitamine B12 : 0 µg
bêta-carotène : 1 630 µg	rétinol : 0 µg	vitamine E : 610 µg	vitamine K : 3,3 µg

Tableau 1.2 (suite): Valeurs nutritionnelles pour 100g d'abricot ^[iii].



Abricot sec (d'après ANSES 2013 ^[ii.], valeur nutritive pour 100 g)			
eau : 29,4 g	cendres totales : - g	fibres : 5,70 g	valeur énergétique : 271 kcal
protéines : 3,14 g	lipides : 0,80 g	glucides : 53,0 g	sucres simples : 40,5 g
Sels minéraux et oligo-éléments			
potassium : 1090 mg	phosphore : 68,3 mg	calcium : 61,2 mg	magnésium : 36,5 mg
sodium : 39 mg	fer : 4,33 mg	zinc : 0,295 mg	cuivre : 0,306 mg
Vitamines			
vitamine C : 1 mg	vitamine B1 : 7,5 µg	vitamine B2 : 67 µg	vitamine B3 : 2690 µg
vitamine B5 : 608 µg	vitamine B6 : 157 µg	vitamine B9 : 22 µg	vitamine B12 : 0 µg
bêta-carotène : 2160 µg	rétinol : 0 µg	vitamine E : 4000 µg	vitamine K : 3,1 µg

A titre comparatif, une portion de 125 ml d'abricot frais (environ deux abricots) contient environ 2000 µg de bêta-carotène, tandis qu'une portion de 60 ml d'abricot séchés en renferme 1400 µg.

Les abricots, frais et séchés, sont une source de fibres alimentaires. Une portion de 125 ml d'abricot frais comble respectivement 5 % et 8 % des apports quotidiens recommandés en fibres des hommes et des femmes de 19 ans à 50 ans. En plus de prévenir la constipation et de diminuer le risque de cancer du côlon, une alimentation riche en fibres peut contribuer à la prévention des maladies cardiovasculaires, ainsi qu'au contrôle du diabète et de l'appétit.

L'abricot sec apporte des éléments essentiels comme les glucides vite utilisables, les vitamines du groupe B, du fer, du cuivre et du potassium et sa richesse en fibres.

On tire également de ses noyaux une huile peu grasse qui pénètre facilement, hydrate et revitalise la peau, grâce à sa richesse en vitamine A.

1.8 Variétés des abricots :

D'après Claire Doré et al. ^[25], Il existe plus que 750 variétés d'abricots répertoriées dans le monde.

Selon Lichou ^[56], la première diversification de la culture de l'abricot en France est due à Joseph Sablier, un Lyonnais qui, à la fin des années 1870, importe de sa région d'origine toutes les variétés qui y sont cultivées.

Parmi ces anciennes variétés, citons les caractéristiques des plus connues, Tableau (1.3).



Tableau 1.3: Caractéristiques des vieilles variétés d'abricot.

Variété	Caractères
Le Paviot	Gros à très gros fruit, conique, enflé sur les joues épiderme rouge orangé. Belle variété assez délicate pour le transport. Fruit obtenu d'un semis de Hâtif du Clos, en 1882, à Marcilly d'Arzegues par M. Paviot.
Le Luizet	Fruit volumineux, de forme ovoïde allongée. Une peau légèrement duveteuse, jaune orange ponctuée de rouge pourpre, juteux et sucré.
Le Bourbon	Fruit assez gros, peu parfumé. Maturation irrégulière, souvent fendu par la pluie.
Le Blanc Rosé (Poman Rosé)	Fruit moyen allongé, ovale conique, bien comprimé sur les joues, à dos caréné, assez peu arqué, suture centrale arquée. Epiderme jaune pâle, pourpré, carminé à l'insolation. Chair jaune pâle, fine se détachant bien, saveur relevée et agréable Le Blanc Rosé est très apprécié en confiserie pour sa beauté et sa qualité. Son noyau se détache aisément; toutefois, il pourrit facilement à l'humidité.

En France, il y a une trentaine de variétés parmi les quelles on peut citer les plus couramment produites et par ordre d'arrivée sur les étals:

Early Blush, Tomcot, Orangered, Jumbocot, Kioto, Bergarouge, Polonais ou Orangé pour le bassin Languedoc-Provence et la Drôme provençale, principalement Bergeron en Rhône-Alpes, Rouge, Hélène et Royal du Roussillon.

En Afrique du nord, on retrouve plusieurs variétés, deux particulières (Louzi et Rosé) en Algérie dans le seul massif des Aurès ^[1], l'une à N'Gaous, ouest de l'Aurès, l'autre à Menaâ au centre des Aurès (Sud ouest du chef lieu de la wilaya de Batna). La variété Rosé de Menaâ est unique au Monde par sa blancheur et sa tache rouge.

1.8.1 Maturité de l'abricot

Les fruits des meilleures variétés d'abricot se trouvent rarement frais en dehors de leur aire de production, car ils résistent mal aux nombreuses manipulations requises au moment de l'entreposage et du transport de longue distance.

Les fruits en conserve ou séchés sont donc souvent plus savoureux du fait qu'ils sont récoltés à pleine maturité et qu'ils proviennent de variétés plus goûteuses. C'est également le cas pour les jus.

L'abricot frais devrait être le plus mûr possible, car une fois cueilli, il ne mûrira pas d'avantage, le choisir souple au toucher, coloré, parfumé et à la peau lisse, signes de maturité.

1.8.2 Récolte des abricots :



La méthode la plus courante consiste à secouer les arbres ce qui entraîne une chute brutale des fruits sur le sol dont l'état, par la suite, se dégrade. Cette pratique n'est pas recommandée car elle ne permet pas d'obtenir un produit fini de bonne qualité. Les abricots doivent être cueillis à la main et être délicatement déposés dans les paniers appropriés. La propreté de ces paniers et des mains des cueilleurs est essentielle. Pour obtenir la meilleure qualité possible, les abricots doivent être récoltés mûrs mais cependant encore fermes sans qu'ils ne soient écrasés dans les mains des récolteurs.

1.9 Production des abricots en Algérie

L'Algérie ^[3] avec une production, en 2009 de 202806 tonnes, qui correspond à 3,5% de la production mondiale, occupe la cinquième place mondiale. Malgré cette situation qui paraît favorable, la production algérienne d'abricots demeure faible par rapport au nombre d'abricotier existant et celui implanté récemment dans le cadre du fond de soutien destiné aux agriculteurs et encore loin d'atteindre celle enregistrée dans certains pays du monde.

1.9.1 Production de la région du Hodna

La région du Hodna ^[3] est l'une des zones les plus productives d'abricot en Algérie, cette culture stratégique est héritée d'une génération à une autre. Plusieurs variétés cultivées sont très adaptées et très productives, une partie du surplus de production est transformé en abricot sec.

La wilaya de M'Sila qui constitue l'une des régions les plus prometteuses en matière de production. Elle occupe la deuxième place à l'échelle nationale derrière la wilaya de Batna avec une superficie qui est passée de 2 386 ha en 1994 à 6310 ha en 2004.

L'abricot dans le Hodna, a une place très importante dans la vie quotidienne de la population locale.

Chaque année, le surplus de la production est transféré hors de la wilaya vers les villes limitrophes ou bien passé au séchage, grâce à une production qui a fortement augmenté de 4899 quintaux en 1994 à 216000 quintaux en 2004, soit une augmentation de 97,6 % en 10 ans. Les régions de Nouara et Boukhmissa constituent les principales zones productrices d'abricot dans la wilaya de M'sila, et différentes variétés sont cultivées comme: Bulida, Louzi rouge ou Msili (originaire du Hodna), Tounsi et Paviot.

Le porte-greffe le plus utilisé est le mech-mech ou abricotier franc, ainsi que d'autres porte-greffes, tels que pêcher de Missouri et l'amandier amer.

1.9.2 Production de la région des Aurès



Partie Théorique
Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

Les Aurès et l'Algérois étaient les régions prépondérantes en matière de production d'abricot en Algérie et persistent très longtemps sans concurrent.

La récolte d'abricot a atteint pour la saison 2010 un niveau record de 367 000 quintaux dans la wilaya de Batna. La production aurait pu être encore plus importante au vu des précipitations exceptionnelles enregistrées cette année si ce n'est l'apparition du « *Coryneum* », une maladie cryptogamique à laquelle l'abricot est très sensible, et les chutes de grêlons qui ont affecté certains vergers.

La montée du mercure et l'augmentation du taux d'humidité ont favorisé le développement de ce champignon qui a affecté, sur le plan de la qualité : 10 à 20% des vergers de la wilaya.

Le prix élevé des traitements phytosanitaires et le manque de moyens des petits fellahs ont fait qu'une grande partie des agriculteurs touchés n'a pu lutter efficacement contre ce parasite, affirment des producteurs de la commune de Sefiane.

Selon des arboriculteurs près de cette localité, certains cultivateurs ne se sont même pas aperçus de l'infection de leur champ par le *Coryneum* qui commence par toucher les feuilles de l'arbre avant de s'étendre au fruit en cas de non-traitement. Cependant, ce parasite n'a affecté qu'un nombre limité de vergers. Ce qui permet de prévoir une récolte représentant plus du double de la production de la saison dernière, soit 149 000 quintaux avec, en prime, un fort accroissement des rendements de 120 quintaux à l'hectare contre 41 quintaux par hectare en 2010.

Un nombre de producteurs de la région sud-ouest de la wilaya de Batna (Ras Layoune, Ouled Si Slimane et N'gaous) misent actuellement sur l'exportation de leurs abricots dont la qualité est reconnue sur le marché national, soutiennent des agriculteurs à Sefiane qui estiment que l'actuel défi est de gagner la confiance des opérateurs étrangers.

Ces agriculteurs rappellent que l'abricot de cette région avec celui de Menaâ avait suscité, au cours des dernières années, un vif intérêt auprès d'importateurs européens, même si l'exportation de ce fruit, a été, déplorent-ils, très timide jusqu'ici à cause du manque de promotion et des problèmes de conditionnement.

De plus, l'irrigation des vergers à partir de petits forages, selon des procédés traditionnels, constitue l'autre problème qui tarabuste les paysans de la région.

Ces derniers assurent que le devenir de ce patrimoine arboricole en pleine croissance est tributaire de la réalisation de seguias modernes pour acheminer l'eau du forage principal.



Partie Théorique
Chapitre 1 : Généralités sur l'abricot

L'intervention de l'Etat, dans les années 1990, pour sauver la culture de l'abricot dans la wilaya de Batna, confrontée alors à plusieurs difficultés, avait donné lieu à la mobilisation de 1300 milliards de centimes ayant ciblé 2500 hectares des régions de N'gaous, de Sefiane et de Boumaguer pour la réalisation de forages, de bassins, de retenues et pour l'extension du réseau électrique. L'opération a permis de revitaliser la filière, dès le début de l'actuelle décennie. Une action d'autant plus opportune que les vergers d'abricotiers représentent le quart de la superficie consacrée à l'arboriculture fruitière dans la wilaya de Batna.

1.9.3 Difficultés rencontrées pour commercialiser l'abricot

Les agriculteurs ^[5] et les producteurs d'abricots sont confrontés à de grandes difficultés dans la commercialisation de leurs produits et l'absence d'investissements dans les unités de production conduit à des prix à la récolte à moins de 30 dinars le kilo (année 2011). Selon les services agricoles que malgré la croissance de la superficie des arbres d'abricot qui représentent 42 % ou 8000 hectares d'arbres fruitiers d'une totalité estimée à 19000 hectares et un produit élevé cette année de l'ordre de 53 mille tonnes, on constate toujours l'absence d'unités de stockage et de transformation du produit par des investisseurs privés ou public. En plus du problème du manque de maîtrise des agriculteurs en matière des techniques agricoles et leur dépendance à des moyens traditionnels, on peut se rendre compte de l'ampleur des causes qui ont contribué à empêcher son développement et par suite à améliorer le rendement économique et la qualité du produit.

Le recours à des techniques de conservation rentables est décisif pour lutter contre le gaspillage enregistré au cours des dernières années en matière d'efforts et de produit.

La conservation ^[vi] des aliments comprend un ensemble de procédés de traitement dont le but est de conserver les propriétés gustatives et nutritives et les caractéristiques de texture et de couleur des denrées alimentaires, ainsi que leur comestibilité, et d'éviter d'éventuelles intoxications alimentaires.

1.10 Pourquoi le séchage des abricots

D'après RealAgro ^[vi], l'Algérie a importé pour près de 19 millions de dollars de fruits secs (pruneaux, raisins, pistaches et abricots) durant les cinq premiers mois de 2014, en hausse de 59% par rapport à la même période de l'année précédente, selon les Douanes algériennes. Ces fruits secs sont importés essentiellement de la Turquie, de l'Iran et des Etats-Unis.

La production nationale de fruits frais est importante d'année en année, conséquence positive des différents programmes de développement initiés par le ministère de l'agriculture



et du développement rural. Mais malgré cette production, la transformation en fruits secs demeure très faible et insignifiante. Cette situation est engendrée en partie par l'absence de politique nationale pour la production de fruits secs. Ce qui se traduit par une absence caractérisée d'industrie de transformation agroalimentaire. Il est alors du devoir vers la société algérienne de participer à promouvoir ces richesses en faisant appel aux procédés les plus faisables et non coûteux pour le bien être de notre économie et surtout pour notre sécurité alimentaire.

La production abondante de l'abricot en Algérie nécessite alors un traitement approprié en matière de transformation et le séchage s'impose donc.

1.11 Normes internationales des abricots secs :

1.11.1 Champ D'application :

La présente norme vise les fruits séchés d'*Armeniaca Vulgaris* Lam (*Prunus armeniaca*) ayant subi un traitement ou une transformation convenable et offerts à la consommation directe. Elle s'applique également aux abricots secs conditionnés en vrac et destinés à être reconditionnés pour la vente au détail ou pour la vente directe aux consommateurs.

1.11.2 Description

1.11.2.1 Définition du produit

Par abricots secs, on entend le produit:

- a) préparé à partir de fruits sains et mûrs des variétés issues de *Prunus Armeniaca*.
- b) traité soit par séchage au soleil, soit par toute autre méthode reconnue de déshydratation (même après sulfitation) afin d'obtenir un produit séché marchand.

1.11.2.2 Types variétaux :

N'importe quelle variété appropriée (cultivar) d'abricot peut être utilisée.

1.11.2.3 Modes de présentation :

Les abricots secs doivent être présentés selon l'un des modes ci-après:

- a) entiers, avec noyau.
- b) entiers, sans noyau.
- c) entiers, dénoyautés et fourrés de substances comestibles.
- d) moitiés (oreillons).
- e) morceaux composés de portions d'abricots sains et mûrs, ayant une couleur caractéristique de forme, de dimension et d'épaisseur irrégulières à l'exclusion de fruits entiers.

1.11.3 Critères de qualité :

1.11.3.1 Teneur en eau (kg d'eau/kg de produit)

- a) Abricots secs non soufrés non traités à l'acide sorbique à 0.20 au maximum.



b) Abricots secs soufrés et/ou traités à l'acide sorbique à 0.25 au maximum.

1.11.3.2 Facteurs de qualité - spécifications générales :

a) Couleur caractéristique de la variété et du type de traitement.

b) Saveur et odeur caractéristiques du produit.

e) Absence d'insectes.

f) Impuretés minérales : non tolérées dans la mesure où la qualité comestible ou l'utilisation du fruit est matériellement affectée.

g) Matières étrangères : absence virtuelle de matières végétales étrangères, de débris d'insectes et d'autres substances non admises.

1.11.4 Définition des défauts:

a) **Fruit endommagé** : fruit affecté par tout dommage ou lésion de la surface provoqué par des facteurs tels que l'action de la grêle, etc., et affectant plus de 5 mm² de la surface du fruit.

b) **Fruit brisé** : fruit affecté par tout dommage résultant d'une coupe défectueuse ou de toute autre action mécanique.

c) **Fruit immature** : fruit dont la teneur en sucre est généralement insuffisante et qui peut avoir un goût acide.

d) **Fruit endommagé par les insectes** : fruit affecté par un dommage causé par des insectes ou contenant des cadavres d'insectes, d'acariens, etc.

e) **Fruit moisi** : fruit qui est visiblement affecté par des moisissures ou la pourriture.

f) **Fruit sale** : fruit souillé par des malpropretés incrustées ou toute autre matière étrangère.

1.11.5 Conditionnement :

Il suffit d'emballer les fruits secs dans un simple sac en plastique avec une étiquette attrayante.

Le plastique du sac doit cependant être suffisamment solide pour résister à la dégradation lors de manipulations ou stockage. L'utilisation de sacs plastiques thermo soudés permet une présentation plus soignée.



Chapitre 2
*Généralités sur le
Procédé de Séchage*

2.1. Définition du séchage

La déshydratation est la méthode la plus ancienne de conservation des aliments pratiquée par l'homme. Pour des milliers d'années il a séché les viandes, les poissons, les fruits et les légumes, pour le soutenir pendant hors des périodes de saison par année. Aujourd'hui la section de déshydratation de l'industrie alimentaire est grande et s'étend à tous les pays du globe ^[90].

La déshydratation (ou le séchage) est définie comme l'application de la chaleur dans des conditions commandées pour enlever la majorité de l'eau dans un aliment par évaporation ^[33].

Il est courant de faire une distinction entre le séchage par ébullition et le séchage par entraînement :

- Pour le séchage par ébullition, la pression de vapeur du solvant est égale à la pression régnant dans le sécheur. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100 °C pour l'eau à $1,013 \times 10^5$ Pa) ;
- Pour le séchage par entraînement, le produit à sécher est mis en contact avec un gaz en mouvement. Ce gaz est en général conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit et la pression de vapeur du solvant inférieure à la pression dans l'enceinte de séchage ^[22].

Dans le cas des denrées alimentaires, le séchage est un procédé très ancien visant la conservation et la stabilisation des denrées périssables par abaissement de leur activité d'eau jusqu'à une valeur inférieure à 0,5. Pendant le processus de séchage, l'eau est enlevée sous forme de vapeur par l'air.

Le séchage des produits peut être obtenu ^[41] :

- *Par évaporation ou par ébullition:*
 - Sous pression atmosphérique à l'aide d'un courant d'air chaud,
 - Sous vide par chauffage :
 - ✓ Par contact direct avec une surface solide chaude
 - ✓ Par rayonnement ;
- *Par sublimation lors de la lyophilisation.*

2.2. Objectif de séchage



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

Le but est réalisé en réduisant l'humidité disponible, ou l'activité de l'eau à un niveau qui empêche la croissance et le développement de la détérioration et les micro-organismes pathogènes, réduisant l'activité des enzymes et le taux auxquels les changements chimiques indésirables se produisent. L'emballage approprié est nécessaire pour maintenir le bas a_w pendant le stockage et la distribution ^[12].

les principaux objectifs technologiques de la déshydratation des produits alimentaires ^[90], sont :

- La préservation des aliments comme étant le résultat d'une réduction de l'activité d'eau ;
- Réduction de poids et volume des aliments ;
- Transformation d'un aliment à une forme plus commode pour stocker, emballer, transporter et employer, par exemple transformation des liquides tels que l'extrait de lait ou de café, à une poudre sèche qui peut être reconstituée à la forme originale par l'addition de l'eau (produits instantanés) ;
- Donnant à un produit alimentaire souhaitable tel qu'une saveur, et texture différents etc., c.-à-d. créant un nouvel aliment (par exemple transformation des raisins aux raisins secs).

2.3. Avantages et inconvénients du séchage

2.3.1. Avantages

Les avantages du séchage sont résumés par **Brennan (2006)** ^[12], comme suit:

- Le séchage augmente la durée de conservation de l'aliment par une stabilisation des produits. L'abaissement de l'activité de l'eau a pour effet d'inactiver les enzymes et de stopper le développement de la flore microbienne. La conservation optimale de nombreux produits biologiques est située à un intervalle d'activité d'eau comprise entre 0,2 et 0,35 ;
- Une standardisation de produit final (teneur en eau constante, produit fini homogène) ;
- Une diminution de la masse et le volume de produit ce qui facilite le transport et le stockage de ce dernier ;
- Dans quelque cas, une présentation particulière est donnée au produit.

2.3.2. Inconvénients



Les auteurs **Belala** et **Bedjou (1989)** cités par **Ounissi (2009)** ^[68], résument les inconvénients du séchage :

- Perte de vitamine A (3% pour les légumes) après 6 mois de conservation.
- Altération de la vitamine B1 (10 à 20 %).
- Perte de la vitamine C (35%).
- Insolubilisation des protéines entraînant le goût de cuit.
- Migration des constituants solubles.
- Formation d'une couche gommeuse imperméable suite à un séchage rapide.
- Concentration de la coloration.
- Réaction de Maillard (brunissement) suite à une surchauffe.
- Coût énergétique élevé ^[12].

2.4. Cinétique de séchage

L'étude expérimentale de la cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit alimentaire donné au cours de sa déshydratation par les courbes illustrées dans la figure (4).

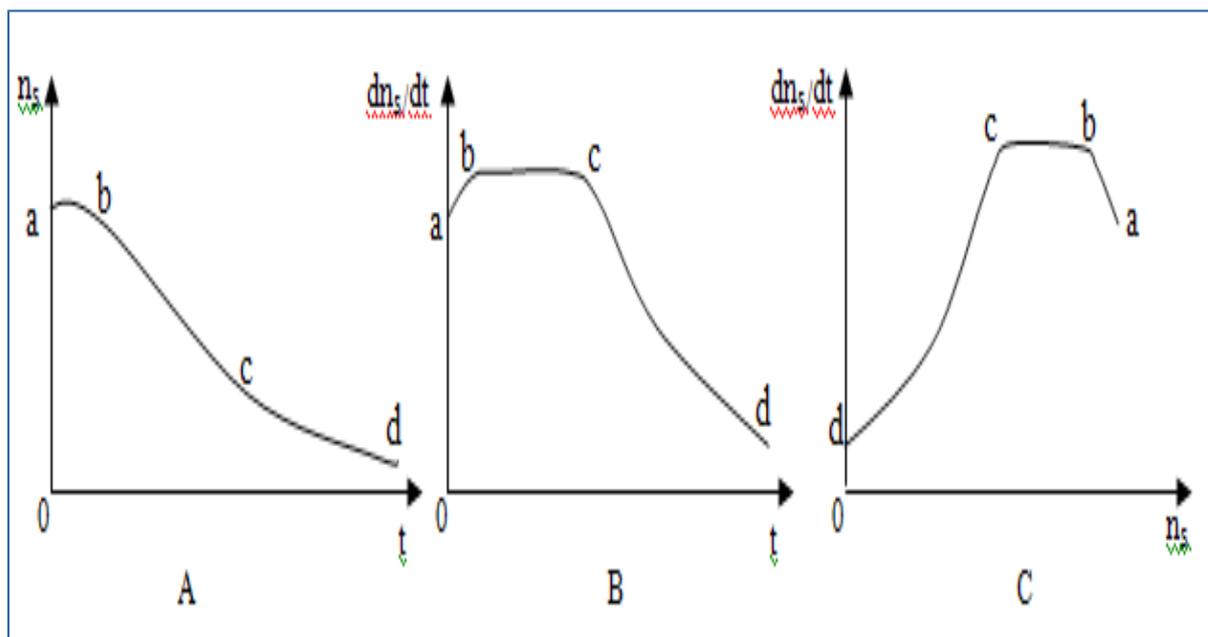


Figure 4 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (A), l'allure de séchage (B) et l'allure de séchage en fonction du taux d'humidité (C) ^[22].

Les courbes types utilisées pour décrire l'évolution du produit (**figure 4**) au cours du séchage sont:



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

- Le taux d'humidité du produit (n_s ou X) en fonction du temps (t), on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure [4(A)].
- L'allure de séchage (dn_s/dt ou dX/dt) en fonction du temps (t), on peut obtenir une nouvelle courbe qui est donnée sur la figure [4(B)].
- L'allure de séchage (dn_s/dt) en fonction du taux d'humidité (n_s) conduit à la courbe représentée sur la figure [4(C)].

2.4.1. Périodes de séchage

Il est couramment admis la présence de trois périodes de séchage ^[78] :

2.4.1.1. Période 0 (a-b) de mise en température du produit, absente lorsque le produit est en particules ou en feuilles. En général, lorsqu'il est introduit dans le séchoir, le produit est froid et par conséquent sa pression de vapeur d'eau en surface est faible d'où le transfert lent de matière.

Par ailleurs, le gradient de la température entre l'air et le produit est élevé d'où le transfert actif de chaleur. L'énergie apportée en excès par l'air sert à échauffer le produit jusqu'à ce que la différence de température diminue.

2.4.1.2. Période I (b-c) de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. L'activité d'eau à la surface du produit est proche de l'unité, sa température est uniforme et égale à la température de thermocouple humide de l'air. Au terme de cette période on peut définir la teneur en eau critique du produit.

Cette période est généralement absente pour les produits alimentaires et biologiques. En fait, la résistance des parois cellulaires et l'obstruction des pores engendrés par la migration des solutés et par le croûtage qui apparaît en surface limitent la migration d'eau interne.

2.4.1.3. Période II (c-d) de séchage à vitesse décroissante : l'activité de l'eau en surface du produit est inférieure à l'unité et les transferts internes de matière deviennent limitant, la température augmente dès la surface du produit au centre jusqu'à tendre asymptotiquement vers la température de l'air. La teneur en eau (exprimée par rapport à la masse anhydre du produit) diminue jusqu'à atteindre une valeur limite qui dépend des conditions de la température et de l'humidité relative de l'air de séchage.

Certains produits alimentaires ne présentent pas ces trois périodes. La période à vitesse de séchage constante n'a pas été détectée dans les courbes de séchage de la menthe, la carotte,



le maïs, la tomate, les champignons, l'ail, l'oignon, l'épinard, le poivron vert, le poivron rouge, le potiron, le poivron jaune, les petits pois, le poireau, ...etc ^[66].

2.4.2. Représentation des différentes étapes par le diagramme de l'air humide

➤ **Principes**

Au cours du séchage, l'air subit des modifications d'état portant sur sa température et son taux d'humidité. Les diagrammes de l'air humide permettent de suivre l'évolution de ces paramètres sans avoir recours à des calculs fastidieux. Bien que les définitions qui suivent soient applicables à tous les couples « gaz - humidité », il ne sera fait mention ci-après que du mélange (air - eau).

D'après **Charreau et Cavaille (2003)** ^[22], les diagrammes de l'air humide permettent de déterminer les caractéristiques suivantes :

- **Température sèche** : c'est la température indiquée par une sonde nue placée dans l'air.
- **Température humide** : c'est la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche humidifiée en permanence par de l'eau pure et placée dans un courant d'air. Cette température est en général inférieure à la température sèche du fait de l'évaporation endothermique de l'eau placée sur la sonde.
- **Enthalpie** : cette grandeur représente le contenu énergétique de l'air humide.
- **Température de rosée** : c'est la température à laquelle se condense l'humidité contenue dans l'air.
- **Humidité relative** : c'est le rapport de la pression de vapeur d'eau à une température donnée à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température.

2.5. Transfert de chaleur et de matière

Les phénomènes de transfert mis en jeu au cours du processus de séchage peuvent être répartis en deux catégories : le transfert de chaleur et le transfert de matière :

2.5.1. Transfert de chaleur

La chaleur peut être transférée par trois modes différents: la conduction, la convection, et le rayonnement.

Tous les modes de transfert de chaleur exigent l'existence d'une différence de température.

Ci-dessous nous donnons une brève description de chaque mode ^[19].

2.5.1.1. Conduction



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervient dans la transmission.

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides où entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais, sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux, son effet est marginal par rapport à celui de la convection ^[22].

La conduction est définie par la loi de Fourier :

$$Q_x = -kA \, dT / dx \quad (1)$$

Avec :

Q_x : quantité de chaleur (W).

k : coefficient de conductivité thermique (W/m.°C).

A : section perpendiculaire du flux de chaleur (m²).

dT : différence de température (K).

dx : épaisseur (m).

2.5.1.2. Convection

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface solide et l'adjacent liquide ou gaz qui est en mouvement, elle implique les effets combinés de la conduction et le mouvement du fluide. Plus le mouvement du fluide est rapide, plus le transfert de chaleur par convection est important. La convection est appelée forcée si le liquide est forcé de s'écouler sur la surface par des moyens extérieurs tels qu'un ventilateur, une pompe ou le vent.

Alors, qu'elle est appelée convection naturelle (ou libre) si le mouvement du fluide est due par les forces de flottabilité qui sont induites par les différences de densité due à la variation de la température dans le fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton ^[47] :

$$\varphi = hA(T_p - T_\infty) \quad (2)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m⁻² °C⁻¹).

T_p : Température de surface du solide (°C).

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (°C).

A : Aire de la surface de contact solide/fluide (m²).



2.5.1.3. Rayonnement

Le rayonnement est l'énergie émise par la matière sous la forme d'ondes électromagnétiques (photons) à la suite des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules. Contrairement à la conduction et la convection, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un support intermédiaire. En fait, le transfert d'énergie par rayonnement est plus rapide (à la vitesse de la lumière) et il ne subit aucune atténuation dans le vide ^[19].

Dans les études de transfert de chaleur nous sommes intéressés par le rayonnement thermique, qui est sous forme de rayonnement émis par les corps en raison de leur température ^[9]. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi suivante ^[47] :

$$\varphi = \sigma \varepsilon A (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/ m² K⁴).

ε : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface (K).

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K).

A : Aire de la surface (m²).

2.5.2. Transfert de matière

Lors du séchage, l'eau est transférée à la surface du produit sous forme de liquide (eau libre) et/ou sous forme de vapeur (eau libre et eau liée). Lorsque l'eau est présente en quantité suffisante dans le produit, elle diffuse de l'intérieur vers la surface sous l'effet du gradient de concentration.

Pour des faibles teneurs en eau, ce sont les forces capillaires qui assurent le transfert. Alors que l'eau liquide présente sous forme d'ilots discontinus ainsi que l'eau liée après sa désorption, diffusent sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau ^[41].

Selon **Bimbenet et al. (2002)** ^[19], la migration de l'eau obéit à la première loi de FICK :

$$Mb/A = -D dc/dx \quad (4)$$

Avec :

Mb : le débit massique (Kg/S).



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

A : la section (m^2).

D : coefficient de diffusion (m^2/s).

dc : différence de concentration (g/l).

dx : différence d'épaisseur (m).

Au cours du séchage et pendant la phase à vitesse de séchage constante, l'eau diffuse au sein du produit vers sa surface externe.

Pendant la phase à vitesse de séchage décroissante l'eau se déplace du centre de produit vers la surface sous forme de vapeur ^[22], car il n'y a pas d'eau libre à la surface du produit.

Le déplacement de l'eau est assuré par :

- Un mouvement d'eau liquide par force de capillarité.
- Une différence de concentration en soluté dans les différentes régions du produit.
- Une diffusion d'eau liquide adsorbée dans les couches de surface par les composés de l'aliment.

2.5.2.1. Migration de vapeur d'eau

Selon **Bimbenet et al. (2002)** ^[19], la vapeur migre par convection dans les pores et par diffusion à travers les parois séparant les pores. Au cours du séchage, la diffusion de vapeur est assurée par gradient de pression de vapeur.

2.5.2.1.1. Teneur en eau

Aucun produit agricole dans son état naturel n'est complètement sec, l'eau est toujours présente. Deux méthodes sont utilisées pour calculer sa teneur en eau : en base humide (bh) ou en base sèche (bs). En outre, la teneur en eau peut être exprimée en pourcentage ou comme un rapport décimal ^[87].

2.5.2.1.2. Activité de l'eau

La disponibilité de l'eau dans le produit est un meilleur indicateur de sa nature périssable et qui favorise les activités de dégradation telles que l'action microbienne. L'activité de l'eau est un terme largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme un indicateur de disponibilité de l'eau dans un produit ^[87].

L'activité de l'eau (a_w) dans le produit est définie par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs}) ^[84].

$$a_w = P_{vp} / P_{vs} \quad (5)$$

Avec :

P_{vp} : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit;

P_{vs} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé.



Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport l'est beaucoup moins.

Dans le même ordre d'idées, ils ne justifient que l'humidité relative H_r (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) d'une atmosphère est donnée par l'expression ^[87]:

$$H_r = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \times 100 \quad (6)$$

2.5.2.2. Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps soumis pendant une longue période à une température et une humidité relative constantes, atteindra finalement un taux d'humidité en équilibre avec l'air environnant. Cela ne signifie pas que le corps et l'air ont la même teneur en humidité, il signifie simplement qu'une condition d'équilibre existe de manière qu'il n'y ait pas d'échange net de l'humidité entre le corps et l'air. Cette teneur en eau d'équilibre est en fonction de la température, l'humidité relative et le produit ^[87].

2.6 Isothermes de sorption

La relation liant ces deux notions à une température donnée est l'isotherme de sorption ; caractéristique d'un produit donné, courbe modélisable et utilisée pour la prédiction de la stabilité ou la formulation.

2.6.1 Relations eau-produit

La structure initiale de l'eau pure lui confère des propriétés particulières. C'est une petite molécule qui possède des charges électriques réparties entre les atomes d'oxygène et d'hydrogène suivant une géométrie tétraédrique. Cette configuration permet des associations entre les molécules d'eau ou avec d'autres molécules de type polaire ou hydrophile par la formation de liaisons hydrogènes ^{[6], [7]}.

Il s'agit de liaisons faibles (dix fois moins énergétiques qu'une liaison covalente) de type électrostatique. L'existence de liaisons hydrogènes permet d'expliquer des propriétés de l'eau liquide et de l'eau mélangée à des solides.

Selon les théories récentes, la structure de l'eau liquide résulte d'un mélange de molécules isolées et de micro gels fluctuants permettant d'expliquer les originalités de ce liquide tel que le minimum de densité à 4°C. Cependant, la nature de liquide structuré est rapidement détériorée par la présence de solutés, et l'eau se comporte comme un liquide normal dans des solutions à 10% de solutés au plus.



2.6.2 L'eau et ses différents états de liaison

- Eau fortement liée aux molécules organiques (eau de la monocouche) : forte énergie de liaison de 4 à 6 kJ.mole⁻¹. Eau non congelable. Très difficile à retirer, présente dans les aliments déshydratés.
- Eau moyennement liée aux molécules d'eau de monocouche, énergie de liaison de 1 à 3 kJ.mole⁻¹, mobilité faible, eau peu congelable, participation limitée aux réactions chimiques.
- Eau libre retenue par capillarité, très faible énergie de liaison de 0 à 0.3 kJ.mole⁻¹. bonne mobilité, eau congelable, participe aux réactions chimiques et à la propagation des micro-organismes.

2.6.3 Calcul de la teneur en eau d'un produit

La teneur en eau est exprimée par la masse d'eau présente dans le produit par rapport à la matière sèche ou à la matière totale. En laboratoire, il est d'usage d'utiliser la matière sèche. Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse totale m :

- Une masse m_e d'eau
- La masse restante $m_s = m - m_e$ appelée masse anhydre ou masse sèche.
Comme pour l'air humide, on définit l'humidité ou teneur en eau du produit (en base sèche) par :

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad (7)$$

L'humidité d'un produit peut aussi être définie par la teneur en eau en base humide

$$X_h = \frac{m_e}{m} \quad (8)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad \text{et} \quad X_h = \frac{X}{1 + X} \quad (9)$$

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche, lorsque l'on parlera de teneur en eau sans autre précision il s'agira donc de cette dernière ^[6].

2.6.4 Analogie activité de l'eau-humidité relative

Considérons un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre, P_v , T , P_a et T_a étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air.

L'équilibre impose :

$$T = T_a \text{ (pas de transfert de chaleur), } P_v = P_a \text{ (pas de transfert de masse)}$$

Or l'humidité relative Hr de l'air s'écrit :



$$Hr_a = \frac{P_a}{P_p(T_a)} \quad (10)$$

D'où l'on déduit en comparant les équations (10) et (5) :

$$Hr_a = a_w \quad (11)$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. L'intérêt de cette grandeur est qu'elle varie faiblement avec la température alors que la pression de vapeur d'eau P_v varie fortement ^[7].

Par ailleurs, pour qu'un produit alimentaire puisse se conserver, son activité doit en général être abaissée en-dessous de **0.6**, seuil en-dessous duquel les moisissures ne peuvent plus se développer.

2.7 Mesure de l'activité de l'eau

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques de nombreuses substances, telles entre autres la fluidité, la coagulation, la cohésion et l'électricité statique.

La capacité de conservation des aliments, la stabilité des couleurs, du goût, la teneur en vitamines, l'arôme et les conditions favorables à la formation de moisissures et à la croissance des microbes sont directement influencés par la valeur a_w (water activity).

L'activité de l'eau est un facteur critique qui détermine directement la conservation des aliments.

La température, le pH et quelques autres facteurs ont une certaine influence sur la possibilité et le taux de croissance d'un organisme dans des denrées. L'activité de l'eau représente le plus important de ces facteurs.

L'humidité d'équilibre d'un matériau hygroscopique joue dans ce processus un rôle important.

On entend par humidité d'équilibre l'humidité relative qui doit régner dans une atmosphère environnante pour empêcher tout échange d'eau entre les matériaux et l'air. Il est donc clair que pour assurer une bonne conservation et stockage de produits, le climat ambiant ne doit pas dépasser les valeurs limites établies par la mesure de l'activité de l'eau.

L'activité de l'eau est, par définition, pratiquement identique à l'humidité d'équilibre, elle n'est toutefois pas exprimée en pourcentage (0 à 100%), mais de 0 à 1.0 a_w .

2.7.1 Où mesure-t-on l'activité de l'eau

La valeur a_w est un critère essentiel pendant les travaux de la recherche médicale ainsi que lors de la fabrication de nombreux médicaments sous forme de comprimés ou de capsules.

Seule la détermination de la valeur a_w permet de fournir des renseignements sur la présence d'eau "libre", donc chimiquement non liée. Par ailleurs, l'activité de l'eau influence de manière significative la durée de conservation des produits alimentaires.



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

Ceci concerne entre autres les pâtisseries, les sucreries, les fromages, le café, les produits laitiers, les fruits lyophilisés, la farine, les céréales, la viande, les champignons, les noix, l'huile alimentaire, le riz, la charcuterie, les produits instantanés, les épices et le thé.

2.7.2 Comment mesure-t-on l'activité de l'eau

Normalement, l'activité de l'eau est mesurée sur de petits échantillons enfermés hermétiquement dans un compartiment de mesure muni d'un élément sensible d'humidité.

Lors de la mesure successive de plusieurs échantillons, l'élément sensible traverse un cycle d'humidité complet à chaque mesure. Cette opération ne doit ni influencer l'exactitude de la mesure, ni provoquer une hystérésis du signal de sortie.

Enfin, les additifs volatiles ne doivent pas influencer l'élément sensible. La mesure de la valeur a_w , c'est-à-dire de l'humidité d'équilibre dans le produit, permet par exemple d'optimiser un processus de séchage ou d'ajuster les conditions climatiques d'un entrepôt. Le contrôle de l'activité de l'eau garantit ainsi une haute qualité constante des produits.

2.8 Teneur en eau - Activité de l'eau

Pour un produit déterminé, il existe un rapport direct entre la valeur a_w et la teneur en eau en pourcentage pondéral X [kg eau/kg base sèche] à l'état d'équilibre noté aussi X_{eq} .

Ce rapport est connu sous l'appellation : Isotherme de sorption. Celle-ci peut être représentée soit sous forme de courbe, soit sous forme de tableau.

Pour chaque valeur d'humidité, une isotherme de sorption indique la teneur en eau du matériau, à une température constante donnée.

Toute modification de la composition ou de la qualité du matériau entraîne également une modification de la sorption.

En raison de la complexité des procédures de sorption, les isothermes ne peuvent pas être déterminées par le calcul, mais doivent être définies de manière expérimentale pour chaque produit.

Ainsi, la teneur en eau et l'activité de l'eau sont à considérer dans la pratique comme deux paramètres indépendants dont la relation réciproque est fournie par l'isotherme de sorption. Le choix de la méthode dépend essentiellement du problème à résoudre.

2.9 Représentation des isothermes de sorption

2.9.1 Définition

L'activité d'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et sa température T . Selon ^[47], la courbe représentant pour une température T donnée, la teneur en



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

eau X en fonction de la valeur de l'activité d'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air H_r en équilibre est appelée :

- Isotherme d'adsorption : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

La teneur en eau et l'activité de l'eau sont deux notions importantes pour contrôler les procédés de fabrication de produits alimentaires des matières premières aux produits finis leur mesure fait appel à différentes méthodes avec des conditions opératoires bien définies et/ou conventionnelles selon le type de produit ¹⁹⁰. Leur précision ; leur fiabilité ; le besoin d'échantillon représentatif rendent ces mesures délicates.

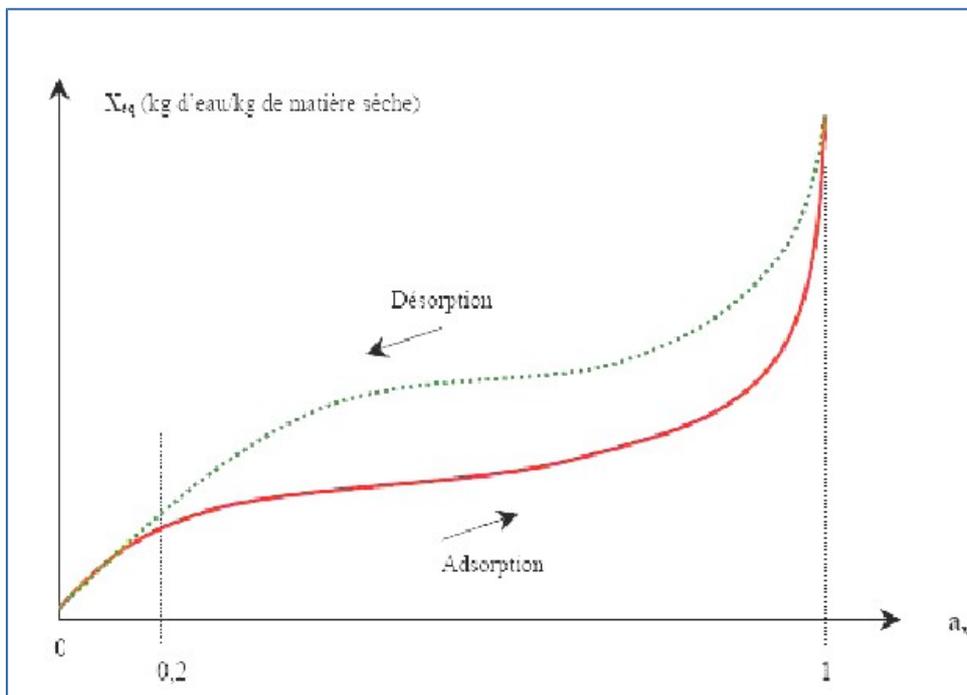


Figure 5 : Allure générale des isothermes de sorption

Les deux courbes sont en général différentes (figure 5) car le séchage d'un produit (passage d' $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles ^[63].

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec à T_a , Hr_a . La connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau



d'équilibre X_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau X du produit en fin de séchage. La valeur de X_{eq} est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage.

2.9.2 Forme et modèles des isothermes de sorption

2.9.2.1 Forme générale des isothermes

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

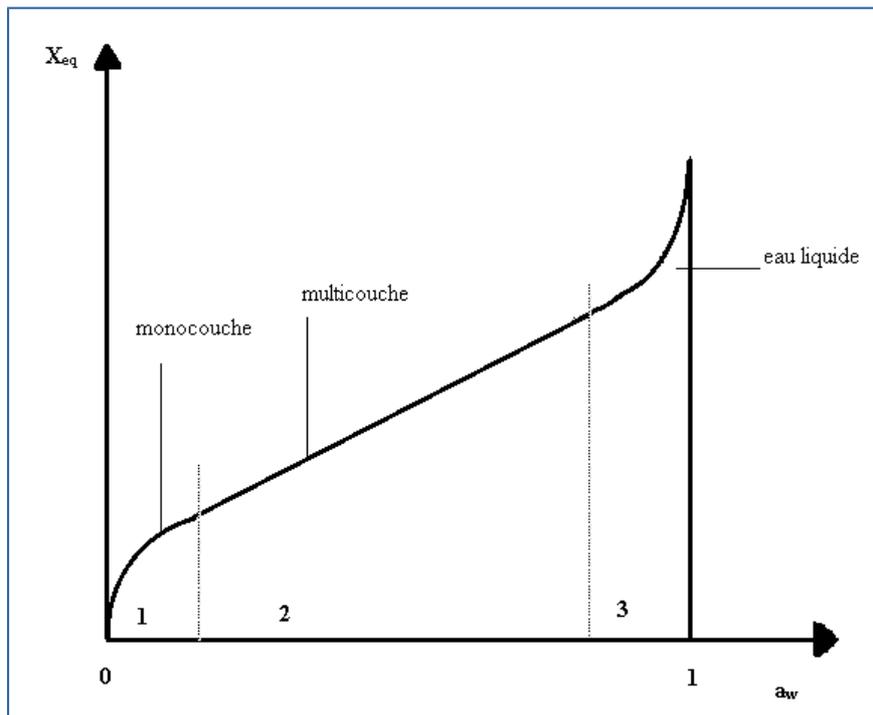


Figure 6 : Différentes zones des isothermes de sorption

- Zone 1 : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit.
L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores du produit.
L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- Zone 2 : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- Zone 3 : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue.



2.9.2.2 Modélisation des courbes de sorption

Les isothermes de sorption résultent de la sorption réversible de molécules d'eau sur les solides : adsorption physique, condensation capillaire, formation de solutions, de solutions solides ^[22].

Compte tenu de la complexité de la structure d'un aliment multi composant ; les isothermes de sorption sont représentatives seulement du matériau testé.

Elles sont classiquement du type sigmoïde (céréales), moins souvent de type croissant. Ce dernier cas correspond par exemple à un produit solide capillaire ou poreux pouvant retenir beaucoup d'eau à faible a_w (anti mottant) ; ou à la sorption d'eau sur une substance cristallisée avec peu d'eau adsorbée, jusqu'à dissolution.

Les courbes montrant que la majorité de l'eau présente dans les aliments exerce une pression de vapeur d'eau voisine de celle de l'eau pure.

Ce ne sont pas que 10 à 20 % de l'eau restant adsorbée qui pose problème par exemple en augmentant les durées de séchage.

Cette région correspond à la sorption d'une couche mono moléculaire avec fortes liaisons hydrogène (4-6 kJ/mol). Puis au-delà de cette zone, il y a addition de couches d'eau supplémentaires (1-3 kJ/mol). La portion de courbe est linéaire.

Enfin ; pour les plus fortes valeurs ($a_w > 0,6$), il y a condensation d'eau dans les pores (0,3 kJ/mol), dissolution des éléments solubles et risques de réactions, de contamination.

La courbe est aussi asymptotique. Il est donc très difficile de décrire ces courbes par un seul modèle ^[6].

2.9.2.3 Les modèles

Les modèles rencontrés dans la littérature sont empiriques ou théoriques. Ces modèles permettent de représenter les courbes d'activité de l'eau en fonction de la teneur en eau (et parfois de la température) pour étudier la cinétiques d'une réaction chimique ou un phénomène physico-chimique, en fonction de la température et de l'activité de l'eau (ou de la teneur en eau).

Deux modèles de base sont généralement utilisés :

1. Le modèle B.E.T. (Brunauer-Emett-Teller) à deux paramètres, particulièrement intéressant pour l'étude de la partie des courbes relatives aux faibles teneurs en eau (<0,4-0,5) :

$$X = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1 - a_w)(1 + (C_{BET} - 1) a_w)} \quad (12)$$

Le coefficient C_{BET} est un paramètre ajustable, X_m correspond à la teneur en eau pour une monocouche absorbée.



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

A l'origine ce modèle correspond à l'adsorption physique de gaz interne sur des surfaces solides. Il est basé sur deux mécanismes, adsorption d'une couche mono moléculaire, suivie d'autres couches.

La relation peut aussi s'écrire sous forme linéaire

$$\frac{a_w}{X(1-a_w)} = \frac{1}{(X_m \cdot C)} + \frac{(C-1)a_w}{(X_m \cdot C)} = f(a_w) \quad (13)$$

D'où l'on peut déduire X_m .

2. Le modèle GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) à 3 paramètres, considéré comme une extension du modèle B.E.T., permet de bien représenter les courbes de sorption jusqu'à une activité de 0.80 à 0.85 :

$$X = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (14)$$

Où X_m est la teneur en eau correspondant à la monocouche, C et K sont des paramètres dépendant de la température.

$$C = C_0 \exp \frac{\Delta Hk}{RT} \quad (15)$$

$$K = K_0 \exp \frac{\Delta Hk}{RT} \quad (16)$$

Avec C_0 et K_0 constantes,

$$\Delta Hc = Hm - Hn \quad (17)$$

$$\Delta Hk = l - Hn \quad (18)$$

Où l est la chaleur de condensation de l'eau pure, Hm et Hn sont les chaleurs de sorption respectivement de la monocouche d'eau et la multicouche.

De nombreux travaux discutent de l'utilisation des modèles BET et GAB, le plus souvent pour des produits particuliers. Un modèle GAB modifié (remplacé par $-\ln(1-a_w)$) et le modèle proposé par Peleg (1993) à 4 paramètres permettent d'étendre le domaine jusqu'à 0,95 [6].

$$X = A.a_w^c + B.a_w^d \quad (19)$$

Languimar propose aussi un modèle en 1916 [6], [7] :

$$X = l/[A+B.a_w^{c-l}] \quad (20)$$

Lewicki (1998) propose un modèle à 3 paramètres comportant 2 termes représentant le phénomène de sorption selon 2 procédés parallèles, d'importance variable, à a_w faible et forte. Il représente bien les forts a_w .



Partie Théorique
Chapitre 2 : Généralités sur le procédé de séchage

Un autre modèle basé sur la loi de Raoult ne comporte que 2 paramètres ^[55].

De nombreux modèles existent comme ceux proposés par Halsey, Oswin, Henderson, (Chen et Jayas ; 1998 ; Menkov, 2000 ; Baucour, 2002). Ils sont mieux appropriés pour certains produits mais n'apportent pas de solution idéale couvrant tout le domaine.



Chapitre 3
*Séchage des fruits et
légumes*

3.1. Séchage des fruits et légumes

Le séchage des produits alimentaires a fait l'objet de très nombreuses recherches sur divers produits. Citons, sans être exhaustif l'ail (**Hanachi, 2009**), les dattes (**Chekroune, 2008**), la pomme de terre (**Benmadi, 2009**), la tomate (**Cernișev, 2010**), la noix de coco (**Jena et Das, 2007**), les carottes (**Arevalo et Murr, 2007**), la banane (**Swasdisev et al., 2009**), la pomme (**Laurienzo et al, 2010**), l'abricot (**Fahloul et al.,2009**) et beaucoup d'autres produits.

Les fruits frais (matières premières) sont caractérisés par une teneur en glucides de 12 % (abricots) à 16 à 20 % (prunes, raisins, figes, bananes). La déshydratation amène la teneur en glucides à près de 60 à 70 %, teneur proche de celle des confitures. Dans l'ensemble, les constituants vont subir une concentration proche de 4, sauf ceux qui sont oxydables comme la vitamine C, détruite au cours des traitements ^[86].

Pour que les produits séchés soient stockés à l'air ambiant, leur teneur en eau doit être inférieure à 35 % ^[86].

En Algérie, les fruits tels que : abricots, raisins et figes sont traditionnellement séchés en les exposant directement au soleil. Néanmoins ce mode de séchage présente des inconvénients du fait que le produit obtenu est de qualité médiocre, et généralement contaminé par des poussières et insectes et parfois endommagé par des intempéries ^[34]. Un diagramme de séchage des fruits a été élaboré par **Brennan (2006)**.

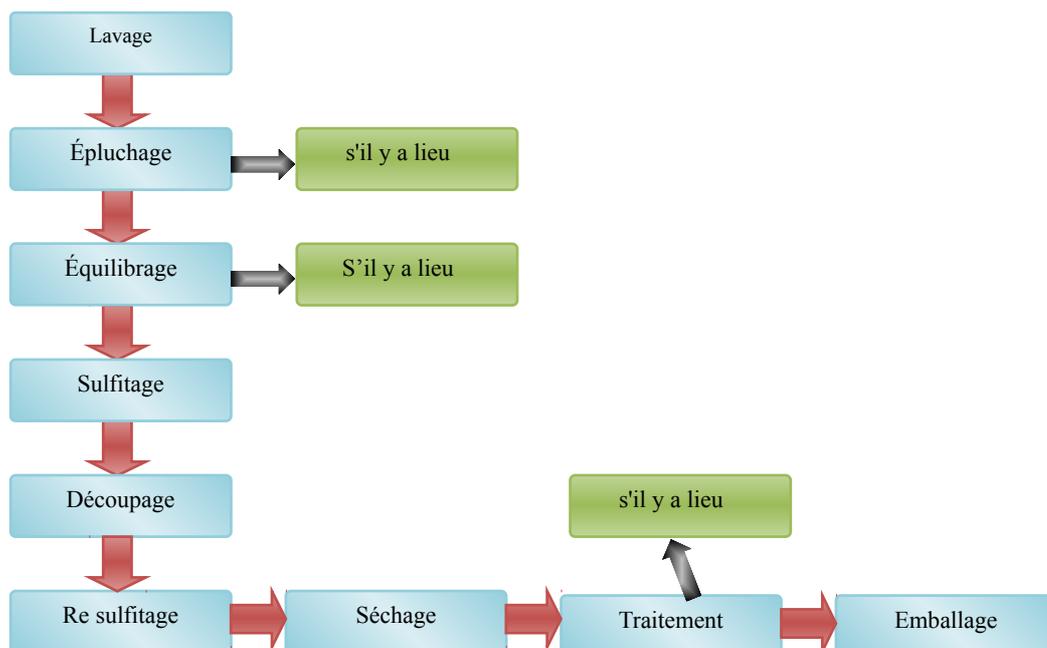


Figure 7 : Diagramme de séchage des fruits ^[12].



3.2. Séchage solaire

Dans les pays méditerranéens la technique traditionnelle du séchage de fruit et de légume est en employant le soleil.

Cette technique a les avantages de la simplicité et des investissements de capital de petit équipement, mais elle a besoin un long temps de séchage qui peuvent avoir des conséquences défavorables à la qualité du produit: le produit final peut être souillé par la poussière, les insectes, les enzymes et les microorganismes ^[30].

Le séchage solaire des produits agricoles est un des applications potentielles les plus importantes au Sahara algérien ^[10], ce processus n'est pas très hygiénique. Cependant, il est touché par les problèmes incorporés, puisque le produit est non protégé de la pluie, de l'orage, de la saleté, de la poussière, et de l'infestation par des insectes, des rongeurs, et d'autres animaux (**Boughali et al., 2008**).

Il peut avoir comme conséquence les changements structurels physiques dans le produit tel que le rétrécissement, la perte de volatiles et de composants d'éléments nutritifs et abaisser la réabsorption de l'eau pendant la réhydratation.

Par conséquent, la qualité du produit séché au soleil est dégradée et parfois devient non appropriée à la consommation humaine (**Perumal, 2007**).

Ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'un séchoir solaire à convection naturelle ou à convection forcé qui peut réduire des pertes de récolte et améliorer la qualité du produit sec sensiblement comparé aux méthodes de séchage traditionnelles.

Une bonne maîtrise relative de l'opération de séchage avec le séchoir forcé par rapport au séchoir naturel a été constatée.

L'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant, paramètres influents lors du transfert de chaleur et de masse, a été mise en évidence ^[10].

Hilaire (2008), résume les avantages et les inconvénients des différents séchoirs solaires au tableau (III.1).



Tableau (III.1) : Avantages et inconvénients des différents séchoirs solaires ^[44].

	Séchage naturel	Séchoir solaire direct	Séchoir solaire indirect
Avantages	- Matériel facile à construire par le producteur lui-même. - Très faible coût du matériel	- Fiable et résistant. - Peu d'entretien.	- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. - Conserve mieux la couleur
	- Aucun contrôle du	-Efficacité du séchage	- Coût important

3.4. Brunissement enzymatique

3.4.1 Définition

C'est la transformation des composés phénolique en polymères brun ou noir, quelquefois rose, rouge ou bleu noir.

Le brunissement enzymatique ne s'observe que chez les végétaux. Il affecte la qualité des fruits et légumes par coloration due aux polymères et intervient particulièrement chez les fruits et légumes endommagés, notamment par les traitements, soit par pelage, découpage, broyage ^[23].

Alors que l'oxygène est essentiel pour la vie, il est aussi un facteur important de dégradation des aliments puisque les tissus animaux et végétaux déstructurés par des traitements technologiques deviennent très oxydables. Ces réactions, d'origine enzymatique, modifient les propriétés organoleptiques (couleur, arômes...) et nutritionnelles (destruction d'acides gras ou de vitamines) ^[58].

3.4.2. Mécanisme et facteurs d'activité

Le brunissement est catalysées par des enzymes, ces oxydations s'appliquent à de nombreux substrats et sont accompagnées par des phénomènes de brunissement dans des processus naturels de dégradation de végétaux en humus ou de blessure de fruits ou tubercules (bananes, pommes, pommes de terre) **(Dilmi-bouras, 2004)**.

3.4.3. Facteurs d'activité

- pH des polyphénols oxydases : il est compris entre 5 et 7. A des valeurs de pH comprises entre 2 et 3, ces oxydases sont inactivées irréversiblement.



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

- État de l'enzyme : celle-ci est inactivée par traitement thermique, par les sulfites (réducteurs), par les complexant du cuivre de l'enzyme, tels que l'acide citrique et l'acide phosphorique.
- Présence d'oxygène : l'élimination de l'oxygène par le vide et la protection par immersion dans un liquide (sirop) limitent l'oxydation.

L'inhibition de l'oxydation peut être aussi obtenue par élimination de l'enzyme par des adsorbants ou encore par des enzymes qui, en modifiant ces substrats orthophénoliques, les soustraient à l'oxydation ; c'est le cas des réactions de méthylation des groupes hydroxyle qui transforment l'acide caféique en acide férulique ^[58].

3.4.4. Préservation des aliments contre le brunissement enzymatique

Selon **Linden (1981)**, il existe plusieurs moyens de préservations, mais il n'y a pratiquement aucun moyen universel, ces traitements sont directement liés à l'aliment (légume ou fruit) et à sa destinée. Les moyens pour éviter ce brunissement sont :

- Sélection de variétés pauvres en substrats phénoliques.
- Eviter de blesser ou d'endommager les fruits et légumes lors de la récolte ou le transport, ceci évite la mise en contact de l'enzyme avec le substrat.
- Inactivation des enzymes par la chaleur (blanchiment, pasteurisation).
- Addition d'acide ascorbique, réducteur puissant (limiter à 300 mg /L dans le jus de fruits).
- Immersion des fruits dans un sirop de saccharose ou de glucose pour éviter l'arrivée de l'oxygène (avant congélation, par exemple). Dans le cas des jus de fruits, on ajoute de l'acide ascorbique qui élimine l'oxygène.
- Utilisation du SO₂ et des bisulfites : ce sont des puissants réducteurs très efficaces contre le brunissement enzymatique et présentent l'action antiseptique.

3.5. Brunissement non enzymatique

Le brunissement non enzymatique est un ensemble de réaction aboutissant à la formation de polymères bruns ou noirs (pigments) à partir de la condensation d'un composé carbonylé (sucre réducteur) et d'une fonction amine (NH₂) libre d'une protéine ou d'un acide aminé ^[59].

3.5.1. Facteurs influençant le brunissement non enzymatique

Divers facteurs physiques ou chimiques affectent la vitesse des réactions de brunissement non enzymatique ^[58]:

- Nature des sucres réducteurs
- Température : elle est proportionnelle à l'élévation de température.



- Activité de l'eau : la vitesse du brunissement non enzymatique est au maximum à une activité de l'eau comprise entre 0,55 et 0,75.
- PH

3.5.2. Prévention du brunissement non enzymatique

- Elimination des substrats

L'élimination du glucose avant la déshydratation (des œufs par exemple), par la glucose-oxydase ou par fermentation. Toute addition non nécessaire de sucre est à éviter ^[58].

- Abaissement du pH
- Surveillance de la température et de l'humidité

Il faut éviter les traitements thermiques sévères et entreposer les aliments déshydratés à l'abri de l'humidité et à des températures supérieures à 25°C.

- Addition d'agents inhibiteurs

L'agent le plus efficace est l'acide sulfureux sous forme de gaz ou de sel.

3.6. Prétraitement

Les fruits et légumes sont soumis à certains prétraitements en vue d'améliorer les caractéristiques de séchage et de minimiser les changements négatifs pendant le séchage et le stockage ultérieur des produits. Les méthodes de prétraitement sont réparties en quatre catégories ; le prétraitement chimique, le prétraitement mécanique, le prétraitement thermique et la déshydratation osmotique ^[81].

3.6.1. Prétraitement chimique

3.6.1.1. Trempage dans des solutions alcalines

Le trempage dans des solutions alcalines implique l'immersion du produit dans une solution alcaline avant le séchage, il est utilisé principalement pour les fruits séchés entiers, en particulier les pruneaux et les raisins. Une solution de carbonate de sodium est généralement utilisée à une température allant de 93,3 à 100°C ^[48].

Le trempage dans des solutions alcalines facilite le séchage en formant des fines fissures sur la surface du produit ^[85].

3.6.1.2. Sulfitage

Le sulfitage c'est l'utilisation de composés soufrés, ils agissent comme antioxydants et empêchent le développement microbien et enzymatique. Ce traitement agit contre le brunissement lors du stockage ^[48].



Parmi les légumes séchés on a les haricots verts, le poivron, le chou, la carotte, le céleri, les poireaux et les épinards. Certains légumes comme l'ail, les champignons, les petits pois et l'oignon ne sont pas sulfités ^[12].

L'immersion dans les esters oléate provoque la dissociation des plaquettes de cire sur la peau du produit, en aidant les évacuations de l'humidité (**Salunkhe et al., 1991** cité par **Sunjka, 2003**).

- **Prétraitement avec méta bisulfite de potassium**

Un traitement avec la solution de méta bisulfite de potassium (KMS) assure un bon séchage et des résultats intéressants aux cours du stockage.

Raj et al. (2006) ont suivi l'effet de prétraitement sur les caractéristiques de l'oignon pendant le séchage et au cours du stockage, ils ont choisi deux variétés : Poona rouge et Bellary rouge. Ces deux variétés sont traitées avec la méta bisulfite de potassium(KMS) à 2,5g/kg seul et à combinaison de l'acide citrique 0,5g/kg puis séchées.

3.6.2. Prétraitement mécanique

Le prétraitement mécanique pourrait remplacer ou compléter le prétraitement chimique, parce que les consommateurs hésitent à acheter des fruits traités chimiquement, et il a un effet profond sur le processus de séchage. Le prétraitement mécanique peut être : le pelage, l'abrasion de la surface et la découpe en formes variées, telles que les moitiés, les cylindres et les cubes ^[182].

L'épaisseur de découpage agit considérablement sur le temps de séchage de fruit dans un tunnel de séchage, les tranches fines résultent d'un temps de séchage réduit ^[126].

L'effet de la réduction de la taille (tranchage) sur la cinétique de la déshydratation osmotique a été étudié par **Sirousazar et al. (2009)**, en comparant les courbes de déshydratation des fruits sous forme de sphères et de cylindres complets avec celles des pièces tranchées. Ils ont pu montrer que la découpe des fruits en rondelles plutôt fines accélère considérablement le taux de la déshydratation.

A titre d'exemple on peut citer le travail effectué par **Lahbari et al. (2014)**, concernant l'effet de la forme de découpe sur la conduite de séchage des carottes (couche mince), où on a confirmé d'une manière claire que le séchage à air chaud est plus rapide pour le cas des carottes hachées que pour les carottes coupées en anneaux ou en cubes.



3.6.3. Prétraitement thermique

3.6.3.1. Blanchiment

Le blanchiment est un traitement thermique de quelques minutes à 95-100 °C destiné à détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes et les fruits. En réalité, la destruction des enzymes n'est qu'un objectif parmi bien d'autres et le rôle de blanchiment qui constitue un prétraitement avant le séchage, appertisation ou surgélation est multiple. Le blanchiment peut se faire par immersion du produit dans un bain d'eau chaude, ou par passage dans une atmosphère de vapeur ^[59].

3.6.3.2. Avantages du blanchiment

- Il détruit les enzymes à rôle oxydant : ascorbate-oxydase oxydant de la vitamine C, les carotènes et les tocophérols ^[86].
- Ainsi, le blanchiment fixe les pigments colorés, empêche le brunissement enzymatique.
- Le blanchiment stérilise l'aliment en surface;
- Il chasse les gaz ;
- Il favorise la déshydratation ou la réhydratation.

3.6.3.3. Inconvénients du blanchiment

- Le blanchiment altère les structures des produits et induit une perte de rigidité du végétal à la déshydratation.
- Il donne une saveur de cuit aux produits frais (maïs en épis par exemple).
- Il transforme une partie de la chlorophylle en phéophytine.
- Il provoque la perte de composés.
- Il entraîne les substances les plus hydrosolubles en faible quantité induisant une perte notable en vitamines hydrosolubles : perte de 10 à 45 % de la vitamine C (25 % en moyenne) ^[86].

3.7. Altération des fruits et légumes lors de séchage

Le tableau (III.2), montre les principales modifications qui altèrent la qualité des fruits et légumes pendant le séchage

Tableau (III.2) : Différentes altération des fruits et légumes lors de séchage ^[17].

Physiques

Chimiques et Biochimiques

Nutritionnelles



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

Rétrécissement	Réactions de brunissement non enzymatique	Survie de microorganismes
Diminution de la capacité de réhydratation	Réactions de brunissement enzymatique	Perte de vitamines
Migration des solides / Cause le durcissement	Diminution et perte de saveur et d'arôme	Perte de protéines
Altération des couleurs	Formation de nouvelles saveurs et arômes	
	Réactions d'oxydation (vitamines, lipides)	
	Dénaturation des protéines	

3.8. Qualité des produits séchés

La conservation des fruits et des légumes par déshydratation offre un défi unique. En raison de la configuration structurale de ces produits, le déplacement de l'humidité doit être accompli en quelque sorte que se soit moins nuisible pour la qualité du produit.

Il peut avoir comme conséquence les changements structurels physiques et dans le produit tel que le rétrécissement, le cas durcissant, la perte de volatiles et de composants d'éléments nutritifs et abaisser le réabsorption de l'eau pendant la réhydratation.

Par conséquent, la qualité du produit sec du soleil est dégradée et parfois devenue non appropriée à la consommation humaine ^[28].

La conservation de l'arome est influencée par un certain nombre de facteurs, y compris la pression de vapeur de chaque composé, sa volatilité relative, la température de séchage et la composition du produit alimentaire ^[51].

Donc, la qualité des produits séchés sera évaluée en comparaison avec le fruit frais avant leur mise en vente, notamment pour l'exportation, il est nécessaire de faire quelques analyses pour vérifier certains paramètres ^[44].

3.9. Altération des produits déshydratés

Les principales altérations chimique pouvant être observée durant le stockage des produits déshydraté sont : l'oxydation, la réaction de Maillard et l'activité enzymatique.

La maîtrise de la qualité de produit déshydraté durant toute sa durée de vie, implique la qualité des matières premières, le choix de la bonne technologie et du bon conditionnement, mais également l'intégration des conditions de stockage ^[16].

- **Principales altérations**



Capelle (1996), a résumé les principales altérations observées au cours du stockage des produits déshydraté peuvent être chimique ou physique (Tableau III.3).

Tableau (III.3) : Altération des produits déshydratés en conservation ^[16].

Altération	Altération	Produits
Altération chimique	Rancidité	Légume – farine - viande
	Réaction de Maillard	Légume – produits laitiers
	Activité enzymatique	Légumes - épices
Altération physique	Changement structure	Sucres - protéine
	Changement texture	Amidon – protéine

3.10. Réhydratation :

Les produits déshydratés peuvent être utilisés à l'état sec tels que les fruits secs et ceux qui doivent être reconstitué par réhydratation par exemple : lait, purée de la pomme de terre et la plupart des légumes secs ^[90].

La qualité du produit devient de plus en plus importante dans le processus de séchage des aliments. La déshydratation des produits alimentaires doit préserver de tels critères de qualité comme des facteurs, couleur, forme et texture alimentaires. En outre, en raison de nouveaux facteurs de qualité doivent être considérés. Comme le taux de la réhydratation ^[40]. La réhydratation ce n'est pas l'inverse du séchage ; La migration de soluté, le changement de texture, la perte des composés volatiles, toutes ces modifications sont irréversibles. L'eau qui est enlevé d'un aliment pendant la déshydratation ne peut pas être remplacé de la même manière quand la nourriture est réhydratée (c'est-à-dire, la réhydratation n'est pas l'inverse du séchage); la perte de pression osmotique cellulaire, les changements de la perméabilité de membrane de cellules, la migration de corps dissous, la cristallisation des polysaccharides et la coagulation des protéines cellulaires tous contribuent aux changements de texture et aux pertes volatiles et sont irréversibles ^[33].

Un certain nombre d'indices est employé pour définir les caractéristiques de réhydratation des aliments déshydratées ^[55].

Le taux et la capacité de la réhydratation peuvent être employés comme indicateur de la qualité des produits alimentaires; ces nourritures qui sont séchées dans des conditions optimales subissent moins des dommages et ils réhydratent plus rapidement et complètement que les aliments mal séchés ^[17].

3.11 Revue bibliographique sur le séchage d'abricot



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

Un nombre important de recherches concernant le séchage de l'abricot a été réalisé mais, chaque travail s'est distingué des autres par l'une des variantes suivantes : la méthode du séchage, le séchoir utilisé, la forme de découpe ou bien les prétraitements appliqués sur le produit.

Parmi les travaux les plus anciens, figure la thèse de Hakam. B (1987) ^[42] qui est une étude expérimentale sur le séchage de l'abricot au Maroc ou elle a établi des mesures sur les durées et les vitesses de séchage d'une monocouche d'oreillons d'une seule variété d'abricots : Canino, lorsqu'on fait varier la température et la vitesse de l'air respectivement dans les intervalles, 55-75 °C et 1.2-2.0 m/s et lorsqu'on introduit des prétraitements tels que le blanchiment à la vapeur d'eau, le trempage dans une solution de soude et la sulfitation par fumigation à l'anhydride sulfureux.

Ce travail s'est sanctionné par la construction d'un séchoir de laboratoire qui permet de produire de l'air chaud dont les propriétés sont fixées, indépendamment les unes des autres, et contrôlées. Trois variables améliorent la cinétique de séchage des abricots ; ce sont, par ordre d'importance croissante : la vitesse de l'air, sa température et la durée du blanchiment. L'établissement d'un modèle mathématique a conduit à une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Sarsilmaz et al, (2000) ^[7], ont étudié le séchage des abricots dans un séchoir à colonne rotative cylindrique (RCCD) équipé d'un capteur solaire à air (ASC) spécialement conçu pour trouver le taux optimal de l'air de séchage et de la vitesse de rotation du séchoir, de maintenir des conditions uniformes et hygiéniques de séchage et à réduire le temps de séchage.

Les abricots séchés dans ce type de séchoirs ont été comparés à ceux des abricots séchés de même type mais à l'air libre. Il a été montré que l'utilisation de ce séchoir a augmenté le taux de séchage, réduit les temps de séchage et la rotation de la chambre de séchage et a fourni des gains en temps et en main-d'œuvre.

La modélisation mathématique du séchage solaire en couche mince d'abricot a été étudiée par : **Inci Türk Toğrul, Dursunpehlivan. (2002)** ^[8] sur des abricots cultivés dans Elazığ en Turquie. Un séchoir solaire indirect à convection forcée constitué d'un appareil de chauffage solaire de l'air avec concentrateur conique et une armoire de séchage a été utilisé.

La variation en masse des tranches d'abricot et les principaux paramètres de séchage, ont été enregistrés en continu du matin au soir, pour chaque journée de test.

Les courbes de séchage obtenues ont été adaptées à un certain nombre de modèles mathématiques et les effets de la température de séchage de l'air, de la vitesse et de l'humidité



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

relative sur les constantes et les coefficients du modèle ont été évalués par la régression multiple et par rapport aux modèles donnés précédemment.

Le modèle logarithmique a été trouvée satisfaisant pour décrire la courbe de séchage solaire de l'abricot avec un coefficient de corrélation r égal à 0,994.

En 2003, **Inci Türk Toğrul et al.**^[9], ont étudié, le comportement au séchage d'un seul abricot pendu à un fil dans la direction d'écoulement de l'air chaud, pour différentes vitesses (0.2, 0.5, 1.0 et 1.5 m/s) et températures (50, 60, 70 et 80 °C) de l'air.

La variation du taux de séchage avec le temps et l'humidité ont été utilisées pour tester quatorze modèles différents de séchage et un nouveau modèle a été développé. Parmi tous les modèles, le modèle logarithmique a été trouvé le meilleur pour expliquer le comportement des abricots au séchage.

Le transfert de l'humidité des abricots qui se produit au cours du séchage a été caractérisé par la détermination expérimentale du coefficient de diffusion apparente dans l'air. Il a été constaté, par analyse de régression multiple, que les coefficients de diffusion peuvent être exprimés avec une précision de 97,3%, en fonction des débits d'air et des températures à l'intérieur de l'abricot. Certains tests statistiques, comme le χ^2 réduit, l'erreur moyenne, l'erreur quadratique moyenne ainsi que les coefficients de corrélation, ont également été utilisés pour l'ajustement de tous les modèles, Les résultats de ces tests ont confirmé la bonne concordance du modèle logarithmique.

Dans le travail élaboré par **Doymaz. I (2004)**^[32], l'effet sur le temps de séchage d'échantillons d'abricot étudiés quand un prétraitement appliqué d'une combinaison des solutions de potassium Meta-bi-sulfite et celle des alcalines d'oléate d'éthyle a été étudié. Il a été constaté une réduction du temps de séchage par rapport aux échantillons non traités.

Les cinétiques de séchage ont été ajustées aux différents modèles valables aux couches minces. Tous les modèles ont été comparés à l'aide de trois paramètres statistiques, le coefficient de détermination r^2 soit réduit, moyenne quadratique de l'écart χ^2 et la racine de l'erreur quadratique signifiante ERMS.

En comparant le r^2 , les valeurs χ^2 et ERMS de tous les modèles, le modèle logarithmique représente la meilleure caractéristique du séchage et que la diffusivité effective varie entre : 675. 8 à 1261 .4 $\mu\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

La modélisation des cinétiques de séchage en couche mince de certains fruits selon une procédure : séchage à l'air plein soleil, a fait l'objet d'une recherche menée par : **Inci Türk Toğrul, Dursunpehlivan (2004)**^[11], pour déterminer le comportement de ces fruits



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

pendant le séchage dans des conditions naturelles. Les expériences de séchage déroulées à ciel ouvert, ont été effectuées sur les abricots, raisins, pêches, figues et prunes, pré-soufrés avec le SO_2 ou NaHSO_3 , pour des températures ambiantes variant de 27 à 43 °C et pour une puissance de 0.72 à 2.93 MJ/m²h radiation solaire. Les cinétiques de ces fruits montrent la présence d'une seule période de séchage en l'occurrence celle de décroissance du taux. Douze modèles mathématiques ont été testés pour ajuster les taux de séchage pour ces fruits.

Parmi ces modèles, l'approximation du modèle de diffusion pour les abricots et les figues (sans prétraitement ou avec SO_2 -soufré), le modèle de Henderson-Pabis pour les abricots, les raisins et les prunes (NaHSO_3 -soufré) et le modèle donné par Verma et *al.*, pour la pêche. Les effets de la température à la surface des fruits et l'humidité relative juste au-dessus de leur surface sur les constantes et les coefficients des modèles sélectionnés ont également été étudiés par analyse de régression multiple.

Les relations structure-propriétés en pratiquant l'osmo-déshydratation des cubes d'abricot sont étudiés par : **Marco Riva et al. (2005)** ^[12] et l'influence de l'étape osmotique et de la composition de sirop sur les propriétés physico-chimiques, effondrement de la structure et des changements de couleur des cubes d'abricots déshydratés ont été examinés. La relation entre le retrait pendant la déshydratation de l'air et des transitions de tissu abricot a également été analysée. Les caractéristiques de couleur et de géométrie, ont été évaluées par analyse d'image et des transformations mathématiques ont été appliquées aux paramètres d'image pour estimer la réduction du volume liée à la teneur en humidité absolue.

Bauman, I et al. (2005) ^[13], ont étudié le séchage en lit fluidisé de particules de fruits différents et leur réhydratation. A partir de teneurs en eau initiales de 81.5% (raisins), 87.7% (pêche) et de 86,9% (abricot) et des températures de fluidisation de 70 à 100 °C à des vitesses d'air de 0,98 à 5,2 ms⁻¹, on a obtenu des fruits secs de bonne qualité de teneur en eau allant de 10% à 14% et un taux pour la réhydratation entre 8 et 20.

Les résultats ont montré que le séchage de fruits dans une couche fluidisée produit des fruits secs de meilleure qualité.

Le temps de séchage est beaucoup plus court, avec des taux de réhydratation et de qualité améliorés, par rapport aux séchoirs continus à bande qui sont généralement utilisés.

Dans le travail de **Fahloul et al. (2009)**, on a étudié l'influence de déshydratation osmotique sur la lyophilisation d'abricots. La déshydratation osmotique des abricots a été réalisée dans deux solutions de saccharose et des dattes, à deux concentrations différentes (30 et 50% en poids/poids). La qualité des produits a été étudiée en utilisant les critères suivants:



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

temps de séchage, la vitamine C et sucres totaux. Les résultats ont montré que la déshydratation osmotique en solution de la datte (30% p/p) a donné le plus court temps de séchage (3 h) et les meilleures cinétiques de lyophilisation. La perte de vitamine C était de 14% lors de la déshydratation osmotique et 7% au cours de la lyophilisation.

Les sucres totaux ont augmenté de 57% au cours de la déshydratation osmotique et 8% au cours de la lyophilisation. Sept modèles ont été ajustés aux données expérimentales et les meilleurs modèles sont: le modèle de Page pour les abricots traités avec une solution de dattes, le modèle de Wang et Singh pour les abricots traités avec une solution de saccharose, et le modèle de **Verma et al.**, pour les abricots sans déshydratation osmotique.

En 2011, **Mahnaz M. et al.**, ont étudié les effets des paramètres de déshydratation osmotique (concentration en sel, la température, et rapport de la solution de l'échantillon) sur la vitesse de déshydratation et la qualité de l'abricot déshydraté. Diffusivités efficaces étaient de l'ordre de grandeur entre 10^{-10} et 10^{-9} avec une moyenne générale de $1,37 \times 10^{-9}$ m²/s pour la perte de l'eau et $1,15 \times 10^{-9}$ m²/s pour solide (gain en sel). Les courbes de déshydratation ont été construites en utilisant le modèle de Peleg. L'augmentation du volume de la solution a augmenté le taux de transfert de masse et donc le gain solide augmente rapidement. Une solution dosée à 5:1 a donné la meilleure qualité de produit.

La meilleure température et la concentration qui a eu une perte d'eau avec un maximum de gain solide et un goût acceptable étaient 40 °C et 50g/kg, respectivement.

Concernant les isothermes de sorption on trouve très peu de références parmi lesquelles on peut citer celle de **Kaymak-Ertekin et al. (2004)**, qui ont réalisé des expériences pour l'obtention des courbes de sorption des raisins, abricots, pommes et pommes de terre à 30, 45 et 60 °C par la méthode gravimétrique. Six à deux paramètres et de cinq à trois paramètres des modèles de sorption ont été testés pour ajuster les données expérimentales. Une méthode d'analyse de régression non linéaire a été utilisée pour évaluer les constantes des équations de sorption.

L'équation de Halsey a donné le meilleur ajustement aux données expérimentales de sorption pour tous les matériaux testés sur toute la plage de températures et des activités d'eau étudiés.

Le modèle de GAB a donné aussi le plus proche ajustement aux données de sorption pour les pommes de terre et les raisins. L'accord entre les valeurs expérimentales et prédites de ces modèles a été jugée satisfaisant. La chaleur isostérique de désorption et d'adsorption de



Partie Théorique
Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

l'eau est déterminée à partir des données d'équilibre en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron.

En conclusion on peut dire que les cinétiques de séchage des variétés d'abricot locales n'ont pas été étudiées auparavant avec les conditions particulières suivantes :

- Méthode de séchage à l'air chaud
- Couche mince
- Aucun prétraitement.

L'objectif originel de la présente thèse a été d'établir une simulation numérique sur le séchage des abricots et de réaliser un séchoir solaire de laboratoire mais, en se confrontant à la réalité de la pratique et vu les difficultés rencontrées pour le bon déroulement de cette étude, il a été décidé de se contenter de réaliser les cinétiques en tenant compte des trois conditions citées ci-dessus sur un séchoir pilote à air chaud et dans un laboratoire étranger et d'obtenir aussi les isothermes de ces variétés dans ce même laboratoire de Massy et en parallèle de tenter à réaliser différents travaux de séchage solaire localement à l'université de Batna.



Partie Expérimentale

Chapitre 1

Matériels et méthodes

1.1 Matériel technique et végétal

1.1.1 Matériel technique

Pour les expériences sur couche mince du produit à sécher, on a choisi le mode de séchage à air chaud (dit aussi séchage convectif ou par entraînement). Ce procédé qui est disponible à l'étranger, présente l'avantage de préserver la qualité de l'aliment en travaillant à des températures qui respectent la structure de l'aliment et d'en avoir des temps du séchage relativement courts. Le séchage solaire est choisi pour les expériences sur une couche plus large en dimension (gros morceaux du produit ou oreillons d'un fruit par exemple) et dont les tests se sont déroulés ici en Algérie et sur des séchoirs solaires conçus en collaboration des départements de mécanique et d'agronomie de l'université de Batna.

1.1.1.1 Présentation du pilote (Séchage à air chaud)

Les essais de séchage ont été effectués sur un séchoir-pilote (figure 8), qui est automatiquement régulé et contrôlé, il est installé au laboratoire de séchage à l'ENSIA.



Figure (8): photo générale du pilote.

En complément à la photo précédente qui est une vue réelle et générale, un schéma plus descriptif de la boucle de séchage de cet appareil est présenté sur l'image d'interface du programme (figure 9), conçu pour la commande du séchoir par ordinateur, ce schéma apparaît en première position une fois, le programme est démarré.



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

Les conditions opératoires (paramètres de séchage) de température, de vitesse et d'humidité relative de l'air asséchant, en plus d'un critère d'arrêt de l'expérience, sont programmées préalablement sur l'ordinateur de commande.

Les enregistrements des données sont automatiquement acquis sur des fichiers XML moyennant le logiciel **LabVIEW®**, qui est utilisé principalement pour la mesure par acquisition de données, pour le contrôle d'instruments et pour l'automatisme industriel.

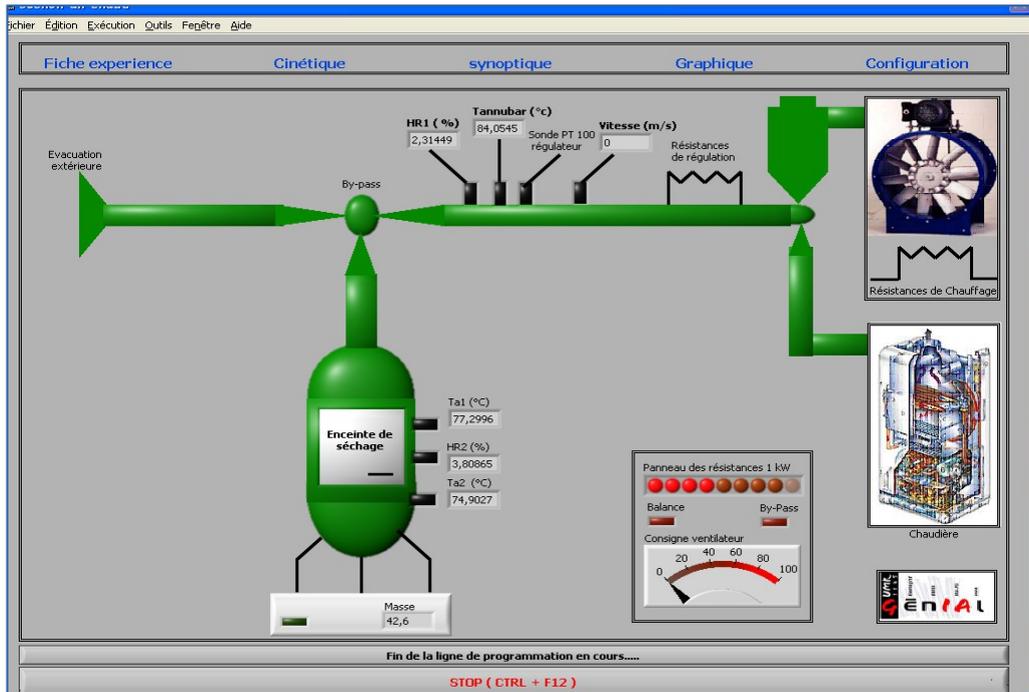


Figure (9): Schéma de l'interface programme du séchoir pilote.

1.1.1.2 Fonctionnement du pilote

a) Informations sur le matériel nécessaire

Des documents y compris un cahier et un manuel d'utilisation du pilote, sont disponibles au niveau de ce laboratoire pour fournir tous les détails en matière de technologie des différentes composantes indiquées sur la figure (10) de ce séchoir tel que :

- Les capteurs du pilote de séchage.
- Les thermocouples T et K.
- La sonde platine.
- Les sondes d'humidité relatives 135Y.
- Le capteur de vitesse d'air.
- Les régulateurs de température, humidité relative et vitesse d'air.



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

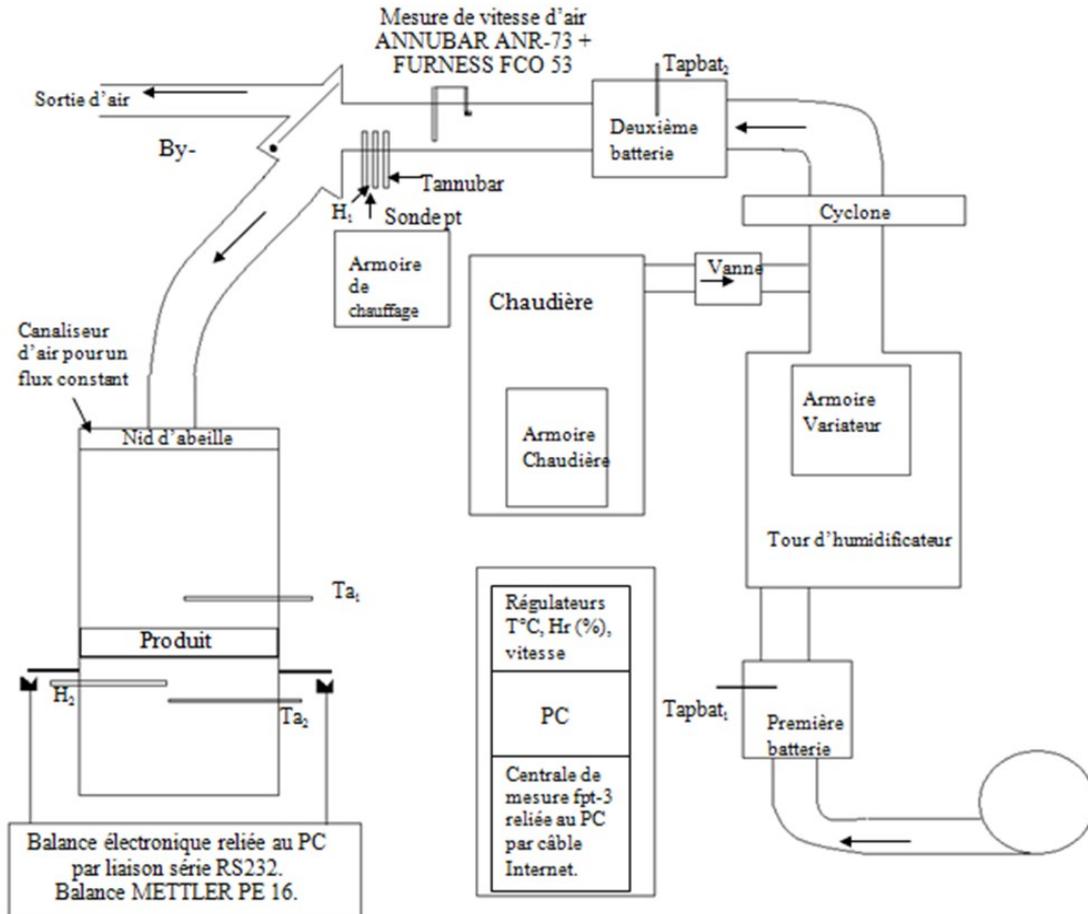


Figure (10): Schéma général du pilote.

b) Conditions et/ou contraintes à respecter

Allumer le pilote 30 minutes à 1 heure au moins avant de mettre les échantillons est la condition majeure à respecter pour bien maîtriser les paramètres de séchage et les valeurs consignes pour les différents capteurs et sondes.

c) Mode opératoire

1) Démarrage :

Avant de démarrer le pilote il faut effectuer quelques vérifications.

- L'air comprimé est ouvert (Figure 11.1).
- Le tripode de la balance bien placée (Figure 11.2).
- La protection présente sur la balance (Figure 11.3).
- La vérification des deux boutons (résistance et by-pass) et (ventilateur), elles doivent être en position automatique (Figure 11.4).



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes



Figure 11.1: Robinet de l'air comprimé.



Figure 11.2: Tripode de la balance.



Figure 11.3: Protection de la balance.



Figure 11.4 : Boutons ventilateur et résistance.

Pour la suite, on doit :

- Allumer la commande (Figure 11.5).
- Appuyer sur marche (Figure 11.6).
- Mettre le tamis (grand ou petit) dans la chambre de séchage (figure 11.8).
- Allumer l'ordinateur, l'écran et la balance (figure 11.7).
- Lancer le programme "Séchoir V2".



Figure 11.5: Bouton de commande

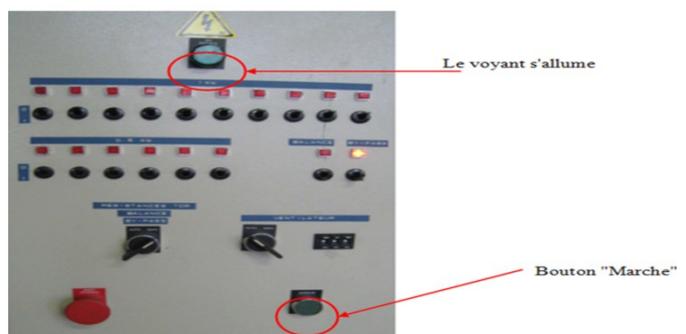


Figure 11.6: Armoire de chauffage.

Dans la fenêtre qui s'affiche, il faut rentrer plusieurs informations :

- Nom utilisateurs (ou TEST pour les périodes très courtes ou à vide).



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

- Numéro d'essai et de lot.
- La date et l'heure s'affiche automatiquement.
- La nature du produit.
- La teneur en eau (obtenu avec la balance IR ou à l'étuve).

Valider et ensuite une autre fenêtre s'affiche où l'on rentre les paramètres voulus (Température de l'air, Humidité relative, vitesse d'air, le temps total de la manipulation, le temps entre chaque pesée et le temps entre chaque mesure de température).

- Valider la ligne de programmation et valider le programme.
- Ensuite, cliquer sur "Ok".

Attention, un temps de 2min est nécessaire à l'allumage du ventilateur.

- Attendre que les paramètres soient stables surtout la température pour que le message "Etes-vous prêt" apparaisse (environ 30 min), cliquer sur "oui" pour démarrer.
- Sinon pour forcer le démarrage mettre "Stop".
- Faire la tare de la balance. Introduire le produit sur le tamis en gardant un échantillon pour faire la teneur en eau si cela n'a pas été fait précédemment et valider.

La manipulation va enfin se faire automatiquement.



Figure 11.7 : Armoire informatique et balance. Figure 11.8 : Chambre de séchage.

2) Arrêt du pilote



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

Appuyer sur "Stop" quand la manipulation est terminée, puis deux fois sur "OK".

Retirer le produit de la zone de chauffage, puis appuyer sur "OK".

A la question "Voulez-vous refroidir le pilote", cliquer sur "Oui", la fenêtre d'acquisition se ferme, le ventilateur doit se mettre en route si la température est supérieure à 40°C. Le ventilateur s'arrête automatiquement quand la température est inférieure à 40°C.

Actionner la manette de l'armoire de chauffage vers le bas et éteindre l'ordinateur, l'écran et la balance.

1.1 .2 Matériel végétal :

Une quantité d'environ 5kg de chacune des trois variétés étudiées : Louzi, Rosé et Khed-Erroumia (figure 12), a été jugée suffisante pour la préparation des différents échantillons nécessaires à mener des tests de séchage sur le séchoir pilote à air chaud du laboratoire Génial de l'ENSIA de Massy ainsi que des expériences propres à l'obtention des isothermes de sorption.

Les abricots sont cueillis à N'gaous, Mena pour les variétés : Louzi et Rosé respectivement, et achetés d'un marché local de Batna pour la troisième variété.

Ces fruits sont transportés par avion directement de l'aéroport de Batna vers cette école de Paris et ont été stockée dans la chambre froide de cette institution le long de la période de déroulement des essais. Il a été constaté que seule la variété Khed-Erroumia n'a pas pu résister à la détérioration plus que 20 jours.



Louzi de N'Gaous

Rosé de Mena

Khed- Erroumia

Figure 12 : Quelques variétés d'abricot produites à Batna.

1 .2 Conduite des expériences

1 .2.1 Paramètres enregistrés



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

- Les températures sèches à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage : T_{a1} et T_{a2} , la température humide au capteur humidité.
- Les humidités relatives : Hr_1 et Hr_2 de l'air.
- Les masses mesurées par la balance à des intervalles de temps réguliers.

1.2.2 Collecte des données

1.2.2.1 Paramètres avant le séchage

Les abricots utilisés sont bien choisis, lavés, séchés, dénoyautés à l'aide d'un couteau puis découpés en petits morceaux parallélépipédiques de 1cm de côté (Figure 1.13).

La majeure partie de ces tranches d'abricots obtenues est pesée et mise sur un tamis à l'intérieur de la chambre de séchage tout en notant la tare à l'aide d'une balance de marque Mettler de haute précision (0.001g), quant au reste, il est utilisé pour déterminer la teneur en eau dans l'étuve à 105°C, pour chaque échantillon de chaque variété d'abricot testée.



Figure (1.13) : préparation des échantillons et produit sec obtenu.

Les données de chaque manipulation sont sauvegardées sur l'ordinateur. Les conditions de séchage: humidité relative, température et vitesse de l'air de séchage, étant connues par avance ainsi que le temps de pesée de la perte de poids du produit à sécher et celui de la fin de l'opération.

Ce séchoir à air nous a permis d'obtenir le profil des cinétiques de séchage de ces trois variétés d'abricot citées ci-dessus pour les conditions de séchage suivantes :

- Températures de l'air : 30, 40, 50 et 60 °C
- Vitesse de l'air asséchant de 1m/s.
- Humidité relative de l'air ambiant du site pendant le séjour allant du 25 Juin au 15 Aout 2010.

On trouve pour les trois variétés d'abricots une teneur en eau de 84% ou 0.84 kg d'eau/kg de produit pour la variété Rosé, de 87% ou 0.87 kg d'eau/kg de produit pour la variété Louzi, de 84 % ou 0.84 kg d'eau/kg de produit pour la variété Khed-Erroumia.



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

On peut convertir ces données en teneur en eau à base sèche par la formule :

$$X = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (4.1)$$

Avec :

X : teneur en eau à base sèche (kg d'eau/kg de matière sèche MS.).

X_h : teneur en eau à base humide (kg d'eau/kg de produit).

Ainsi on trouve pour les variétés Rosé et Khed-Erroumia, une teneur en base sèche de 5.25 (kg eau/kg MS) et de 6.692 (kg eau/kg MS) pour la variété Louzi.

1.2.2.2 Etude de l'évolution du séchage :

Au cours de l'expérience, la masse du produit dans le four est relevée ainsi que les températures T_{a1} et T_{a2} et la température humide. Les humidités relatives sont aussi relevées (Ha_1 et Ha_2) au cours du temps.

A l'aide des masses de produit mesurées, on peut calculer les teneurs en eau en base sèche par la formule :

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (4.2)$$

Avec :

X : teneur en eau en base sèche (kg d'eau/kg de matière sèche MS).

m : masse du produit en g.

m_s : masse de matière sèche

$m_s =$ masse totale de départ – masse d'eau de départ (calculée à partir de la teneur en eau à base humide).

On peut ainsi déterminer la vitesse instantanée de séchage au temps t qui est définie par la formule suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{(X(t - \Delta t) - X(t))}{\Delta t} \quad (4.3)$$

Avec :

dX/dt : vitesse de séchage en kg d'eau/kg de MS/sec.

X : teneur en eau à base sèche (kg d'eau/kg de matière sèche MS).

Δt : écart de temps en secondes.

A la fin de l'expérience, une nouvelle mesure de la teneur en eau du produit à base humide est mesurée à l'aide de la cellule de séchage aux rayons infra rouge afin de déterminer la teneur en eau finale des produits.



Afin de suivre le comportement de chaque variété vis-à-vis au séchage convectif, on a tracé trois courbes différentes:

- La courbe de variation de la teneur en eau X en fonction du temps t de séchage.
- La courbe de variation de la vitesse de séchage dX/dt en fonction de t .
- La courbe de variation de la vitesse de séchage dX/dt en fonction de X .

Ces trois courbes caractéristiques du séchage sont appelées : cinétiques de séchage, elles sont obtenues en fonction des valeurs observées (expérimentales) pour des valeurs de températures singulières.

Pour déterminer les mêmes caractéristiques pour un intervalle de valeurs de températures continu, on est contraint à trouver des modèles mathématiques pouvant simuler les cinétiques de séchage d'une manière adéquate.

1.3 Modèles de séchage

Les premiers travaux scientifiques ^[8] 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'apparaît le rôle capital joué par le séchage et les limitations de l'écriture purement diffusive.

1.3.1 Classification des modèles de séchage

Les modèles de séchage sont classés en trois types.

1.3.1.1 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 (1.1).

$$D \cdot \nabla \bar{X} = \frac{\partial X}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \bar{X} \quad (1.1)$$

Avec:

D : est le coefficient de diffusion massique du produit qui est fonction de l'humidité et de la température.

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 :



$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

1.3.1.2 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 cités par (Mouafki A., 2004), ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

1.3.1.3 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.

Tableau (II .1): Modèles mathématiques

Nom du Modèle	Modèle	Référence
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Kashaninejad and Tabil (2004)
Modified Page	$MR = \exp(-(-kt)^n)$	Overhults et al. (1973)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$	Yagcioglu et al. (1999)
Two-term	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$	Henderson (1974)
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-$	Sharaf-Elden et al. (1980)
Approximation of diffusion	$kat)$ $MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-$	Yaldiz and Ertekin (2001)
Verma et al.	$kbt)$	Verma et al. (1985)
Wang and Singh	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$ $MR = 1+at+bt^2$	Wang and Singh (1978)

1.4 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 ; Syarif 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)**).

Pour cela et pour s'aligner avec la logique de notre étude, il est important de citer quelques études relatives aux abricots et à des produits similaires se caractérisant par la structure pulpe-noyau tels que les prunes, les raisins et les dattes.

Pour donner une bonne représentation de nos résultats expérimentaux qui déterminent la relation entre la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau, on a utilisé le logiciel **Statistica Stasoft®** qui a permis de faire l'analyse statistique.

1.5 Modélisation mathématique des courbes de séchage

Les courbes de séchage obtenues pour les trois variétés sont ajustées en utilisant dix modèles mathématiques figurant dans le tableau (II .1), des modèles mathématiques.

1.5.1 Procédure d'analyse des données

La procédure suivie pour l'analyse des données, consiste à calculer les valeurs des paramètres du modèle examiné, les valeurs des coefficients de corrélation et l'erreur standard appliquée aux différentes températures de l'air.

Ensuite, les figures représentant les points mesurés sont tracées et l'estimation du modèle choisi à différentes températures est faite alors. Les calculs d'analyse et les représentations graphiques correspondantes ont été effectués à l'aide du logiciel Statistica en utilisant la technique de régression non linéaire qu'il possède.

1.5.2 Analyse de régression

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 (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.

1.5.2.1 Le coefficient de corrélation

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 (n points) et définir la déviation standard qui mesure l'étendue des données autour de la moyenne:

$$r = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (4.4)$$

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.

$$S_t = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - y_i)^2 \quad (4.5)$$

Où la moyenne des données observées \hat{y} est donné simplement par :

$$\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.6)$$

La quantité S_t considère l'étendue autour d'une ligne constante (la moyenne) par opposition à l'étendue autour du modèle de la régression. C'est l'incertitude de la variable dépendante avant régression.

Nous définissons aussi la déviation de la courbe appropriée comme :

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4.7)$$

On note 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.

1.5.2.2 Fonction Chi-2 ou χ^2 :



Ce terme se rencontre partout en modélisation de données. Il mesure le degré de concordance en comparant n valeurs réelles (observées ou expérimentales) avec celles prédites (théoriques). Il est défini comme suit :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{n - z} \quad (4.8)$$

Où z est le nombre de coefficients du modèle utilisé pour prédire les valeurs théoriques.

1.5.2.3 Détermination du modèle approprié

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

- le plus grand des valeurs de r .
- le plus petit pour le χ^2 .

1.6 Détermination expérimentale des isothermes de sorption

La courbe expérimentale d'isotherme ($T=C^{te}$) de sorption s'obtient à partir de plusieurs points $X=f(a_w)$. Dans la méthode gravimétrique ; il s'agit d'imposer au produit plusieurs activités de l'eau ; en l'exposant à un milieu ambiant caractérisé par une humidité relative imposée (connue). A l'équilibre $a_w=H_r$

On détermine des couples de valeur de teneur en eau et a_w : généralement, 6 à 10 points expérimentaux suffisent.

1.6.1 Mise en œuvre de l'équilibre

Deux démarches sont possibles pour une température donnée :

- Un échantillon est amené successivement en équilibre à différentes H_r : les masses sont déterminées et les teneurs en eau déduites de la mesure de teneur en eau finale. Un seul échantillon est nécessaire mais le temps de séjour est long.
- Il y a autant d'échantillons que de points souhaités.

La démarche choisie implique un équipement permettant de peser l'échantillon régulièrement :

- La pesée de l'échantillon au dehors de l'enceinte est une technique qui nécessite diverses précautions. Les sels acides sont placés dans des bocaux fermés hermétiquement. Les échantillons sont prélevés à intervalles réguliers et pesés ; jusqu'à obtenir un poids constant correspondant à l'équilibre (méthode statique gravimétrique).



- Cela veut dire qu'à chaque pesée ; le bocal est ouvert et l'échantillon remis à température ambiante. Ce qui peut engendrer des perturbations de mesures et allonger la durée de mise à l'équilibre.

Pour les courbes d'adsorption le produit est séché au préalable, sans altérer le produit : pour le lait ^[6] par exemple on le met pendant 2 heures à 102°C, 25 mbar, en présence de P₂O₅.

Pour les courbes de désorption (utilisées en séchage), le matériau humide est placé en présence des mêmes H_r et on mesure cette fois la perte de masse.

1.6.2 Humidités relatives fixées par des solutions salines saturées, d'acides ou glycérol

L'échantillon du produit (flacon ouvert) est placé dans l'atmosphère de solutions de sels saturées reformant un excès de sel, ou de solutions d'acide sulfurique de concentration connue. Ces produits placés dans une enceinte fermée imposent une pression de vapeur d'eau et donc une humidité relative.

Un échange de matière va se produire entre l'échantillon du produit et l'atmosphère de l'enceinte jusqu'à ce que la masse du produit soit constante. A cet instant, l'équilibre est atteint et l' H_{r_a} est égale à l' a_w . L'intérêt d'utiliser les solutions de sels saturées par rapport aux solutions d'acides ou glycérol, est leur grand pouvoir tampon qui permet de maintenir a_w constante. Une étude comparative entre l'utilisation de solutions d'acide et de sels saturées ne montre pas une différence significative pour la cellulose microcristalline à 25°C.

Les solutions d'acides sont utilisées pour de faibles a_w ^[4]. Pour des valeurs élevées et des durées de mise en équilibre élevées, on place dans l'enceinte du thymol ou de l'azoture de sodium pour empêcher l'apparition de moisissures.

A noter également que, lorsque l'on utilise les solutions d'acides ou de glycérol, on peut mesurer la concentration de la solution en équilibre à la fin de l'essai, soit par densimétrie (glycérol et acide sulfurique), soit par acidimétrie pour l'acide sulfurique, soit par l'utilisation d'un réfractomètre pour le glycérol, afin de vérifier l'exactitude de la valeur de l'humidité relative H_r .

1.7 Méthode expérimentale

1.7.1 Le but

C'est l'exécution du protocole d'expérience relatif à l'obtention des isothermes de désorption de deux variétés d'abricot produites dans la région des Aurès en l'occurrence: le Rosé de Mena (variété 1) et le Louzi de N'gaous (variété 2) en suivant la méthode statique gravimétrique, l'expérience était réalisé au même laboratoire ou s'est déroulé l'opération de séchage à Massy, France en 2010.

1.7.2 Préparation du produit



Les variétés d'abricot ont été achetées fraîches d'un marché local de Batna et choisies d'une façon homogène pièce par pièce en utilisant trois critères qui sont la dimension (taille moyenne), le degré de maturation (ni crue ni trop mur), et la morphologie externe (surface saine sans fissure). Puis elles sont lavées manuellement avec de l'eau fraîche pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations.

Chaque variété est découpée à la moitié pour enlever le noyau (figure 1.13). Ensuite, elles sont découpées en petites tranches de 1cm d'épaisseur et placées dans le flacon dessiccateur (porte échantillon) en plusieurs échantillons (figure 1.14).



Figure (1.14) : Support et porte échantillon.

1.7.3 Obtention d'un point de la courbe des isothermes

Le principe de l'obtention d'un point (a_w ; X_{eq}) ou (H_r , X) de l'isotherme est le suivant: on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative H_r de l'air constante.

L'échantillon est pesé à intervalles réguliers jusqu'à ce que sa masse devient constante ou sa variation est négligeable, il est alors en équilibre avec l'air à (T , H_r). Connaissant sa masse humide, il suffit de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X , le couple (H_r , X) ainsi obtenu, fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption. Le produit est placé dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution saline maintient une humidité relative constante.

La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermo-staée.

On utilise autant de sel différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme.



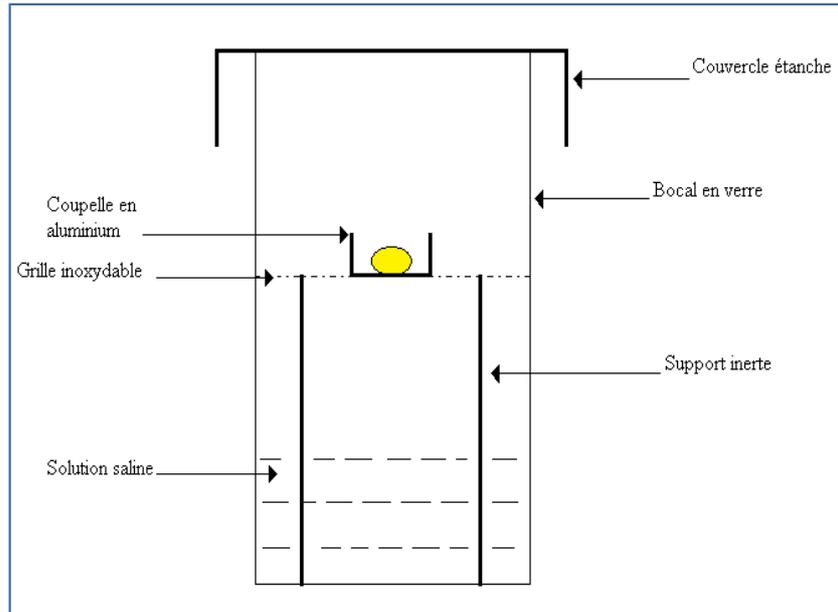


Figure (1.15) : Schéma de l'expérience.

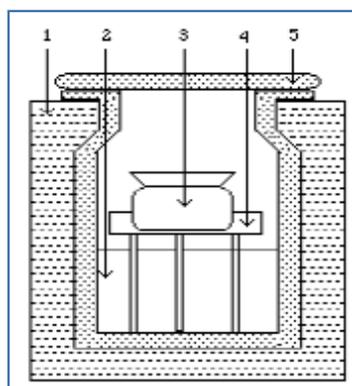
1.7.4 Méthode

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux solutions de sels saturées pour trois principales raisons :

- Elles sont moins dangereuses pour le manipulateur.
- Elles interagissent faiblement avec les produits.
- Elles assurent un grand pouvoir tampon qui permet de maintenir l'humidité constante.

Le seul inconvénient de l'utilisation des solutions de sels saturées est la longue période nécessaire pour que l'équilibre entre le produit et la solution de sel saturée soit atteint.

Les isothermes de sorption sont construites pour 2 températures au minimum nous avons choisi deux températures 30°C et 60°C car on dispose de deux étuves seulement.



- (1) bain thermo-staté ou étuve
- (2) solution saline saturée.
- (3) bûcher pour produit (porte-échantillon)
- (4) Support du porte-échantillon
- (5) fermeture étanche

Figure (1.16) : Détail d'une unité du dispositif expérimental.

1.7.5 Préparation des récipients et des solutions de sels saturées

Diverses solutions salines saturées sont préparées, la gamme obtenue permet d'obtenir les teneurs en eau sur l'ensemble de la gamme d'hygrométrie. Les solutions de sels saturés utilisées sont: LiCl; MgCl₂; NaBr; KI; NaCl; KCl; K₂SO₄. Ces solutions sont préparées dans



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

des bocaux hermétiques (figure 1.16) et sont maintenues isothermes dans une étuve régulée en température



Figure (1.17) : Bocal à fermeture étanche

Dans cette préparation des récipients à couvercle étanche (figure 17), nous ont été obligés. Pour pouvoir protéger les échantillons sans contact avec les solutions qu'ils vont contenir, les récipients en verre transparent ont dû être collés à leur fond à un petit verre à boire. Ce verre à boire portera le verre à montre ou la coupelle sur laquelle l'échantillon du produit va séjourner.

La préparation des solutions de sels saturées dont le nombre dépend de celui de couples de points (a_w ; X_{eq}) désirés, a été effectuée d'après les recommandations que nous avons trouvées.

Pour préparer chacune des solutions de sels saturées (correspondant à 7 points expérimentaux selon le nombre des sels utilisés du graphique à 30°C et à 7 points expérimentaux de celui à 60°C, nous avons adopté la démarche suivante :

- Pesage de la masse exacte du sel : doit être effectué conformément aux valeurs consignées
- Mise du sel dans le récipient: réalisée avec soin afin que le sel ne tombe pas dans le petit verre à boire mais se répartisse plutôt dans le récipient
- Ajout d'eau distillée: la quantité d'eau distillée nécessaire pour la préparation de chaque solution est telle que les solutions obtenues soient à saturation. C'est à cette seule et unique condition que ces solutions pourront imposer une humidité constante au cours du temps.
- Agitation des solutions: elle assure l'homogénéisation des solutions et évite la création de gradient de concentrations qui aura sans doute des influences sur la constance de l'humidité dans les récipients.
- Séjour des solutions à l'étuve aux deux températures au plus de 24 h de tous les récipients contenant les solutions de sels saturées (sans l'échantillon du produit) pour une adaptation



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

aux températures de travail est nécessaire avant le démarrage proprement dit de l'expérience. Ce séjour favorise la stabilisation des solutions dans leur nouveau milieu.

1.8 Prises de masse et fin de l'expérience

Une fois que tous les récipients sont prêts avec les échantillons à l'intérieur (sur les verres à montre ou coupelles), l'ensemble des récipients (figure 1.18) est conditionné dans une étuve à 30°C et à 60°C.



Figure (1.18) : matériels et verrerie utilisés au laboratoire de Massy.

Des échanges de matières, dont l'intensité dépend pour une grande part de la température de l'étuve, sont effectués entre chaque échantillon et l'atmosphère interne entourant (milieu ambiant) du récipient.

Pour suivre l'expérience au cours du temps, des prises de masse sont effectuées de façon périodique pour chaque échantillon. La prise de masse se déroule de la manière suivante : on fait sortir l'échantillon de l'étuve, puis du récipient et on le met dans un dessiccateur qui assurera son refroidissement.

Cette opération est réalisée très rapidement dans le but d'empêcher un éventuel échange entre le produit et le milieu ambiant.

Après le refroidissement du produit qui dure environ 5 minutes, celui-ci est pesé avec son support à l'aide d'une balance électronique (figure 1.19), de précision 10^{-4} g (type Mettler Toledo de portée minimale 10 mg).

La méthode de pesée est la suivante:



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

1^{er} échantillon variété1 :

1^{er} pesée (effectue le 01/07/2010)

- Poids de la tare
- Poids tare + produit humide
- Poids tare + produit sec

2^{eme} pesée (effectue le 05/07/2010)

- Poids de la tare
- Poids tare + produit humide
- Poids tare + produit sec

2^{eme} échantillon variété2 :

1^{er} pesée (effectue le 01/07/2010)

- Poids de la tare
- Poids tare + produit humide
- Poids tare + produit sec

2^{eme} pesée (effectue le 05/07/2010)

- Poids de la tare
- Poids tare + produit humide
- Poids tare + produit sec



Figure (1.19) : Balance de précision de 10^{-04} g.

Une fois La pesée terminée, l'échantillon est remis dans le récipient qui sera à son tour replacé dans l'étuve le plus vite possible et avec beaucoup de précaution.

Pour avoir un point de la courbe à construire, il faut disposer des deux paramètres indispensables qui sont l'*Hr* et la X_{eq} . La valeur de l'*Hr* dépend de la solution de sel saturée utilisée et de la température à laquelle on travaille.

La valeur de X_{eq} n'est calculée qu'à la fin de l'expérience qui est marquée par l'équilibre entre le produit et l'atmosphère interne du récipient.

Cet équilibre est atteint lorsque la masse du produit ne varie plus (0,001 près). La teneur en eau finale du produit est déterminée par déshydratation à l'étuve à 103°C pendant 24 heures pour mesurer la masse sèche. On obtient ainsi un couple (*Hr* ; X_{eq}).

Les tableaux (2.1) et (2.2) ont été dessinés afin de faciliter le report de valeurs relevées des pesées répétées pour deux échantillons pour chaque variété et pour chaque solution saturée.

Tableau (2.1) : Pesées des échantillons à la température 30°C.



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

T₁=30 °C	<i>Var(1)</i>				<i>Var(2)</i>			
Sels	Ech(1)		Ech(2)		Ech(1)		Ech(2)	
1- LiCl	T ₁ 111	...	T ₁ 112	...	T ₁ 121	...	T ₁ 12	...
2- MgCl ₂	T ₁ 211	...	T ₁ 212	...	T ₁ 221	...	T ₁ 22	...
3- NaBr	T ₁ 311	...	T ₁ 312	...	T ₁ 321	...	T ₁ 32	...
4- KI	T ₁ 411	...	T ₁ 412	...	T ₁ 421	...	T ₁ 42	...
5- NaCl	T ₁ 511	...	T ₁ 512	...	T ₁ 521	...	T ₁ 52	...
6- KCl	T ₁ 611	...	T ₁ 612	...	T ₁ 621	...	T ₁ 62	...
7- K ₂ SO ₄	T ₁ 711	...	T ₁ 712	...	T ₁ 721	...	T ₁ 72	...

Tableau (2.2) : Pesées des échantillons à la température 60°C.

T₂=60 °C	<i>Var(1)</i>				<i>Var(2)</i>			
Sels	Ech(1)		Ech(2)		Ech(1)		Ech(2)	
1- LiCl	T ₂ 111	...	T ₂ 112	...	T ₂ 121	...	T ₂ 122	...
2- MgCl ₂	T ₂ 211	...	T ₂ 212	...	T ₂ 221	...	T ₂ 222	...
3- NaBr	T ₂ 311	...	T ₂ 312	...	T ₂ 321	...	T ₂ 322	...
4- KI	T ₂ 411	...	T ₂ 412	...	T ₂ 421	...	T ₂ 422	...
5- NaCl	T ₂ 511	...	T ₂ 512	...	T ₂ 521	...	T ₂ 522	...
6- KCl	T ₂ 611	...	T ₂ 612	...	T ₂ 621	...	T ₂ 622	...
7- K ₂ SO ₄	T ₂ 711	...	T ₂ 712	...	T ₂ 721	...	T ₂ 722	...

Les humidités relatives de quelques sels saturés données aux températures de travail sont présentées dans le tableau (2.3).

Tableau 2.3 : Humidités relatives *Hr* des quelques sels à 30°C et 60°C

<i>Sel</i>	<i>Hr</i>	
	30°C	60°C
LiBr	0,0637	0,0533
ZnBr ₂	0,0775	0,0809
KOH	0,0823	0,0549
NaOH	0,0703	0,0456
LiCl	0,1128	0,1095
Lil	0,1856	0,0998
CaCl ₂	0,2898	0,1678
MgCl ₂	0,3244	0,2926
NaI	0,3775	0,2595
K ₂ CO ₃	0,4276	0,3921
NaBr	0,5670	0,4970
KI	0,6789	0,6311



Partie Expérimentale
Chapitre 1 : Matériels et méthodes

NaCl	0,7518	0,7459
KCl	0,8360	0,8035
K ₂ SO ₄	0,9730	0,9571



Chapitre 2

Résultats et discussions



2.1 Détermination de la teneur en eau en base sèche:

Pour les trois variétés d'abricots on a: une teneur en eau de 84% ou 0.84 kg d'eau/kg de produit pour le Rosé et Khed-Erroumia et de 87% ou 0.87 kg d'eau/kg de produit pour le Louzi de 84 % ou 0.84 kg d'eau/kg de produit.

Ainsi on trouve pour les variétés Rosé et Khed-Erroumia, une teneur en base sèche de 5.25 kg eau/kg MS, et de 6.692kg eau/kg MS pour la variété Louzi.

La collecte des données relatives à chaque expérience effectuées au niveau du laboratoire de séchage de l'ENSIA de Massy et après tout calcul fait, a conduit au tableau (V.1).

Tableau V.1 : Les résultats obtenus pour les variétés étudiées d'abricot.

	T [°C]	Teneur en base humide Humidité finale % (kg eau/kg Produit)	Teneur en base sèche Humidité finale (kg eau/kg MS)
Variété 1 Rosé	30	32.814	0.4884
	40	29.830	0.4251
	50	28.967	0.4078
	60	14.560	0.1704
Variété 2 Louzi	30	48.154	0.9288
	40	31.375	0.4572
	50	32.687	0.4856
	60	42.749	0.7467
Variété 3 Khed-Erroumia	30	10.610	0.1187
	50	34.206	0.5199
	60	37.578	0.6020

2.2 Courbes de séchage et interprétation :

Les figures qui suivent donneront l'évolution de la teneur en eau, la masse et la vitesse de séchage en fonction du temps pour les trois variétés d'Abricot produites dans la région de Batna (Rosé, Louzi, Khed-Erroumia) au cours du séchage et pour les conditions de séchage fixées à quartes variantes de températures T_i et une seule valeur de vitesse d'air asséchant V_a suivantes : 30°C, 40°C, 50°C, 60°C et 1m/s ainsi qu'une seule valeur d'humidité relative de l'air ambiant Hr_a .

Les courbes en pointillé, représentent les données expérimentales, celles en continu sont générées en utilisant le logiciel d'analyse et calcul statistique STATISTICA STASOFT version 6.

2.2.1 Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t pour les trois variétés

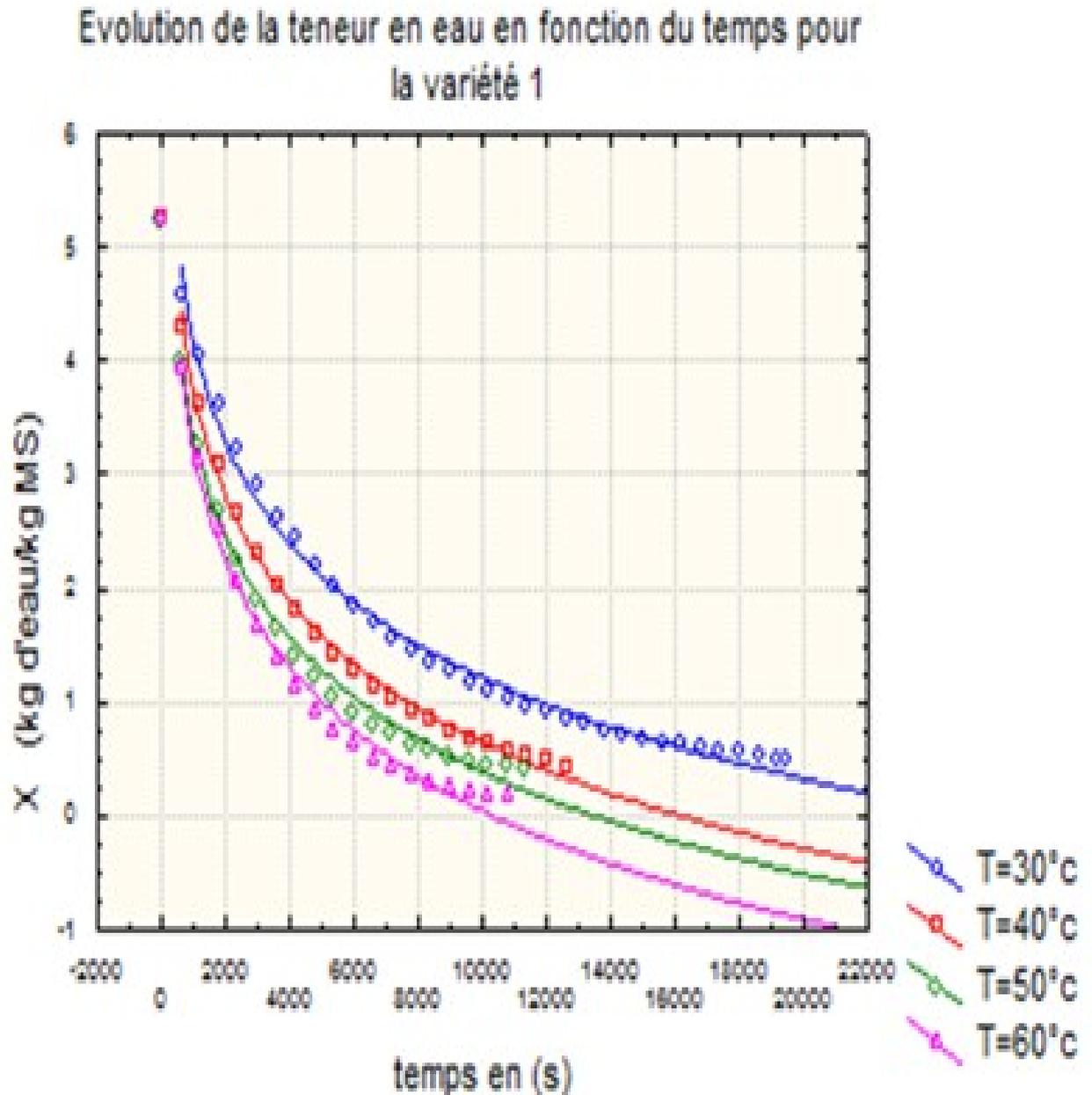


Figure V.1.1: Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t pour l'abricot Rosé.

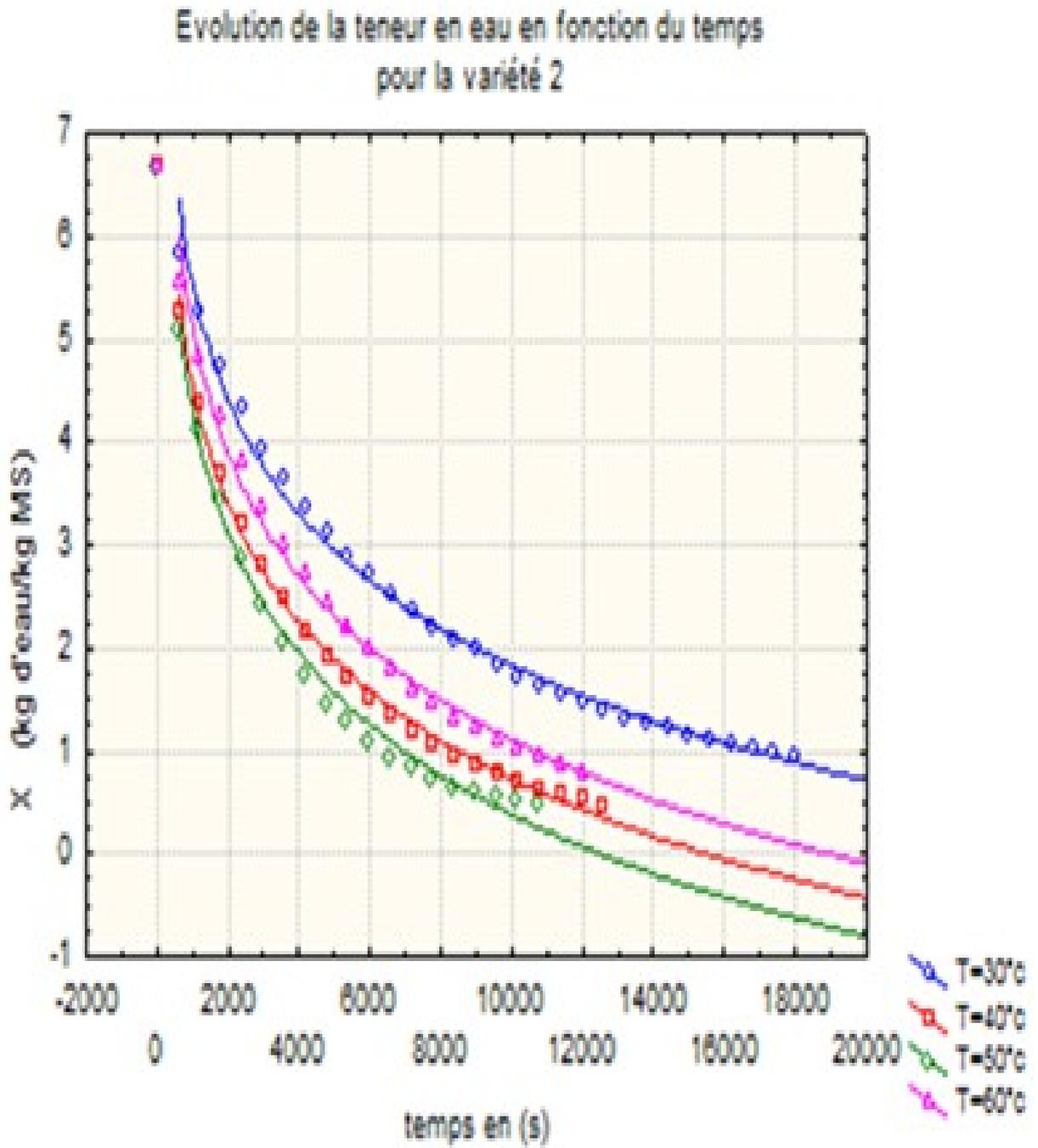


Figure V.1.2: Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t pour l'abricot Louzi.

Evolution de la teneur en eau en fonction du
temps pour la variété 3

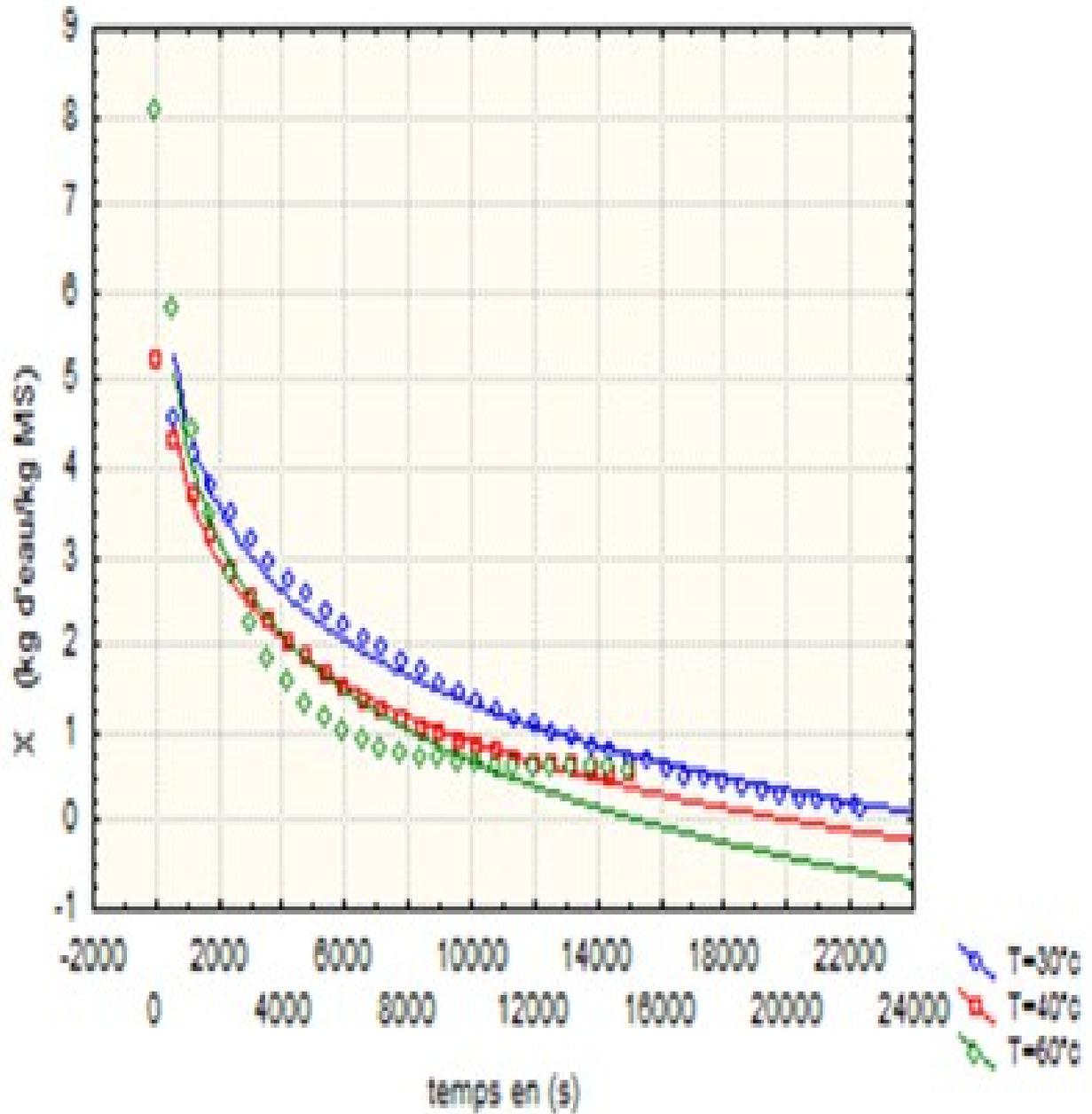


Figure V.1.3 : Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t pour l'abricot Khed-Erroumia.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Si on observe la figure (V.1), qui représente les courbes de la teneur en eau au cours du séchage pour les trois variétés d'abricot, tracée pour les trois températures choisies (30, 40, 50 et 60°C), on peut constater qu'il y a une différence entre les trois variétés d'Abricot.

Pour la variété 1 : L'échantillon au cours du séchage à la température de 60°C (figure V.1.1), a une teneur en eau plus élevée au départ mais, celle-ci n'est pas très liée au produit d'où elle est facilement retirée du produit, c'est pour cela que la courbe diminue rapidement par rapport aux autres échantillons à (30, 40 et 50°C) qui ont alors, une cinétique de séchage plus lente.

Pour la variété 2 : Ici il est observé que l'échantillon au cours du séchage à température de 50°C (figure V.1.2), a une teneur en eau plus élevée au départ aussi. Cette eau c'est l'eau libre et elle est donc retirée aisément du produit, c'est pour cela que la courbe diminue rapidement par rapport aux autres échantillons à (30, 40 et 60°C).

Pour la variété 3 : La même remarque que précédemment est valable pour le dernier graph (figure V.1.3).

Dans cette variété, la vitesse d'extraction des molécules d'eau du produit est plus importante pour le cas de l'échantillon séché à la température de 60°C, par rapport aux autres échantillons, d'où il s'en suit que la courbe à 60°C, diminue plus vite que les courbes obtenues pour les autres échantillons à (30 et 40°C).

Cette différence résulte dans les liaisons qui se forment avec l'eau dans le produit et l'effet des températures sur le séchage.

Les variétés 1 et 2 retiennent plus l'eau que la variété 3, il est donc plus difficile de leur retirer de l'eau. Inversement il sera plus facile de les réhydrater.

2.2.2 Évolution de la masse m en fonction du temps t pour les trois variétés

En observant la figure (V.2.1-3), on voit bien que la réduction de la masse du produit est plus importante et plus rapide pour les échantillons au cours du séchage à la température de 60°C que pour les autres échantillons à (30, 40 et 50°C).

Evolution de la masse pour la variété 1

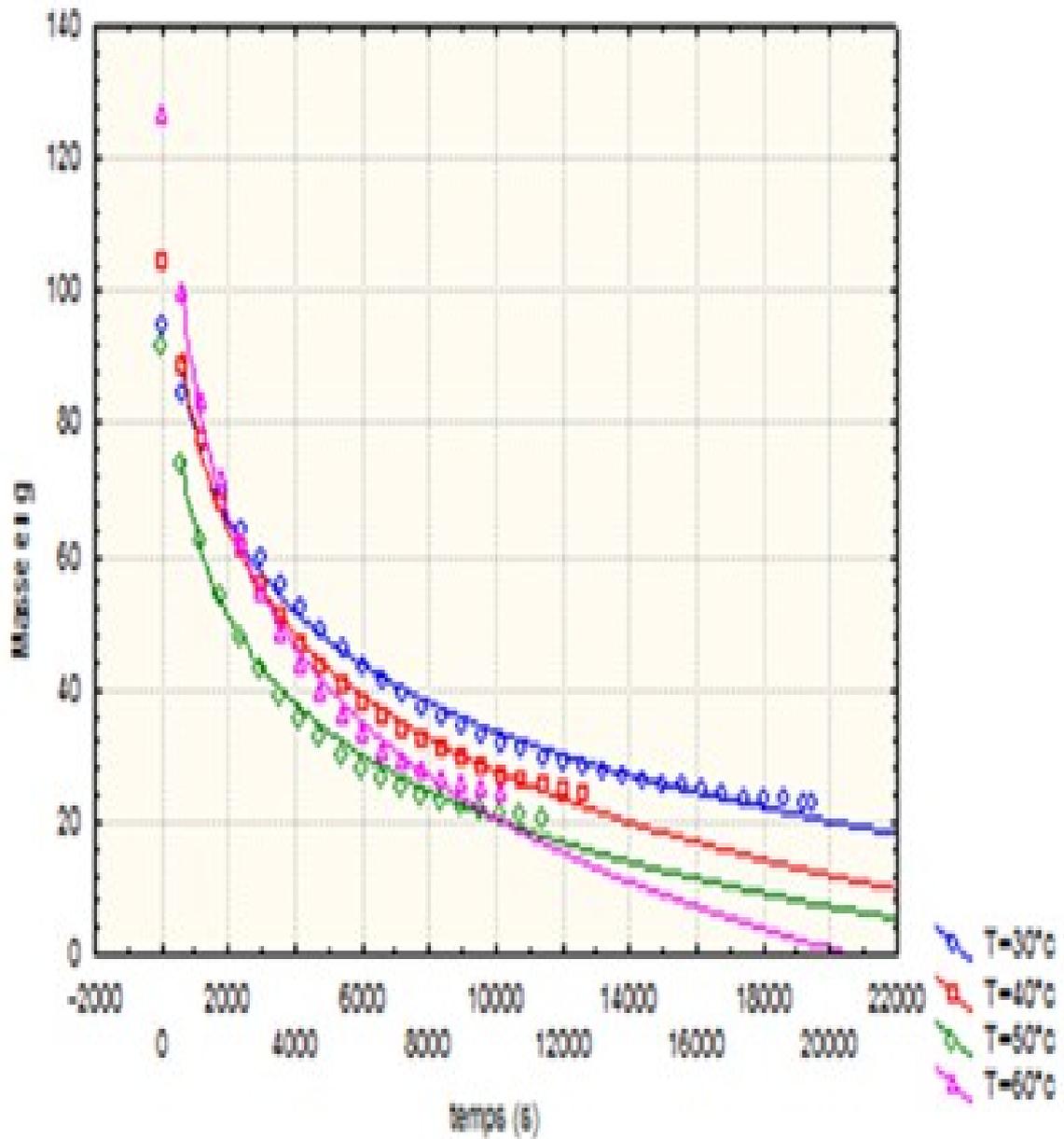


Figure V.2.1 : Évolution de la masse m en fonction du temps t pour la 1^{ère} variété.

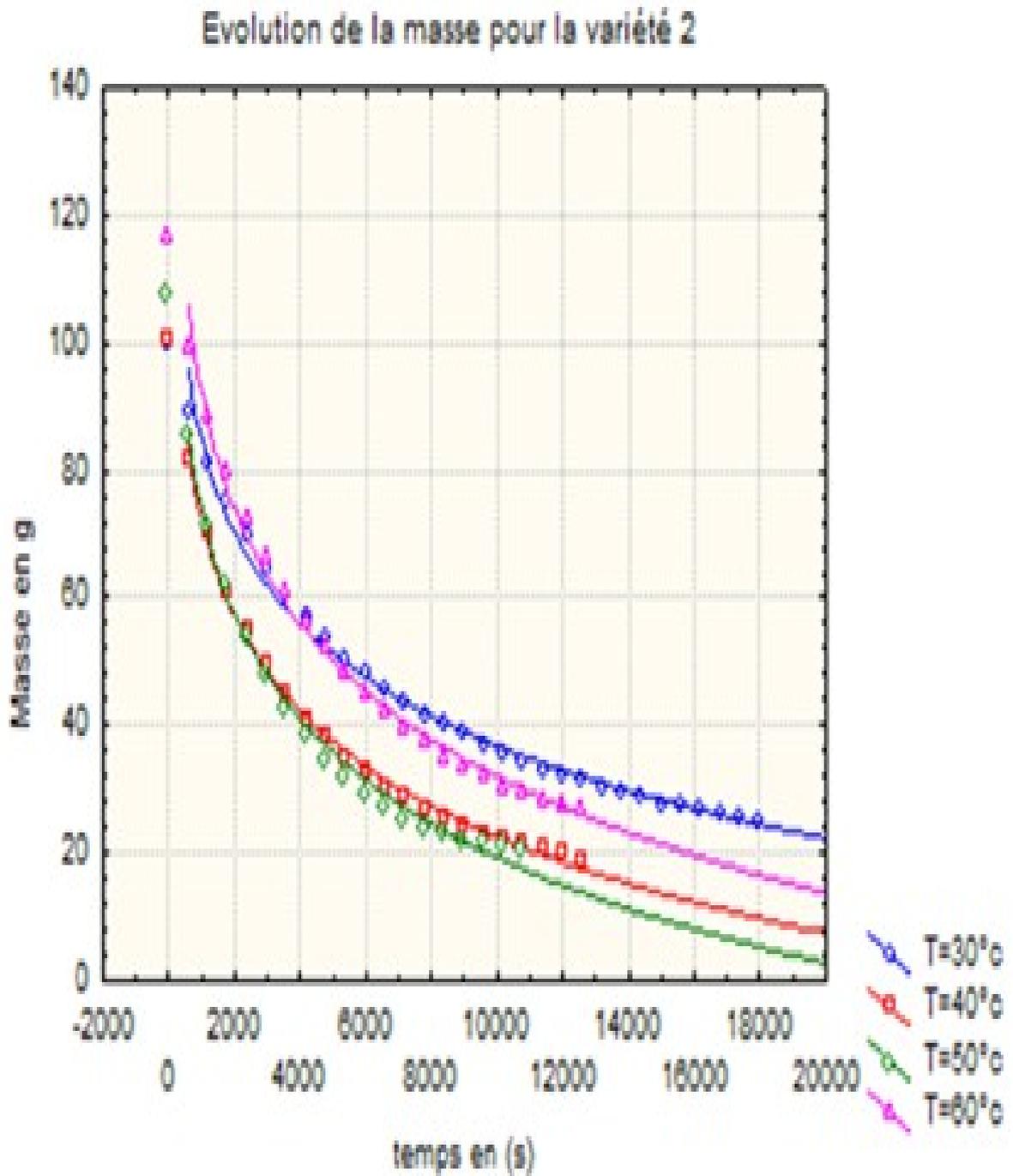


Figure V.2.2 : Évolution de la masse m en fonction du temps t pour la 2^{ème} variété.

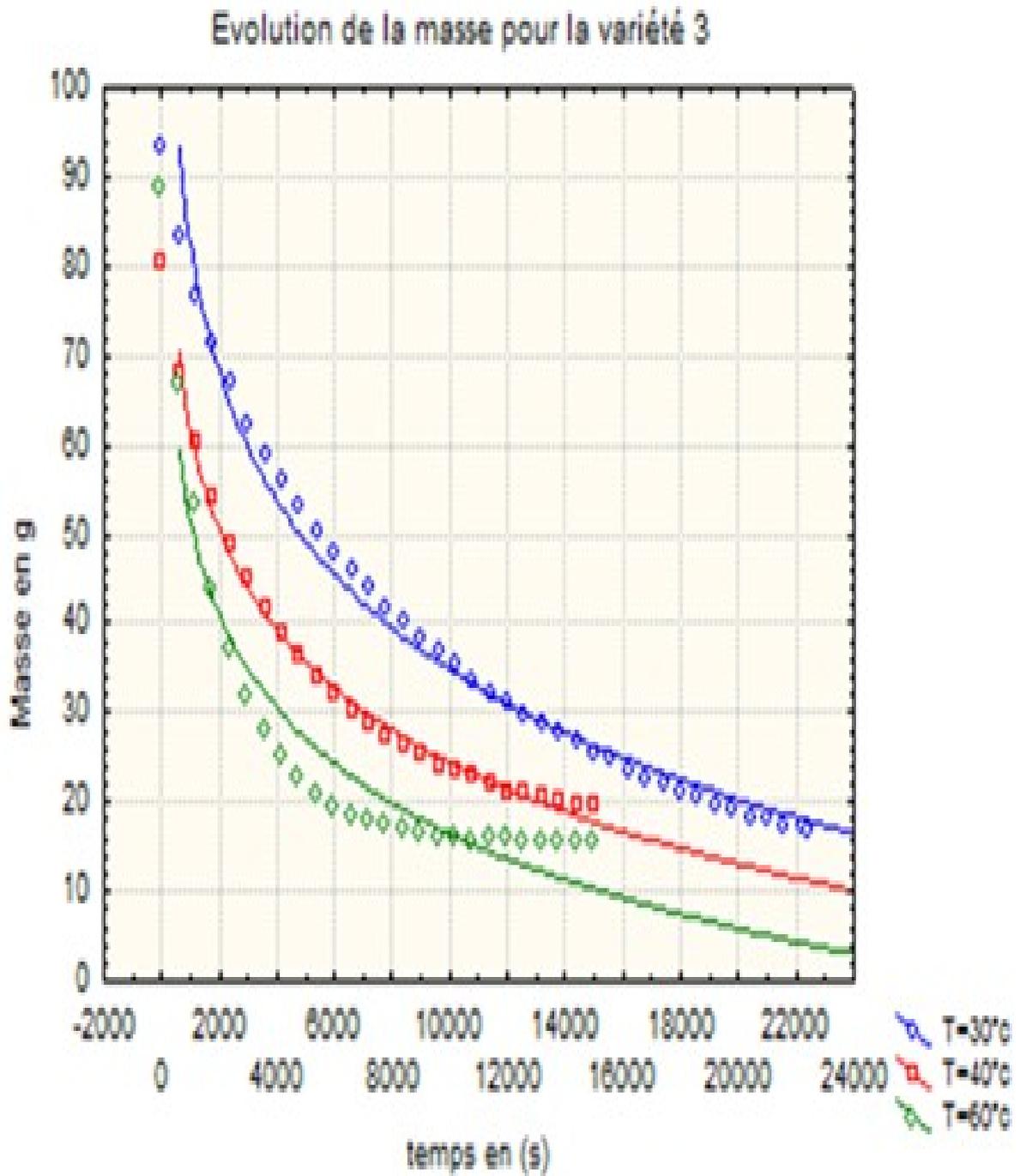
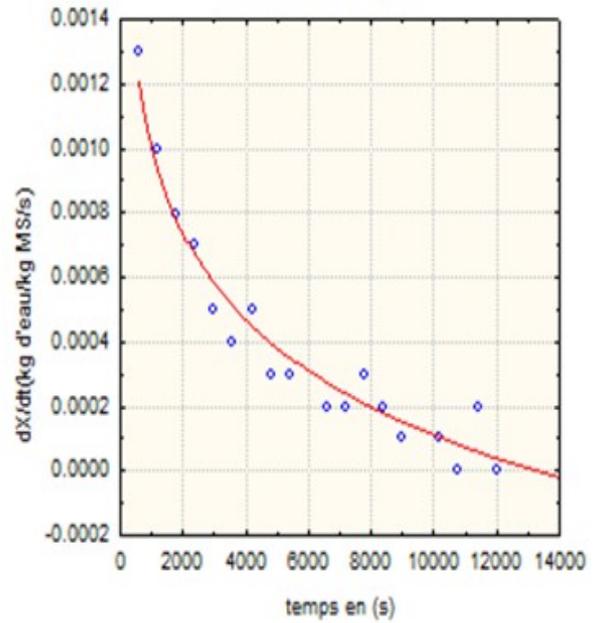


Figure V.2.3 : Évolution de la masse m en fonction du temps t pour la 3^{ème} variété.

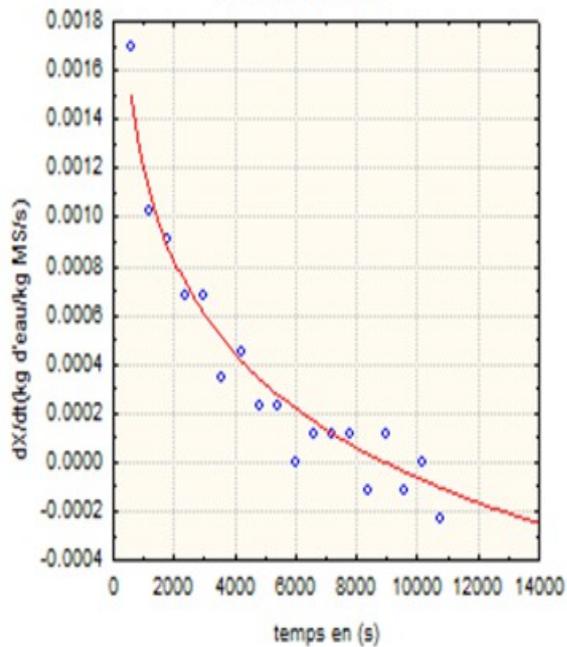
2.2.3 Évolution des cinétiques de séchage en fonction du temps t pour les trois variétés

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

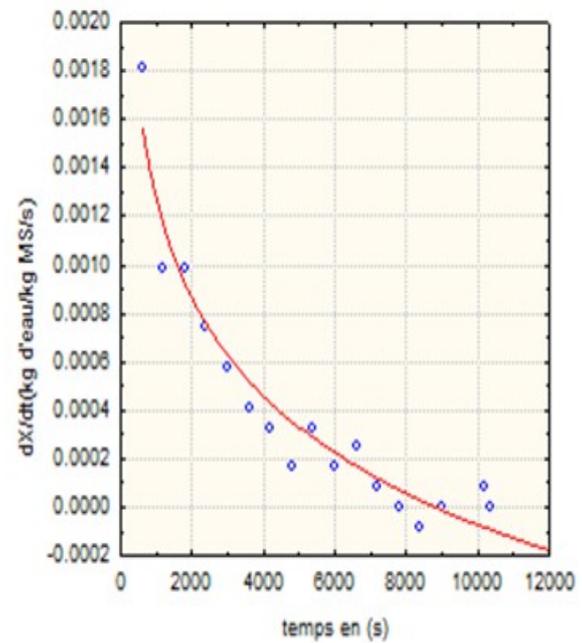
Cinétique de séchage en fonction du temps pour la variété 1 à T=40°C



Cinétique de séchage en fonction du temps pour la variété 1 à T=50°C



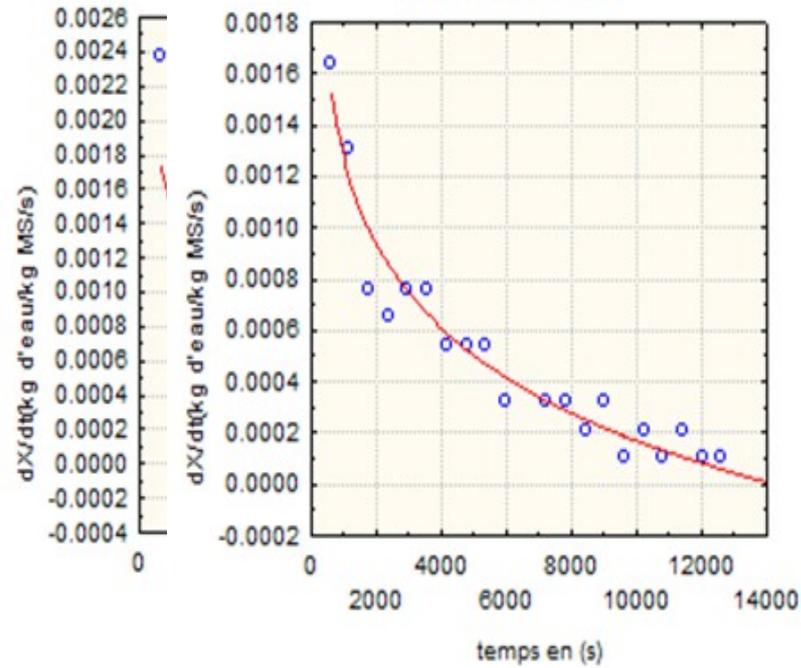
Cinétique de séchage en fonction du temps pour la variété 1 à T=60°C



Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

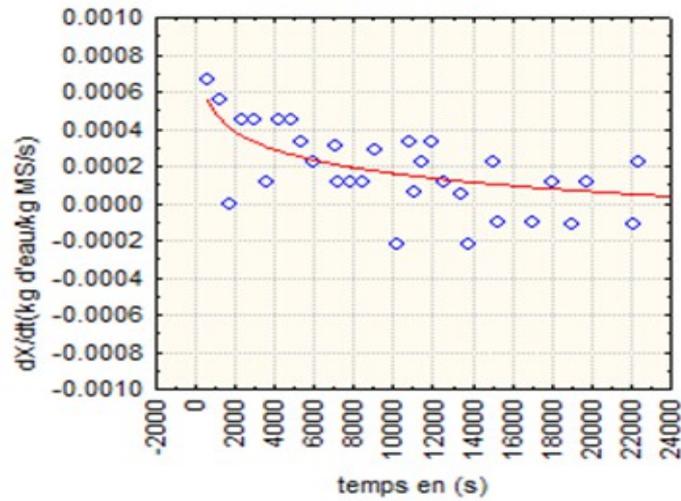
Cinétique

Cinétique de séchage en fonction du temps pour
la variété 2 à T=60°C



V.3.2 : Évolution de la cinétique de séchage en fonction du temps t pour la variété 2.

Cinétique de séchage en fonction du temps pour
la variété 3 à T=30°C



Partie Expérimentale
 Chapitre 2 : Résultats et discussions

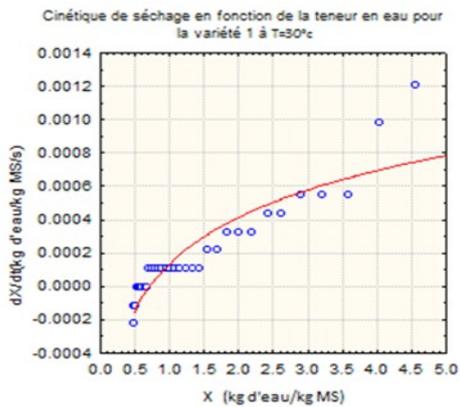
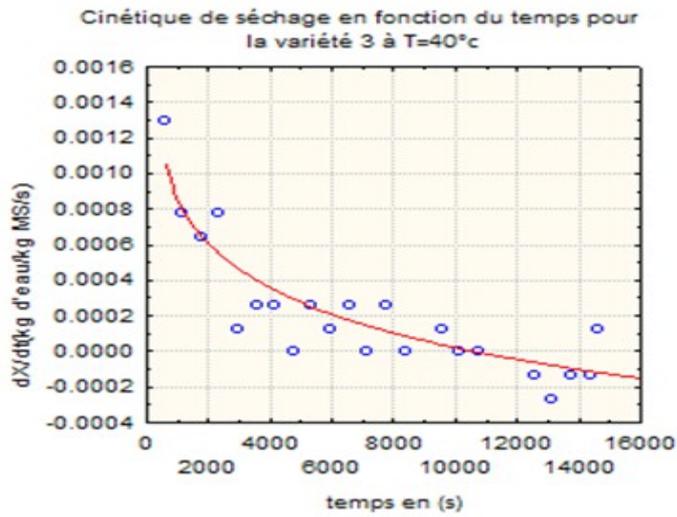
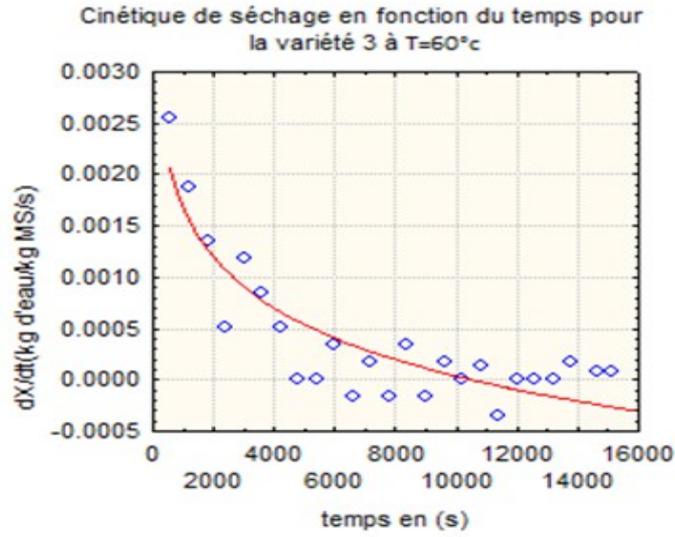
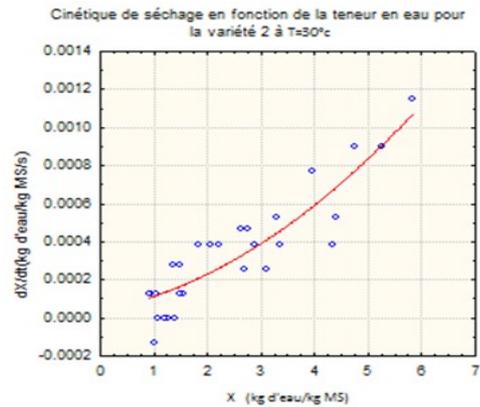


Figure V.3.3:
 Évolution la cinétique séchage fonction temps t pour la variété 3.



de
 de
 en
 du

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

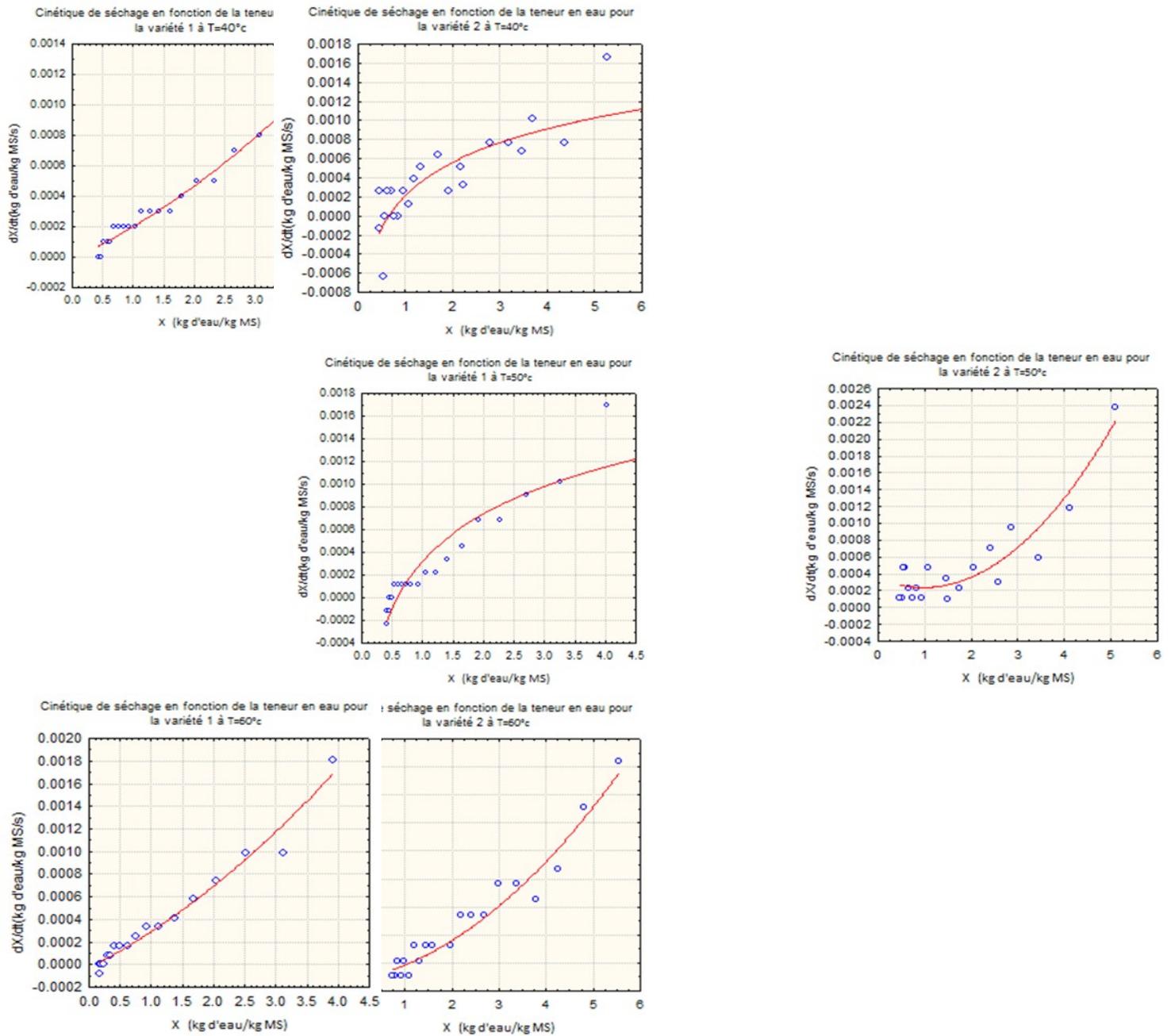


Figure V.4 : Variation des vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau.

D'après la figure (V.3.1-3), on remarque que la cinétique de séchage des échantillons d'abricot au cours du séchage à la température de 60°C est plus rapide que celle des autres échantillons aux températures de : 30, 40 et 50°C, à l'exception de l'échantillon de la variété 3 à la température de 50°C qui a manifesté une cinétique plus rapide que celle des autres échantillons températures de : 30 et 60°C.

Il est important de rappeler que lors d'un séchage par entraînement, on doit avoir dans un aspect théorique trois phases :

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

- Une phase de mise en température ou la cinétique de séchage est croissante et constante.
- Une phase de séchage à vitesse constante.
- Une phase de séchage à vitesse décroissante.

Il vient de suite, que la dernière phase est l'unique phase de séchage qui est observée au cours du séchage de ces trois variétés d'abricot.

Ce qui est valable pour tous les fruits et légumes conformément à la littérature dans ce domaine, comme il a été déjà illustré (Chapitre 3, partie 1).

2.2.4 Variation des vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau

On sait que pour le séchage d'un produit solide, on devrait retrouver les trois phases de séchage indiqués ci-dessus.

Or sur les figures (V.1-3), on ne peut pas distinguer les différentes phases. Pour cela il faut observer le dernier tracé sur la figure V4. Pour les échantillons des trois variétés on peut voir une modification de la pente (accélération du séchage).

2.3 Modélisation mathématique des cinétiques de séchage

2.3.1 Les paramètres statistiques

La modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage d'abricot est présentée numériquement (valeurs des paramètres, critères statistiques pour chaque modèle) dans les trois variétés d'abricot à quatre températures (Tableau V.2).

2.3.2 Détermination du modèle approprié :

Le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de séchage des abricots, dans notre présente étude, est basé sur la confrontation des courbes estimées par chacun des dix modèles à celles expérimentales avec analyse des résidus en appliquant aux différentes températures.

Tableau V.2 : les Paramètres statistiques pour chaque modèle.

Model	T (°C)	R ²			χ ²		
		Var1	Var2	Var3	Var1	Var2	Var3
Lewis	30	0.97274	0.96428	0.99113	0,000161442	0.000193045	0.000059684
	40	0.98150	0.97592	0.96619	0,000120107	0.000155508	0.000203203
	50	0.97434	0.98301	-	0,000171093	0.000116439	-
	60	0.99458	0.98356	0.94055	0,000041978	0.000103933	0.000317084

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Henderson and Pabis	30	0.98384		0.99562	0,000095995	0.000096372	0.000029638
	40	0.98887	0.98221	0.98111	0,000072635	0.000087469	0.000113956
	50	0.98285	0.98652	-	0,000114962	0.000075727	-
	60	0.99662	0.98901	0.94941	0,000026451	0.000051661	0.000270859
Page	30	0.99824	0.99914	0.99562	0,000010456	0.000004619	0.000029557
	40	0.99960	0.99992	0.99920	0,000002638	0.000000490	0.000004862
	50	0.99874	0.99946	-	0,000008502	0.000003667	-
	60	0.99988	0.99994	0.98571	0,000000994	0.000000397	0.000076554
Modified Page	30	0.99824	0.99914	0.99562	0,000010456	0.000004619	0.000029557
	40	0.99960	0.99992	0.99920	0,000002638	0.000000492	0.000004862
	50	0.99874	0.99946	-	0,000008502	0.000003667	-
	60	0.99988	0.99994	0.98571	0,000000994	0.000000397	0.000076554
Logarithmic	30	0.99856	0.99776	0.99588	0,000008534	0.000012173	0.000027884
	40	0.99770	0.99538	0.99692	0,000015044	0.000030053	0.000018652
	50	0.99772	0.99786	-	0,000015407	0.000014781	-
	60	0.99814	0.99788	0.99872	0,000014579	0.000013545	0.000006931
Tow- term	30	0.99978	0.99974	0.99766	0,000001256	0.000001405	0.000015921
	40	0.99994	0.99984	0.99946	0,000000333	0.000001032	0.000003259
	50	0.99934	0.99930	-	0,000004444	0.000004831	-
	60	0.99994	0.99966	0.99920	0,000000409	0,000002131	0.000004318
Tow- term exponential	30	0.99598	0.99482	0.99758	0,000023876	0.000028061	0.000016414
	40	0.99894	0.99740	0.99412	0,000006965	0.000016920	0.000035426
	50	0.99536	0.99836	-	0,000031033	0.000011284	-
	60	0.99990	0.99942	0.96782	0,000000842	0.000003640	0.000172283
Approximation of diffusion	30	0.99974	0.99968	0.99740	0,000001580	0.000001751	0.000017559
	40	0.99994	0.99984	0.99940	0,000000371	0.000001054	0.000003597
	50	0.99928	0.99926	-	0,000004846	0.000005060	-
	60	0.99994	0.99964	0.99904	0,000000407	0.000002247	0.000005163
Verma et al.	30	0.99974	0.99968	0.99766	0,000001580	0.000001751	0.000015880
	40	0.99994	0.99984	0.99940	0,000000371	0.000001054	0.000003597
	50	0.99928	0.99926	-	0,000004846	0.000005060	-
	60	0.99994	0.99964	0.99904	0,000000407	0.000002247	0.000005163
Wang and Singh	30	0.93574	0.95279	0.95142	0,000381848	0,000255934	0.000328483
	40	0.94612	0.92158	0.93051	0,000369364	0,000508818	0.000419252
	50	0.91983	0.93752	-	0,000537537	0,000430456	-
	60	0.93642	0.96528	0.72122	0,000601391	0,000220780	0.001492958

On a procédé d'autre part à l'analyse statistique utilisant les critères suivants :

- le plus grand des valeurs de R^2 et le plus petit pour le χ^2 .

En examinant les deux critères statistiques, on peut conclure que le huitième modèle (**Tow-term**) est le mieux adapté pour l'évaluation des valeurs théoriques des courbes de séchage des trois variétés d'abricot étudiées dans les conditions de séchage citées auparavant.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Enfin l'expression de l'équation du modèle approprié pour décrire le séchage en couche mince des trois variétés d'abricots de la région des Aurès est donnée par :

$$MR = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t) \quad (5.1)$$

2.3.2.1 Les valeurs des paramètres extraites :

▪ **La variété 1 :**

Tableau V.3: Valeurs des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 extraites pour la variété 1.

Model	T (°C)	A_1	k_1	A_2	k_2
Two-term	30	0.568788	0.000310	0.422572	0.000081
	40	0.637125	0.000165	0.360869	0.000644
	50	0.552726	0.000611	0.438532	0.000160
	60	0.146675	0.001854	0.853053	0.000328

▪ **La variété 2 :**

Tableau V.4: Valeurs des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 extraites pour la variété 2.

Model	T (°C)	A_1	k_1	A_2	k_2
Two-term	30	0.400577	0.000376	0.590458	0.000083
	40	0.699608	0.000188	0.298041	0.000964
	50	0.594347	0.000211	0.399197	0.000758
	60	0.774951	0.000160	0.219928	0.000800

▪ **La variété 3 :**

Tableau V.5: Valeurs des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 extraites pour la variété 3.

Model	T (°C)	A_1	k_1	A_2	k_2
Two-term	30	0.092698	0.001895	0.908031	0.000128
	40	0.562085	0.000124	0.429186	0.000538
	60	0.121701	0.000037	0.864980	0.000554

2.3.3 Application de l'équation du modèle approprié (Two-term) :

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.

L'interprétation des figures en dessous représentant l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps (pour les quatre températures appliquées) nous a conduits à la constatation suivante :

Les courbes prédites par ce modèle à deux termes, sont pratiquement confondues avec les courbes expérimentales pour tous les échantillons des trois variétés pour les quatre températures (30, 40, 50 et 60 °C).

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

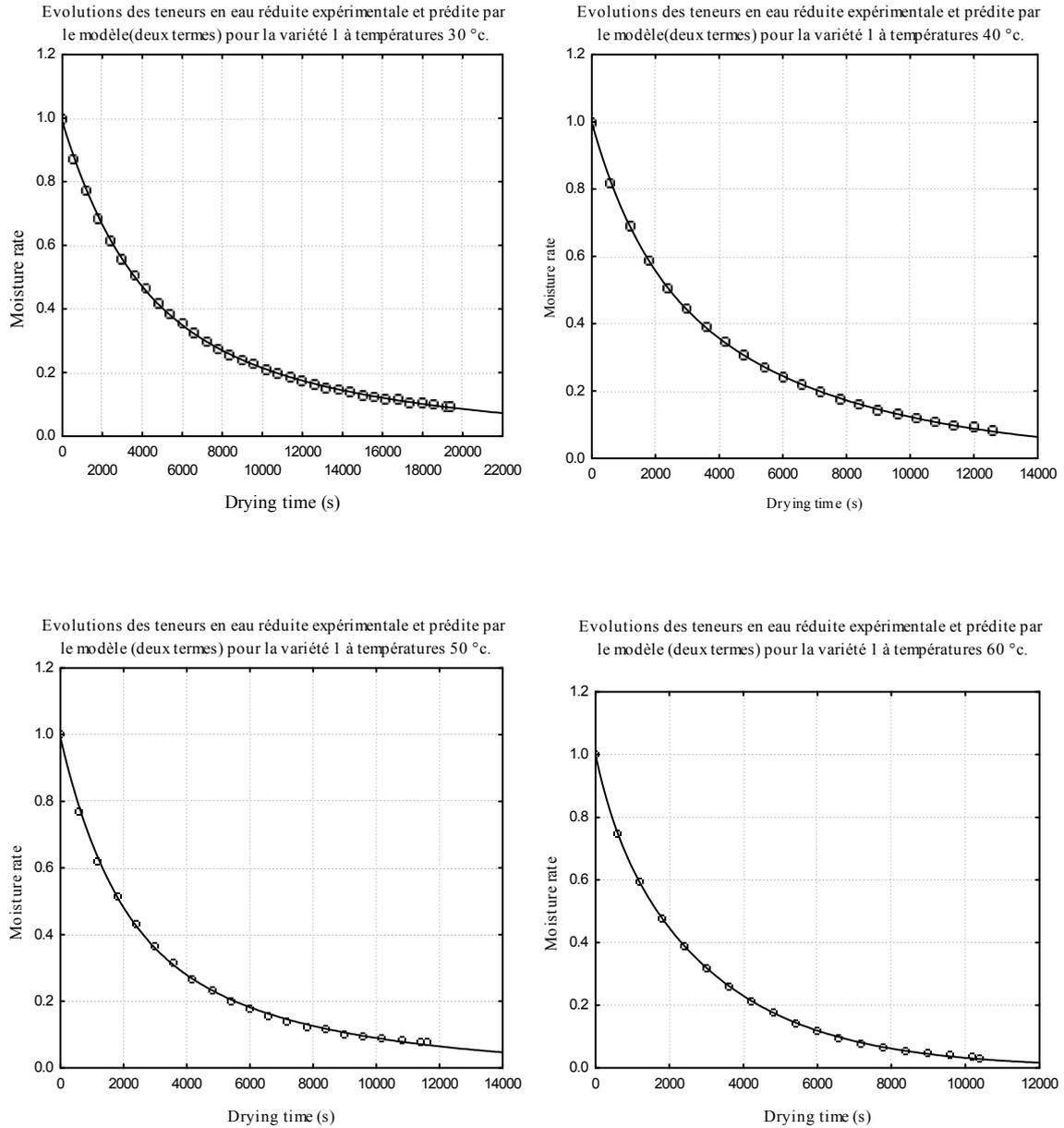
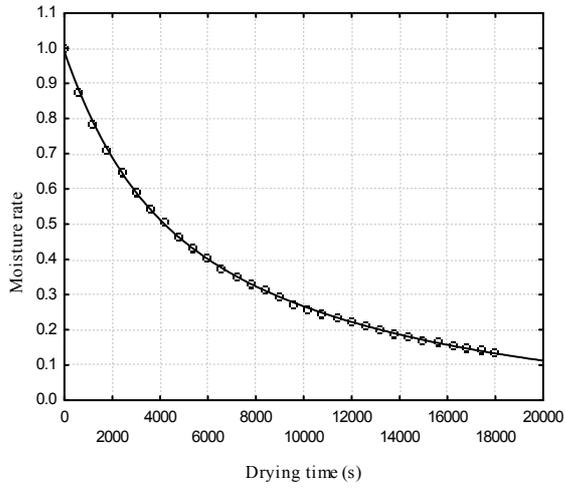


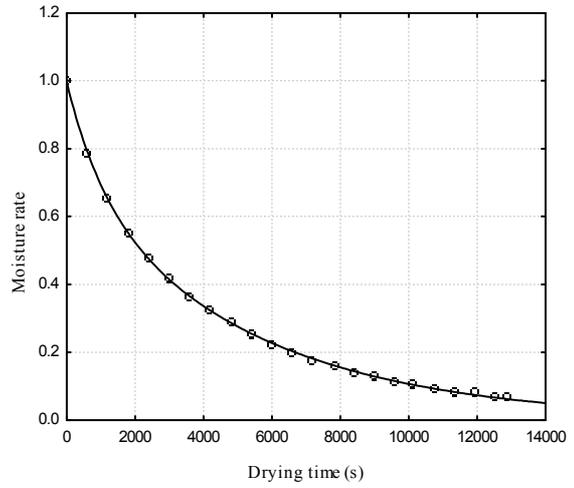
Figure (V.5) : Evolutions des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle (Two-term) pour la variété 1, aux températures 30, 40, 50 et 60 °C.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

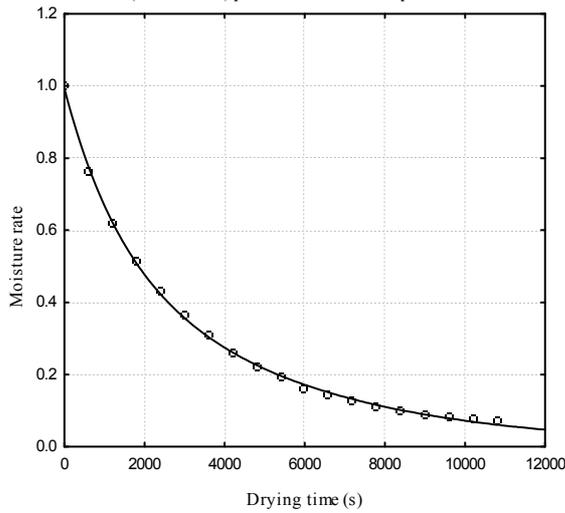
Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle (deux termes) pour la variété 2 à températures 30 °c.



Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle (deux termes) pour la variété 2 à températures 40 °c.



Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle (deux termes) pour la variété 2 à températures 50 °c.



Evolutions des teneurs en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle (deux termes) pour la variété 2 à températures 60 °c.

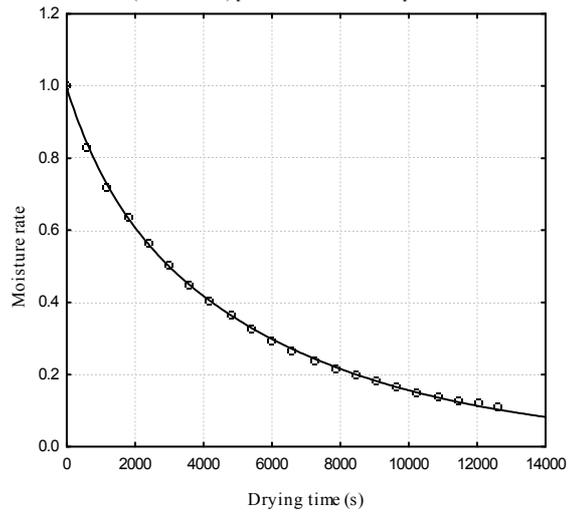


Figure (V. 6) : Evolution des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle (Two-term) pour la variété 2 aux températures 30, 40, 50 et 60 °C.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

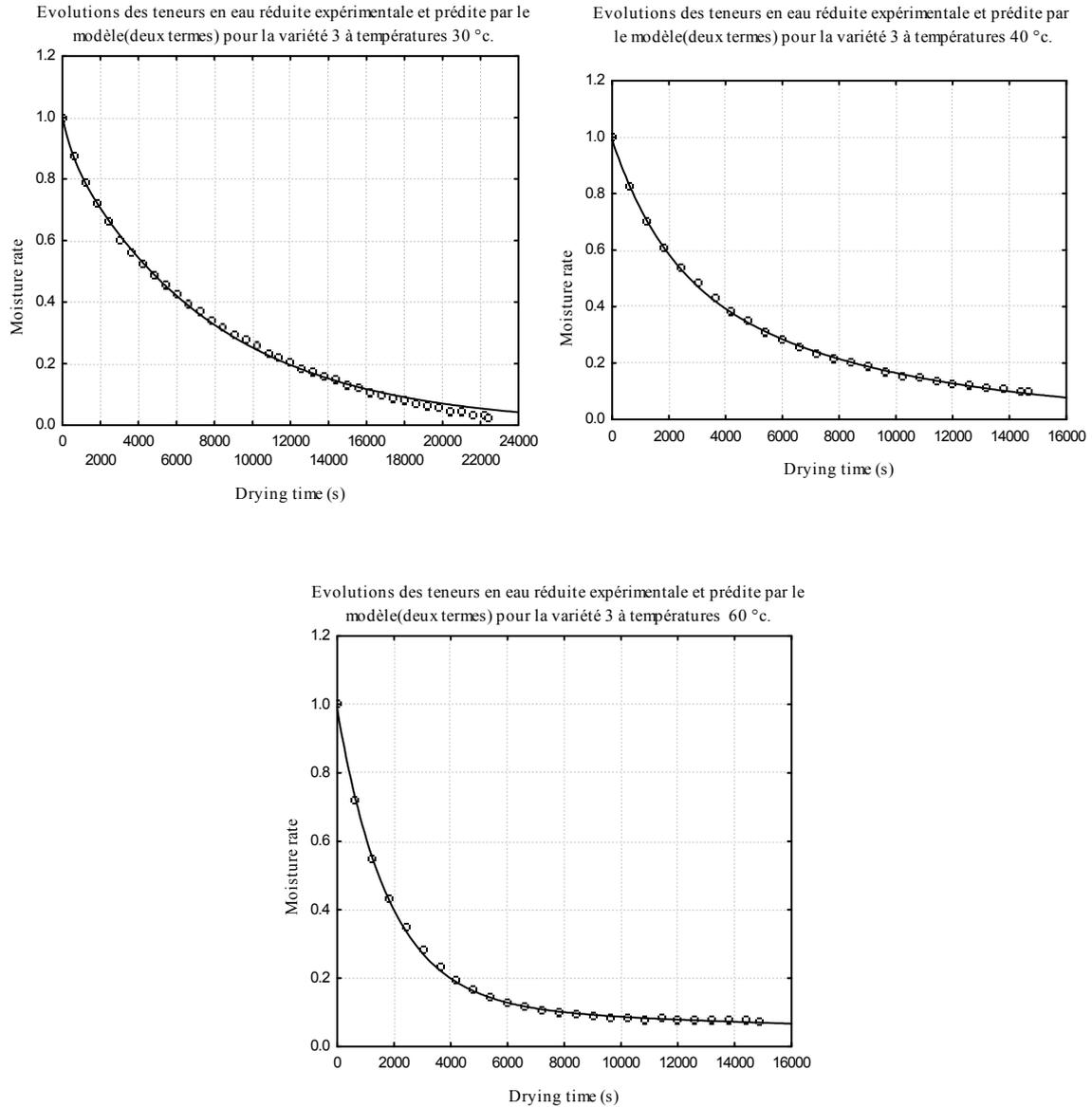


Figure (V. 7) : Evolution des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle (Two-term) pour la variété 3 aux températures 30, 40 et 60 °C.

2.4 Développement d'une équation générale de séchage d'abricots

2.4.1 Expression des paramètres du modèle en fonction de la température

Les résultats suivants sont obtenus par un lissage des courbes à l'aide du logiciel CURVE-EXPERT pour chacun des paramètres en utilisant la fonction : recherche du meilleur modèle. Les relations empiriques ainsi retrouvées entre les paramètres de l'équation (5.1) et la température sont développées et sont représentées graphiquement dans les Figures (V.8), (V.9) et (V.10) puis récapitulées dans les tableaux (V.6, (V.7) et (V.10) accompagnés des coefficients et critères statistiques (Erreur Standard s et le coefficient de corrélation r) pour chaque équation.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

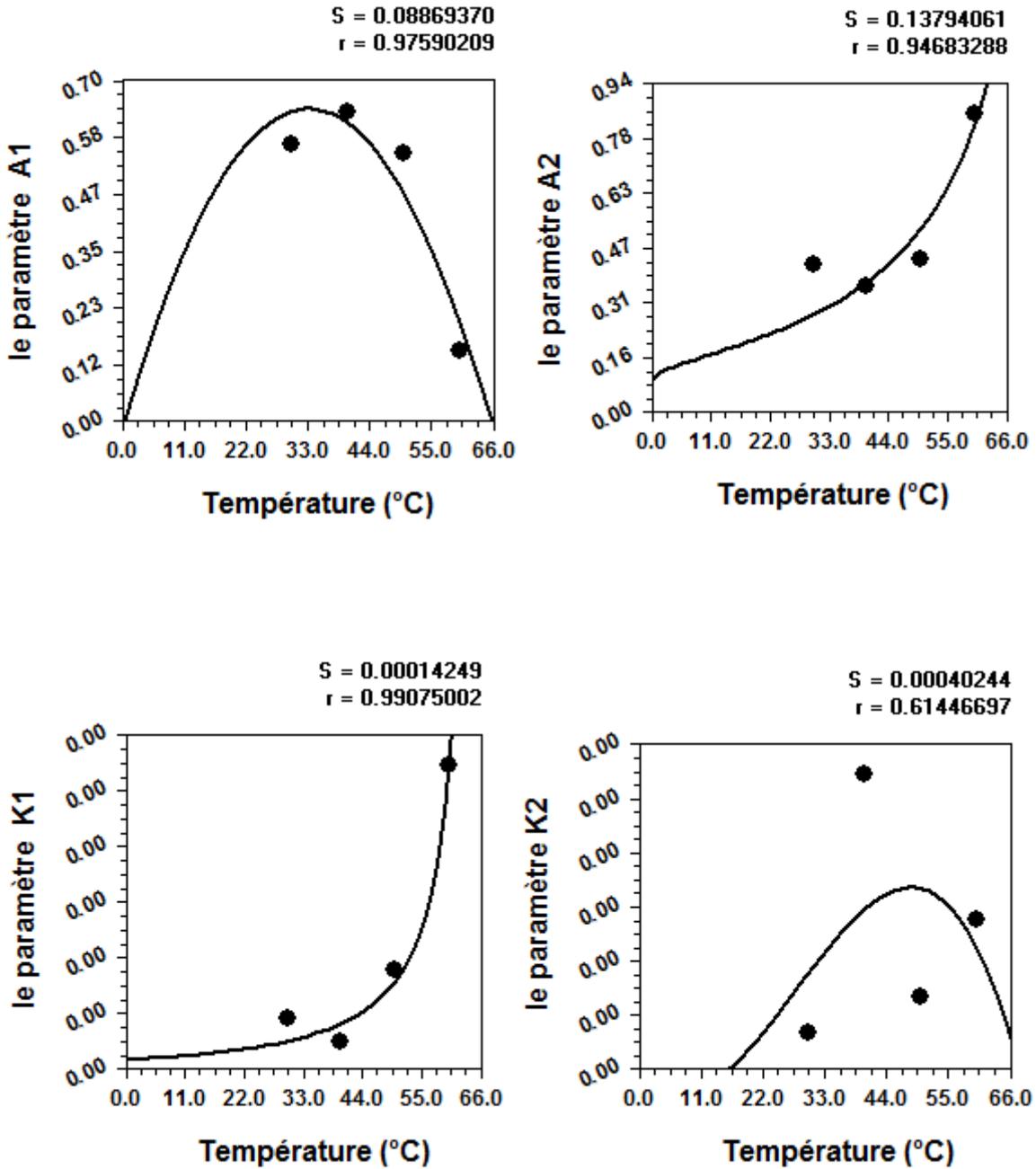


Figure (V.8): Evolution des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 avec la température pour la variété 1.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

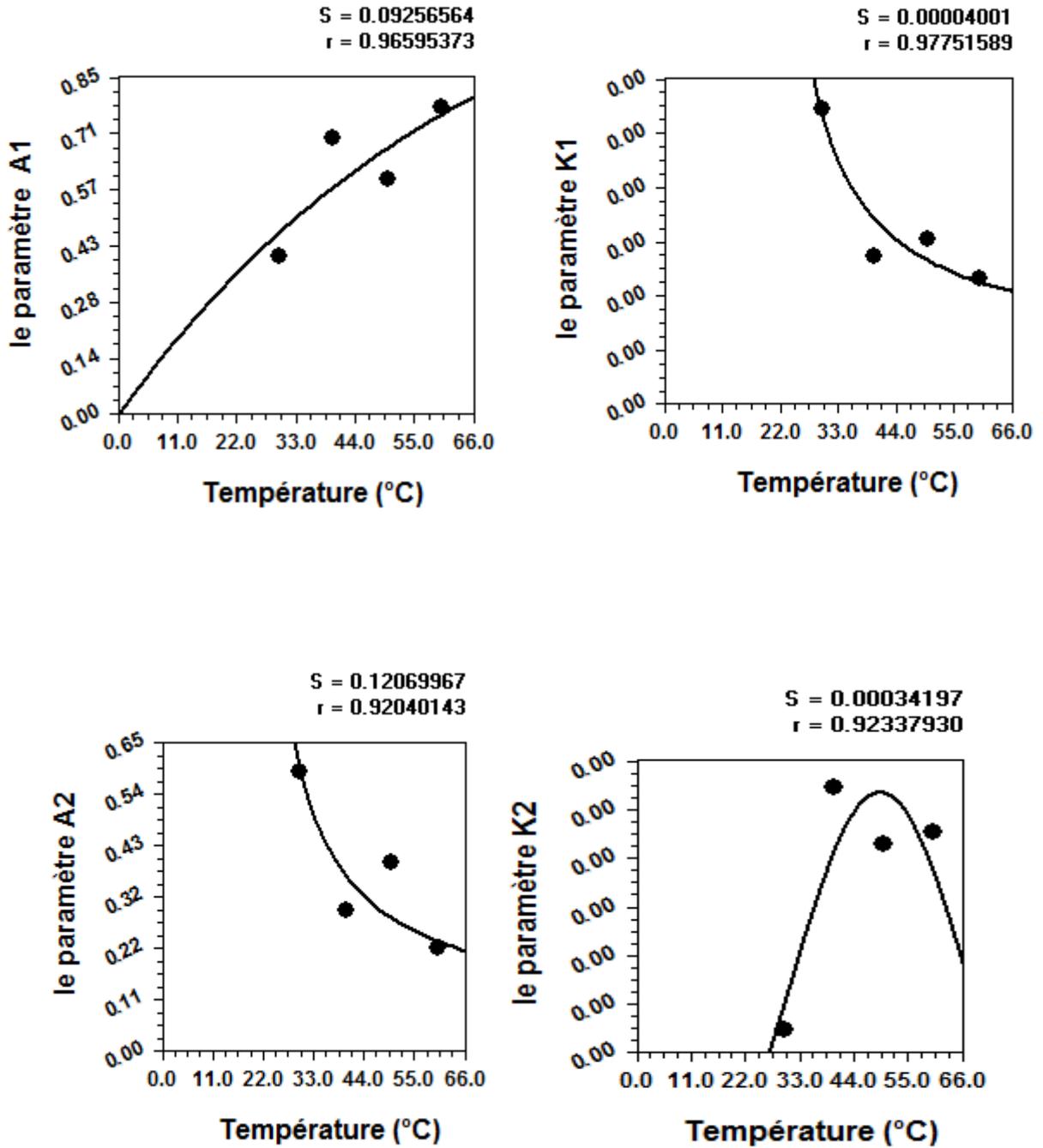


Figure (V.9): Evolution des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 avec la température pour la variété 2.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

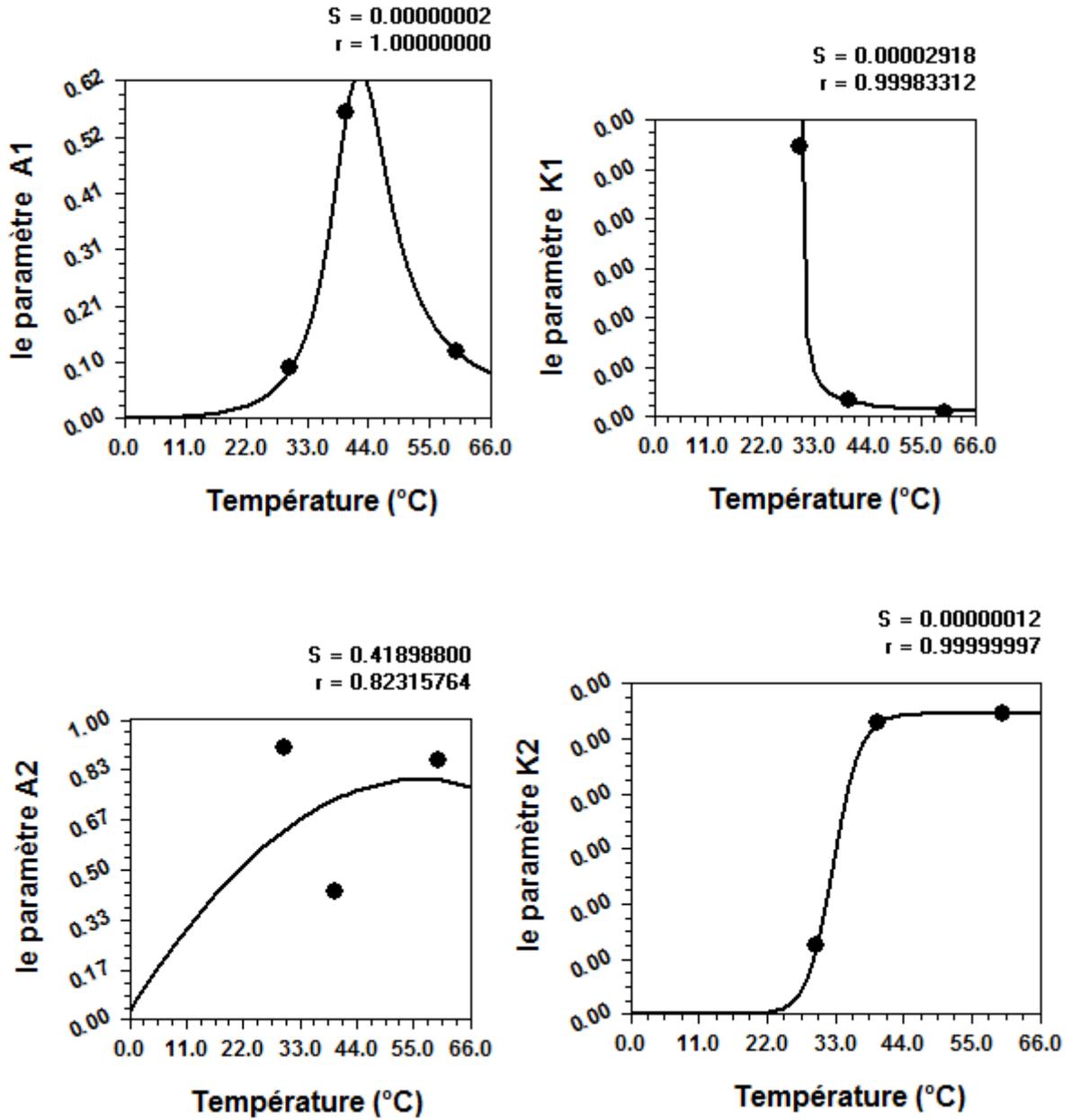


Figure (V.10): Evolution des paramètres A_1 , A_2 , k_1 et k_2 avec la température pour la variété 3.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Tableau (V.6) : Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec les critères d'analyse statistique pour la variété 1.

<i>Paramètre</i>	<i>Equation appropriée</i>	<i>Valeurs des Coefficients</i>	<i>Erreur Standard s</i>	<i>Coeff. de corrélation r</i>
A₁	$a+bT+cT^2$	a = -0.012236341 b = 0.039818291 c = -0.000604743	0.0886937	0.9759021
K₁	$a/(1+b \exp (-cT))$	a = 0.000261871 b = -5.491687600 c = 0.026207323	0.0001425	0.9907500
A₂	$1/(a+bT^c)$	a = 10.44089100 b = -1.615041200 c = 0.425788640	0.1379406	0.9468329
K₂	$a+bT+cT^2$	a = -6.50968e-006 b = -1.34190e-005 c = 1.07992e-006	0.0004024	0.6144670

Tableau (V.7) : Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec les critères d'analyse statistique pour la variété 2.

<i>Paramètre</i>	<i>Equation appropriée</i>	<i>Valeurs des Coefficients</i>	<i>Erreur Standard s</i>	<i>Coeff. de corrélation r</i>
A₁	$a(1-\exp(-bT))$	a = 1.2841100 b = 0.0149033	0.0925656	0.9659537
K₁	$1/(a+bT^c)$	a = -94911.561 b = 81303.842 c = 0.0538848	0.0000400	0.9775159
A₂	$1/(a+bT^c)$	a = -10.029467 b = 4.3792686 c = 0.2894822	0.1206997	0.9204014
K₂	$a+b \cos(cT+d)$	a = 0.0002689 b = 0.0006792 c = 0.0879973 d = 1.9591584	0.0003420	0.9233793

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Tableau (V.8) : Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec les critères d'analyse statistique pour la variété 3.

<i>Paramètre</i>	<i>Equation appropriée</i>	<i>Valeurs des Paramètres du modèle</i>	<i>Erreur Standard s</i>	<i>Coefficient de corrélation r</i>
A₁	$T/(a+bT+c \sqrt{T})$	a =11036.563 b =262.14454 c =-3391.7295	0.0000000	1.0000000
K₁	$a/(1+b \exp(-cT))$	a =2.613895e-005 b =-2.1084078 c =0.025326816	0.0000292	0.9998331
A₂	$a+bT+cT^2$	a =0.034210227 b =0.027303442 c =-0.0002432936	0.4189880	0.8231576
K₂	$a/(1+b \exp(-cT))$	a =0.0005540790 b =4521742.6 c =0.47074021	0.0000001 2	0.99999997

2.4.2 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.

$$X(t, T) = A_1(T) \cdot \exp(-k_1(T) \cdot t) + A_2(T) \cdot \exp(-k_2(T) \cdot t) \quad (5-2)$$

Ou on a ;

Pour la variété 'Louzi', on a :

$$A_1(T) = -0.012236341 + 0.039818291T - 0.000604743 T^2$$

$$k_1(T) = 0.0002618715 / (1 - 5.4916876 \exp(-0.026207323T))$$

$$A_2(T) = 1 / (10.440891 + 1.6150412T^{0.425})$$

$$k_2(T) = -6.50968e-006 - 1.3419e-005T + 1.07992e-006T^2$$

Avec $30^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$.

Pour la variété 'Rosé', on a :

$$A_1(T) = 1.28411 (1 - \exp(-0.014903398T))$$

$$k_1(T) = 1 / (-94911.561 + 81303.842 T^{0.0538})$$

$$A_2(T) = 1 / (-10.029467 + 4.3792686T^{0.2894})$$

$$k_2(T) = 0.0002689820 + 0.0006792905 \cos(0.087997345T + 1.9591584)$$

Avec $30^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$.

Pour la variété 'Khed-Erroumia', on a :

$$A_1(T) = T / (11036.563 + 262.14454T + 3391.7295 \sqrt{T})$$

$$k_1(T) = 2.613895e-005 / (1 - 2.1084078 \exp(-0.025326816T))$$

$$A_2(T) = 0.034210227 + 0.027303442T - 0.0002432936T^2$$

$$k_2(T) = 0.0005540790 / (1 + 4521742.6 \exp(-0.47074021T))$$

Avec $30^\circ\text{C} \leq T \leq 60^\circ\text{C}$.

2.5 Détermination de la teneur en eau de l'équilibre (isothermes de désorption)

A l'aide d'une balance électronique à affichage numérique, de précision 0,001 g, chaque échantillon est pesé régulièrement par intervalle de temps variable selon la teneur en eau initiale mais la première pesée ne doit être effectuée qu'après une période d'attente minimale dans les étuves allant de quatre jours, jusqu'à l'obtention d'une masse fixe (masse humide du produit m_{he}) indiquant la fin de l'échange entre le produit et l'air ambiant. Ceci caractérise la position d'équilibre hygroscopique.

La masse humide = m_h = masse (tare+produit humide) – masse (tare vide).

La masse sèche = m_s = masse (tare+produit sèche) – masse (tare vide).

$$X_{eq} = (m_{he} - m_s) / m_s \quad (3.1)$$

Les teneurs en eau d'équilibre X_{eq} de deux variétés d'abricot (Rosé et Louzi, choisies pour leur production abondante dans la région des Aurés) sont déterminées pour deux valeurs de la température de travail (disponibilité de deux étuves seulement) : 30 et 60°C sont présentées sur le tableau (3.1) qui regroupe également les valeurs standards des humidités relatives H_r de l'air données pour les sept sels en fonction de la température. On a pris deux échantillons pour chaque variété pour assurer la répétition des résultats et minimiser les erreurs. Les expériences pour l'obtention des isothermes de sorption, se sont déroulées dans le même laboratoire, en utilisant des échantillons du même lot d'abricot utilisé pour les cinétiques et pour simplifier la saisie des données on a procédé à la notation suivante :

- Les variétés d'abricot sont abrégées comme suit: Rosé = Var 1, Louzi = Var 2.
- Les températures de travail $T_1 = 30^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$.
- Les Sels saturés: 1: LiCl; 2: MgCl₂; 3: NaBr; 4: KI; 5: NaCl; 6: KCl; 7: K₂SO₄.

On pose aussi T_1 ijk, T_2 ijk, tel que :

- $i=1-7$: indice correspondant à l'un des 07 sels utilisés pendant les expériences.
- $J=1-2$: indice correspondant à la température de séjour de l'échantillon dans l'étuve :
1 pour la valeur de 30°C et 2 pour 60°C)
- $k=1-2$: numéro d'échantillon

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Toutes les valeurs de l'expérience sont reportées dans le tableau (3.1), tracé ci-dessus.

Tableau (3.1) : Les résultats obtenus pour les deux variétés d'abricot.

	Sels		$X_{eq}=(m_r-m_s)/m_s$	H_r
Var 1 Ech 1 T1	LiCl	T1 111	2,29470122	0,1128
	MgCl2	T1 211	3,33940126	0,3244
	NaBr	T1 311	4,40353308	0,56
	KI	T1 411	5,69825659	0,6789
	NaCl	T1 511	6,40104347	0,751
	Kcl	T1 611	7,21536969	0,836
	K2SO4	T1 711	10,5846778	0,97
Var 1 Ech 2 T1	1	T1 112	1,70496748	0,1128
	2	T1 212	2,16047477	0,3244
	3	T1 312	3,02452016	0,56
	4	T1 412	3,43292361	0,6789
	5	T1 512	3,65681073	0,751
	6	T1 612	4,52561587	0,836
	7	T1 712	6,78122254	0,97
Var 2 Ech 1 T1	1	T1 121	0,94744197	0,1128
	2	T1 221	2,08099601	0,3244
	3	T1 321	3,84423913	0,56
	4	T1 421	4,29119938	0,6789
	5	T1 521	4,66301199	0,751
	6	T1 621	5,12345441	0,836
	7	T1 721	7,71623861	0,97
Var 2 Ech 2 T1	1	T1 122	0,93838783	0,1128
	2	T1 222	0,99839226	0,3244
	3	T1 322	3,59521151	0,56
	4	T1 422	5,02614077	0,6789
	5	T1 522	6,63386504	0,751
	6	T1 622	6,81537057	0,836
	7	T1 722	8,59759779	0,97
Var 1 Ech 1 T2	1	T2 111	0,42708816	0,1095
	2	T2 211	1,93861391	0,2926
	3	T2 311	2,98283661	0,497
	4	T2 411	3,91618615	0,6311
	5	T2 511	3,25077404	0,745
Var 1 Ech 1 T2	6	T2 611	3,37944032	0,803
	7	T2 711	4,42852442	0,957
Var 1 Ech 2 T2	1	T2 112	0,27114896	0,1095
	2	T2 212	0,57422443	0,2926
	3	T2 312	0,92339753	0,497
	4	T2 412	1,67961616	0,6311
	5	T2 512	2,49783913	0,745

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

	6	T2 612	3,04859602	0,803
	7	T2 712	4,33671771	0,957
Var 2 Ech 1 T2	1	T2 121	0,38544658	0,1095
	2	T2 221	0,97208962	0,2926
	3	T2 321	1,40609198	0,497
	4	T2 421	1,94315612	0,6311
	5	T2 521	2,07103686	0,745
	6	T2 621	3,19432153	0,803
	7	T2 721	4,70858803	0,957
Var 2 Ech 2 T2	1	T2 122	0,03405068	0,1095
	2	T2 222	0,25213622	0,2926
	3	T2 322	0,47629303	0,497
	4	T2 422	0,79814116	0,6311
	5	T2 522	1,04760502	0,745
	6	T2 622	2,42810922	0,803
	7	T2 722	3,39653278	0,957

Courbes expérimentales

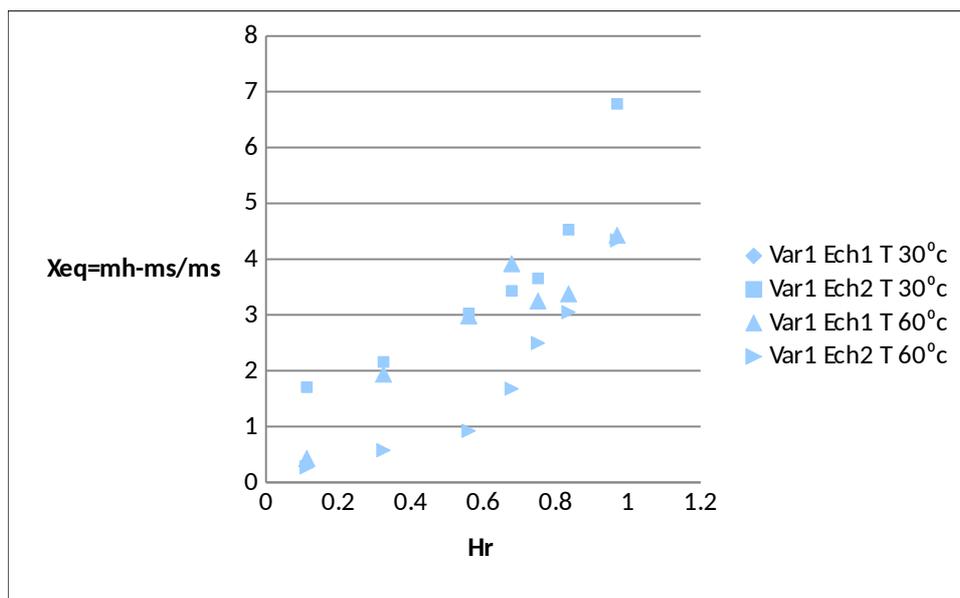


Figure (3.1) : courbes de la teneur en eau de la variété 1.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

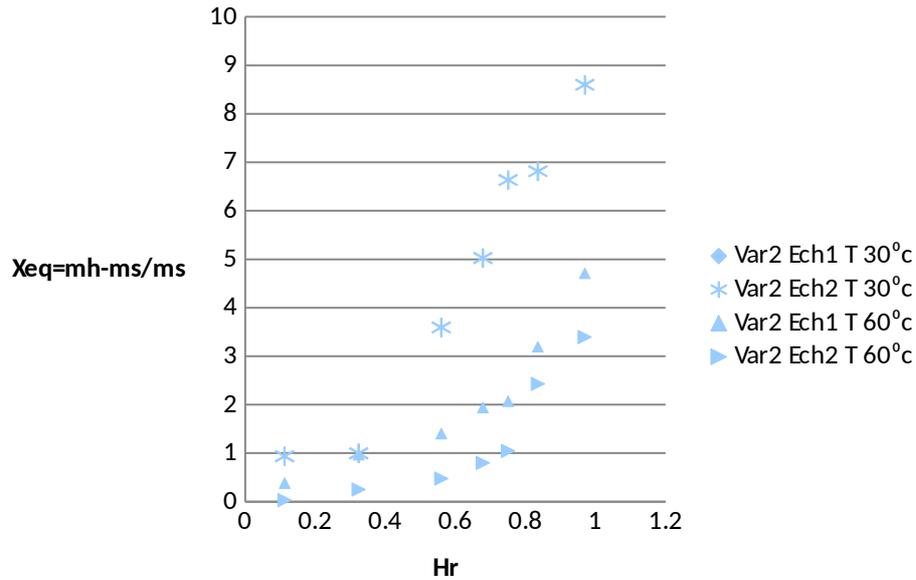


Figure (3.2) : courbes de la teneur en eau de la variété 2.

Les figures (3.1) et (3.2), montrent la distribution des points expérimentaux de la variété 1 et 2 pour les deux températures de travail.

Ces figures illustrent la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative H_r de l'atmosphère entourant le produit.

Notons que lorsque l'équilibre hygroscopique est atteint, les échanges d'eau entre l'air et le produit s'équilibrent et l'activité de l'eau a_w devient identique à l'humidité relative H_r .

2.6 Modélisation

Pour déterminer le meilleur modèle qui peut ajuster mieux l'isotherme de désorption on a utilisé le logiciel qui est largement utilisé dans ce domaine : CURVE EXPERT.

Le choix d'un modèle dépend des critères suivants :

- 1 Les paramètres statiques (critères d'analyse): le coefficient de corrélation r et le coefficient d'erreur standard s .
- 2 L'allure de la courbe de tendance: on n'admet que la courbe similaire à la courbe idéale.

La modélisation des résultats expérimentaux est présentée numériquement (valeurs des paramètres, critères statistiques et coefficients pour chaque modèle) évalués pour les deux échantillons de chaque variétés d'abricot (Rosé et Louzi) aux deux températures (30 et 60°C).

Sur le Tableau (3.2), nous reportons les résultats de l'ajustement des modèles de sorptions aux résultats expérimentaux obtenus.

Tableau 3.2 : les Paramètres statistiques et les coefficients pour chaque modèle.

Model	T (°C)	Var1		Var2	
		Ech1	Ech2	Ech1	Ech2
Langmuir		r : 0.9900629	r : 0.9745615	r : 0.9896873	r : 0.9795717

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Brunauer Emett Teller (BET)	30	s : 0.0143155	s : 0.0196075	s : 0.0130602	s : 0.0182973
		a : -26.17996	a : -169.5351	a : -147.5079	a : -212.2868
		b : 29.474268	b : 172.96540	b : 150.87118	b : 215.52227
		c : 0.7567574	c : 0.9543311	c : 0.9482857	c : 0.9715640
	60	r : 0.9628371	r : 0.9901742	r : 0.9945496	r : 0.9954258
		s : 0.0300842	s : 0.0108490	s : 0.0116137	s : 0.0072439
		a : 3.1482422	a : -179.1035	a : -80.39833	a : -78.19331
		b : 0.4887774	b : 182.96186	b : 83.215532	b : 82.280682
	30	c : -0.816620	c : 0.9505357	c : 0.8654951	c : 0.8493320
		r : 1.1874483	r : 1.3964965	r : 0.9137396	r : 1.6463462
		s : 0.1413511	s : 0.1344037	s : 0.0331332	s : 0.1567631
		a : 0.0014974	a : 0.0016692	a : -161.1374	a : 0.0022441
60	b : -2.673030	b : -2.478891	b : -0.001525	b : -2.238254	
	r : 0.9030346	r : 2.1655119	r : 0.9843367	r : 0.9924233	
	s : 0.0427975	s : 0.1655168	s : 0.0175642	s : 0.0083324	
	a : 124.51189	a : -0.000900	a : 7.3765757	a : 7.4053727	
30	b : 0.0025722	b : .00000038	b : 0.0268482	b : 0.0210271	
	r : 0.9687644	r : 0.9946515	r : 0.9955913	r : 1.5125055	
	s : 0.0252444	s : 0.0090363	s : 0.0085519	s : 0.1649793	
	a : 0.0681634	a : 0.0674244	a : 0.0676485	a : 0.0858133	
Guggenheim Anderson de Boer (GAB)	60	b : 0.7932908	b : 0.7845529	b : 0.7888414	b : -0.055840
		c : 1.4967833	c : -4.962820	c : -4.198711	c : 86.916882
		r : 0.8323032	r : 0.9958230	r : 0.9847586	r : 0.9928520
		s : 0.0617451	s : 0.0070836	s : 0.0193732	s : 0.0090495
30	a : 0.1077920	a : 0.0576415	a : 0.0542224	a : 0.0433649	
	b : 0.6895956	b : 0.7990994	b : 0.8604648	b : 0.8403105	
	c : -1.205816	c : -1.067690	c : 1.1479054	c : 7.0653954	
	r : 0.9986508	r : 0.9952473	r : 0.9978492	r : 0.9990886	
Peleg	60	s : 0.0061040	s : 0.0098374	s : 0.0069011	s : 0.0044847
		a : 0.1838559	a : 0.1267340	a : 0.1691958	a : 0.1635052
		b : 0.2313088	b : 0.1813193	b : 0.1392493	b : 0.1697798
		c : 32.728543	c : 0.2728843	c : 4.7093311	c : 5.5415074
30	d : 0.8861816	d : 4.8494408	d : 0.3791476	d : 0.3490184	
	r : 0.9446689	r : 0.9992376	r : 0.9966523	r : 0.9989425	
	s : 0.0421909	s : 0.0034976	s : 0.0105154	s : 0.0040253	
	a : 0.1520624	a : 0.1277279	a : 0.0935980	a : 0.1436712	
60	b : 0.1520600	b : 0.1466057	b : 0.2510231	b : 0.1076431	
	c : 0.7102188	c : 0.4256003	c : 0.3907662	c : 5.4043880	
	d : 0.7256753	d : 5.3082014	d : 3.9854145	d : 0.5488938	

La régression non linéaire au sens des moindres carrées a été employée pour évaluer les paramètres des différents modèles théoriques, tableau (3.2) en utilisant le logiciel CURVE EXPERT. La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant les paramètres statistiques r et s .

2.6.1 Interprétation

Pour le modèle de Langmuir, les valeurs de s de tous les échantillons de deux variétés dans les deux températures sont de l'ordre de $1/100$, sauf pour l'échantillon 2 de la variété 2 à la température 60°C où la valeur de s est de l'ordre de $1/1000$. Les valeurs du coefficient de

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

corrélations r sont entre 0.9628371 et 0.9954258 Pour tous les échantillons des deux variétés aux deux températures.

Pour le modèle de **BET**, les valeurs de s sont de l'ordre de 1/10 aux échantillons 1 et 2 de la variété 1 pour la température de 30°C et à l'échantillon 2 de la variété 2 pour la même température, et à l'échantillon 2 de la variété 1 à la température de 60°C. Pour les autres échantillons les valeurs de s sont de l'ordre de 1/100, sauf pour l'échantillon 2 de la variété 2 à la température 60°C où la valeur de s est de l'ordre de 1/1000, Les valeurs du coefficient de corrélation r sont entre 0.9030346 et 2.1655119 Pour tous les échantillons des deux variétés aux deux températures.

Pour le modèle de **GAB**, les valeurs de s sont de l'ordre de 1/1000 à l'échantillon 2 de la variété 1 aux deux températures et à l'échantillon 1 de la variété 2 à la température 30°C et à l'échantillon 2 de la variété 2 pour la température 60°C et de l'ordre de 1/100 pour les autres échantillons, sauf pour l'échantillon 2 de la variété 2 à la température 30°C où la valeur de s est de l'ordre de 1/10, Les valeurs du coefficient de corrélation r sont entre 0.8323032 et 0.9958230 pour tous les échantillons des deux variétés aux deux températures.

Pour le modèle de **Peleg**, les valeurs de s sont de l'ordre de 1/1000 aux tout Les échantillons de deux variétés d'abricot aux deux températures sauf pour l'échantillon 1 de deux variétés à la température 60°C où la valeur de s est de l'ordre de 1/100, Les valeurs du coefficient de corrélation r sont entre 0.9446689 et 0.9992376 pour tous les échantillons des deux variétés aux deux températures.

2.6.2 Choix du modèle

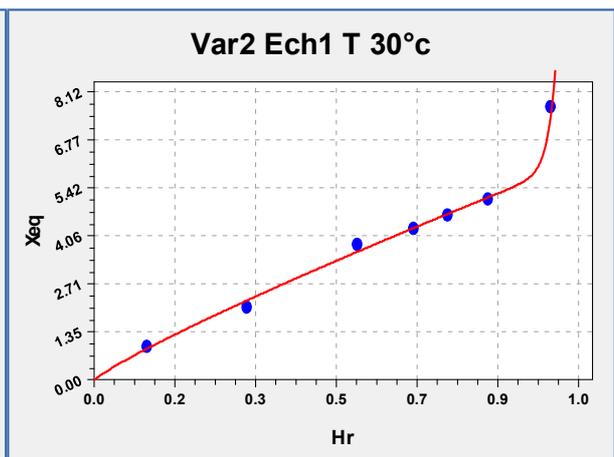
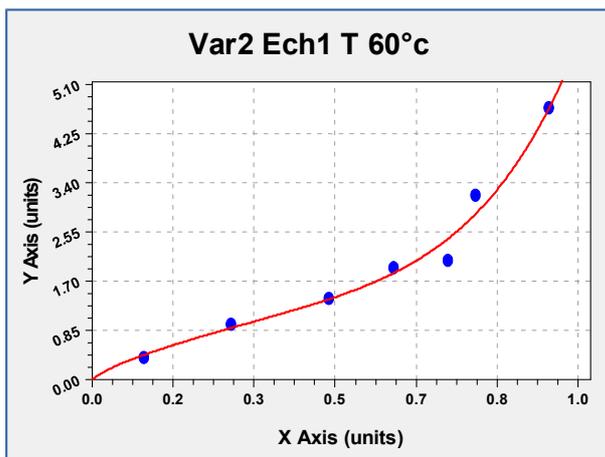
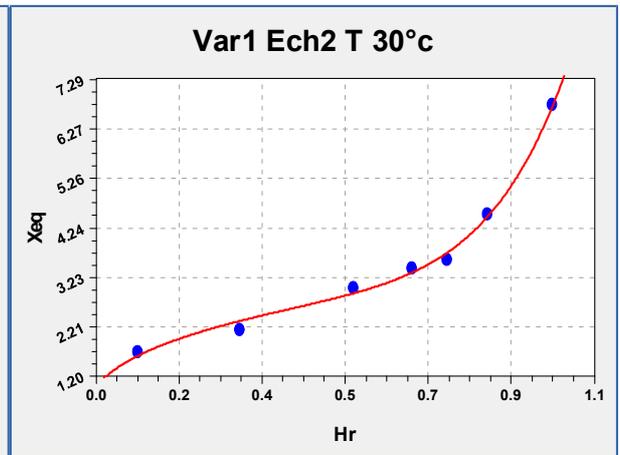
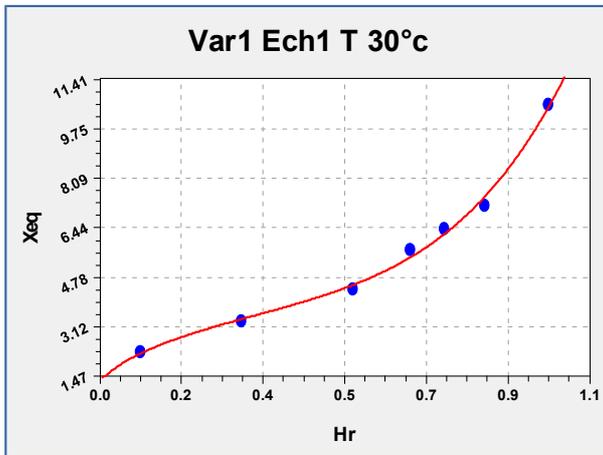
Le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de l'isotherme de sorption d'abricots doit être similaire à la forme idéale de la courbe des isothermes, le meilleur modèle est celui ayant un coefficient de corrélation r maximum qui tend vers 1 et une erreur standard s minimum qui tend vers 0.

Il est clair que d'après le tableau (3.2) et les conditions précédentes que le meilleur modèle ayant une valeur de r maximale et une valeur de s minimale, correspond bel et bien, au modèle de **Peleg**.

Par conséquent ce modèle est bien approprié pour représenter les isothermes de sorption d'abricots de notre expérience.

Par application de l'équation de ce modèle pour ajuster les valeurs expérimentales à l'aide du logiciel CURVE EXPERT (version 5), on obtient les courbes ajustées dans la figure (3.3).

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions



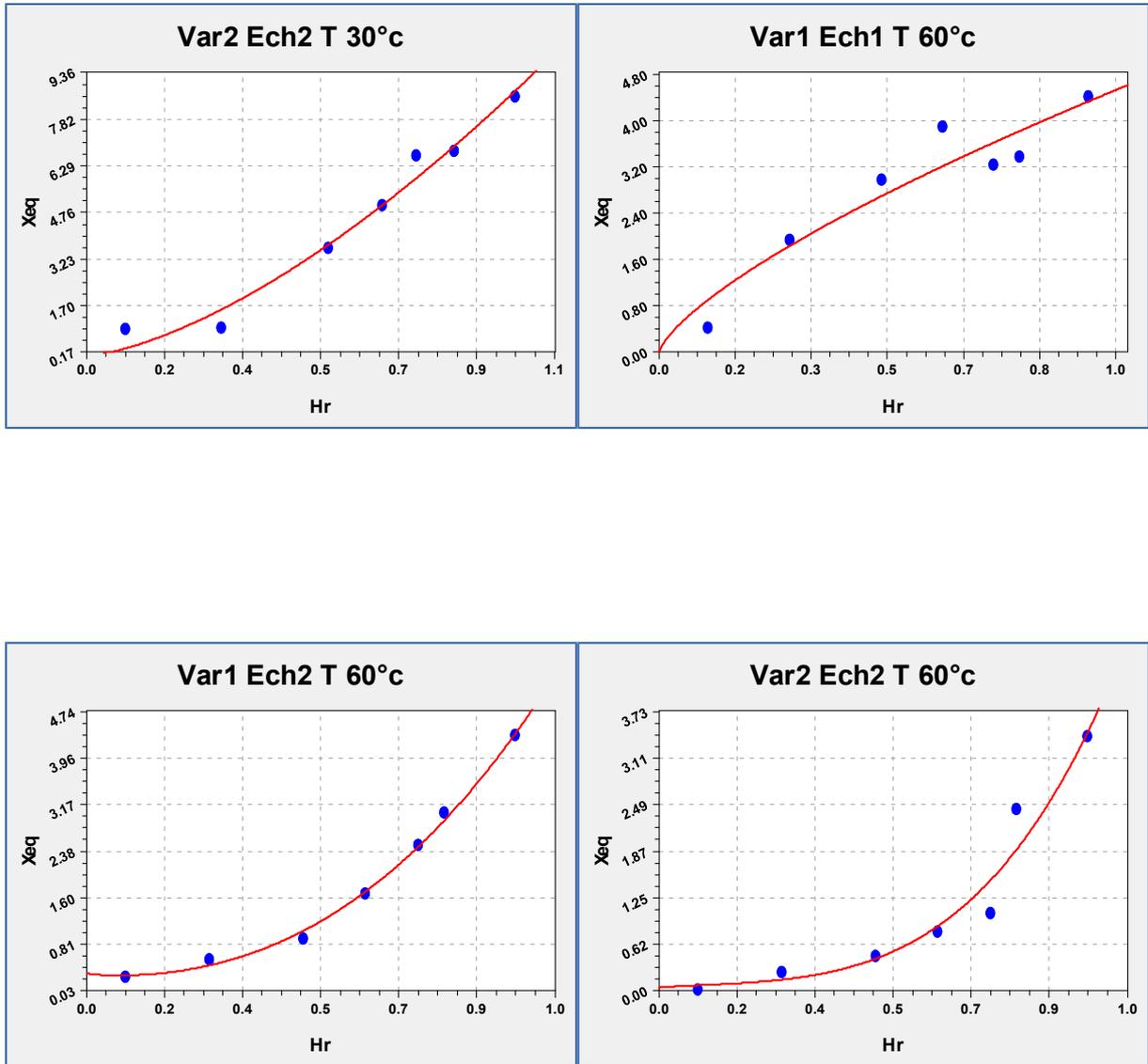


Figure (3.3) : Courbe de désorption de deux variétés d'abricot pour les deux températures obtenues par le modèle de Peleg.

Les courbes ci-dessus présentent les isothermes de désorption des abricots produites dans la région des Aurès.

En faisant varier la température, nous avons constaté que la teneur en eau diminue tandis que la température augmente à une humidité relative constante.

On peut dire que les meilleurs résultats qui présentent bien les isothermes de désorption sont :

Les Courbes de l'échantillon 1 et 2 de la variété 1 à la température 30°C.

La Courbe d'échantillon 1 de la variété 2 à la température 60°C.

Séchage solaire et séchoirs réalisés

En parallèle aux expériences faites à l'étranger sur les isothermes de désorption et le séchage à air chaud, sur le séchoir pilote du laboratoire cité auparavant, des travaux sont menés localement sur le séchage solaire à l'université de Batna.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Il s'est avéré alors intéressant de rajouter à cette thèse quelques données sur des travaux réalisés en collaboration de deux départements : Mécanique et Technologie alimentaire, sur ce type de séchage.

Séchoirs réalisés

Séchoirs solaires

Séchoir solaire indirect

Ce type de séchoir (figure) a été réalisé dans le cadre de l'encadrement des étudiants de fin de cycle. Il a été testé pour plusieurs produits agroalimentaires tel que : l'ail, les nèfles et les abricots. Les résultats étaient très intéressants pour l'ail et les nèfles. Pour les abricots on n'a pas pu obtenir grande chose à cause de l'absence du fruit durant la période d'essais sur ce séchoir.



Figure(). Séchoir solaire indirect.

Les tests effectués sur ce séchoir, ont contribué à la finalisation d'une étude qui a fait objet d'un article sur les nèfles [].

Séchoir solaire direct

Pour ce séchoir serre (figure), on s'est inspiré pour sa réalisation de l'étude faite à Ghardaia [] avec l'apport de plusieurs modifications. Ce séchoir a donné de très bons résultats durant la période d'essais en atteignant des températures très élevées (au voisinage de 75°C) et des temps de séchage très courts relativement à la nature et la découpe du produit utilisé (3-4

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

heures pour sécher des oreillons d'abricots et nettement moins pour les haricots verts en couche mince).

Le séchage solaire des abricots était entamé avec succès sur ce séchoir mais par manque de temps, les tests de séchage n'ont été faits que pour des abricots en moities (figure).

L'étude, la conception et les tests effectués sur ce type de séchoir ont aussi contribué à la finalisation de mémoires de fin d'étude pour les étudiants en Master.



Figure(). Séchoir solaire direct.

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions



Figure(). Séchoir solaire des abricots.

Séchoir à air chaud

L'idée de réaliser un séchoir a air chaud avec chauffage électrique a toujours constitué un défi à relever vu le peu de moyens dont on est doté. Mais malgré cela on a pu surmonter tout handicap, pour réaliser enfin un prototype (figure) de ce séchoir, en utilisant les moyens disponibles sur le marché local pour un prix de revient pas cher du tout (moins de 150 000DA).



Figure(). Séchoir à air chaud (chauffage électrique).

Partie Expérimentale
Chapitre 2 : Résultats et discussions

Ce séchoir est en cours d'expérimentations pour déterminer son efficacité et qui semble très satisfaisante jusqu'à ce moment là.

Séchage solaire des abricots sous forme d'oreillons

Des tests de séchage solaire sur le séchoir serre (figure) ont été effectués pour trois échantillons d'abricots en moities comme suit:

Un premier échantillon séché sans aucun prétraitement

Le deuxième échantillon a subi un blanchiment à l'eau chaude pendant 4 minutes

Un prétraitement au soufre par fumigation est appliqué au troisième échantillon d'abricot dans un soufreur réalisé artisanalement (figure)



Figure(). Soufreur artisanal.

Quelques résultats sont présentés dans les tableaux ()

*Conclusion
Générale*

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons essayé de contribuer à la résolution d'un problème majeur qui heurte la production des abricots considéré comme une production de base de l'agriculture de toute une région (les Aurès). Il s'agit de l'une des méthodes de préservation les plus vieilles : le séchage.

Ici, on a appliqué la technique de séchage par convection forcée et on a obtenu les courbes caractérisant les cinétiques de séchage de trois variétés différentes choisies des abricots de cette région en soumettant l'air asséchant à quatre différentes températures : 30, 40, 50 et 60°C.

Nous avons procédé à une simulation empirique de ces cinétiques de séchage des abricots sous différentes conditions constantes (vitesse de l'air est 1m/s, humidité de l'air ambiante et pour des températures constantes) pour permettre l'obtention d'une cinétique qui sera prise comme modèle du séchage à air chaud de ce fruit.

Le lissage des courbes expérimentales de séchage utilisant une analyse de régression non-linéaire moyennant le logiciel de statistiques : Statistica Stasoft (version 6) nous a conduit, avec satisfaction, au modèle le plus adéquat : le modèle à deux termes (**Two-term**), lequel a été ensuite généralisé sur une plage de températures de séchage entre 30 et 60°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 trois variétés d'abricots assurant la bonne qualité du produit final.

D'autre part, les cinétiques simulées de séchage à air chaud du fruit d'abricot semblent logiques et satisfaisantes du point de vue durée de séchage jusqu'à l'humidité commerciale requise.

Afin de permettre la validation expérimentale de la procédure suivie dans notre étude, il est souhaitable, dans des études en cours et à venir, de disposer des courbes expérimentales sur séchoirs à air chaud (entraînement forcée) ou solaires du même fruit, en continu en en discontinu avec des équations modèles validées pour différents produits alimentaires.

Ce dernier travail a été entamé avec la réalisation de trois séchoirs (deux solaires directs et un à air chaud) pour expérimentation dans le cadre du travail de recherche scientifique:

- Dans un projet national de recherche intitulé : Influence des méthodes de préservation sur la qualité de quelques aliments fonctionnels, travail dirigé par le Professeur D. Fahloul avec la collaboration de plusieurs chercheurs de plusieurs départements (Mécanique : moi même, Agronomie et Technologie Alimentaire de l'Université de Batna).

- Dans le cadre du Laboratoire d'Etudes des Systèmes Energétiques Industriels (LESEI).

Ces séchoirs sont en phase de tests et d'expérimentations mais qui semblent donner des résultats déjà très promoteurs pour l'abricot au moins avec le travail de recherche mené avec la collaboration des étudiants encadrés en Master.

La détermination des isothermes de désorption constitue une étape incontournable dans tout procédé de séchage. Leur connaissance constitue une étape indispensable pour mieux comprendre et appréhender les problèmes liés à l'expérimentation et à la modélisation des processus de séchage.

Les isothermes de désorption pour deux températures 30 et 60°C, sont obtenues par une méthode statique où le contrôle de l'humidité relative est assuré par contact avec des solutions saturées de sel. En ce qui concerne la modélisation de ces isothermes, le modèle de **Peleg** a été employé avec succès, à partir des données expérimentales des isothermes d'équilibre, on a identifié les paramètres du modèle de **Peleg**. Les isothermes obtenues pour les deux variétés d'abricots étudiés sont similaires. Pour cela, on peut conclure que, par la connaissance de la teneur en eau d'équilibre de nos deux variétés, nous pouvons maintenant envisager de déterminer la cinétique de leurs séchages dans un séchoir convectif.

Enfin, les isothermes de sorption donnent des informations précieuses pour l'industrie agro-alimentaire. En effet, pour connaître les paramètres de stockage des variétés d'abricots étudiées à une certaine température de conservation, il suffit de se référer aux courbes de sorption qui fournissent les valeurs de la teneur en eau d'équilibre du produit et l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure et ce, pour une température de travail donnée.

Dans ce contexte, un laboratoire spécialement destiné à faire des essais de séchage solaire et à air chaud et pour réaliser les isothermes de sorption des aliments et des plantes, est en phase finale de réalisation avec la participation pesante du Département de Technologie Alimentaire représenté par le Professeur D. Fahloul et par moi-même du Département de Mécanique, tous deux de l'Université Hadj Lakhdar de Batna.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **Arevalo P. A. Murr F. X., 2007.** Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, **80** : 152–156.
- [2]. **Baert J-P., 1999.** Agroalimentaire. *Techniques de l'ingénieur*. F100: Vol. Génie des Procédés.
- [3]. **Bahlouli F., Tiaiba A., Slamani A., (2008).** Etude des différentes méthodes de séchage d'abricot, point sur les méthodes de séchage traditionnelles dans la région du Hodna, wilaya de M'Sila. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 61 - 66.*
- [4]. **Bauman, I., Z Bobi' C, Z -Dakovi' C And M Ukrainczyk(2005).** Time And Speed Of Fruit Drying On Batch Fluid-Beds, *Sadhana Vol.30, Part 5, October 2005, Pp. 687-698.*
- [5]. **Benmadi F., 2009.** Etude du transfert de matière et de chaleur lors du séchage sous vide de la pomme de terre (variété Spunta). Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, 61p.
- [6]. **Bimbenet J.J., 1998.** Bases conceptuelles du génie des procédés agroalimentaires. *Techniques de l'ingénieur*, F1000, 19 p.
- [7]. **Bonazzi C. et Bimbenet J.J., 2008.** Séchage des produits alimentaires-matériels et applications. *Techniques de l'Ingénieur*, Paris, France, F3002.
- [8]. **Boubekri A., 2010.** Optimisation des traitements thermiques de la datte algérienne «deglet-nour». *Thèse de doctorat d'état*, Université de Batna 155p.
- [9]. **Boughali S., Benmoussa H., Bouhekima B., Mennouche D., Bechki D. et Bouguettaia H., 2009.** Crop drying by indirect active hybrid solar – electrical dryer in the eastern algerian septentrional sahara. *Solar Energy*, **83** : 2223–2232.
- [10]. **Boughali S., Bouhekima B., Nadir N., Mennouche D., Bouguettaia H. et Bechki D., 2008.** Expérience du séchage solaire dans le Sahara septentrional Est algérienne. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08, Alger* : 105-110.
- [11]. **Bourgeois C., 2003.** Les vitamines dans les industries agroalimentaires. Ed : *Tec et Doc., Lavoisier, Paris*, 708 p.
- [12]. **Brennan J. G., 2006.** Food processing handbook. Ed by: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co- KGaA, Weinheim, Germany, 602p.
- [13]. **Bretaudeau J., 1981.** Atlas d'arboriculture fruitière. Volume8. Deuxième édition. Edition *J-B. Balie, Paris*, 246p.
- [14]. **C.Sarsilmaz, C.Yildiz, D. Pehlivan. (2000).** Drying Of Apricots In A Rotary Column Cylindrical Dryer (RCCD) Supported With Solar Energy. *Renewble Energy*, Vol. 21(2000) 117-127.

- [15]. **Cakmak G. et Yildiz C., 2010.** The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and bioproducts processing*.
- [16]. **Capelle M., 1996.** Activité enzymatique et conservation du produit déshydraté. *GERVAIS-ENSBANA* : 136-147.
- [17]. **Cavusoglu C., 2008.** Investigations into the high-temperature air drying of tomato pieces. Thèse D'Ingénieur. *Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Allemagne*, 140p.
- [18]. **Celmaa A.R., Cuadrosb F. et López-Rodriguezc F., 2009.** Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food and bioproducts processing*, **87**: 282–291.
- [19]. **Cengel Y.A., 2002.** Heat transfer: A practical approach. Second édition. Ed: *McGraw-Hill Science/Engineering/Math*, 896p.
- [20]. **Cerņiņev S., 2010.** Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato. *Journal of Food Engineering*, **96** : 114–118.
- [21]. **Chakroune., 2008.** Etude comparative de deux techniques de séchage (convection et micro-onde) par application des plans d'expérience. Cas du fruit de datte, Thèse magistère, Université de Boumerdes, 65p.
- [22]. **Charreau A. et Cavallé R., 2003.** Séchage- Théorie et Calculs. *Techniques de l'ingénieur*, J2480 : Vol. Génie des Procédés.
- [23]. **Cheftel j.c. et Cheftel H., 1984.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Tome 1. *Tec et doc., Lavoisiers*, 381p.
- [24]. **Cheftel J-C., Cheftel H. et Besancon P., 1979.** Introduction à la biochimie et la technologie des aliments. Volume 2, *Tec et Doc., Paris*, 292p.
- [25]. **[Claire Doré, F. Varoquaux](#)** Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées Editions Quae, 2006 - 812 pages
- [26]. **Condori M., Echazu R. et Saravia L., 2001.** Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renewable Energy*, **22** : 447–460.
- [27]. **Contreras C., Martin-Esparza M.E., Chiralt A. et Martinez-Navarrete N., 2008.** Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*, **88**: 55–64.
- [28]. **Davoodia M.G., Vijayanandb P., Kulkarnib S.G. et Ramanab K.V.R., 2007.** Effect of different pre-treatments and dehydration methods on quality characteristics and storage stability of tomato powder. *LWT.*, **40** : 1832–1840.
- [29]. **Dias M.C., Vieiralves N.F.L., Gomes M.I.F.V., Salvadori D.M.F., Rodrigues M.A.M. et Doymaz I., 2009.** Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Food and bioproducts processing*, *In press*.
- [30]. **Doymaz I., 2007.** Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, **78**: 1291-1297.
- [31]. **Doymaz I., 2008.** Influence of blanching and slice thickness on drying characteristics of leek slices. *Chemical Engineering and Processing*, **47**: 41–47.

- [32]. **Doymaz. I.(2004).**Effect Of Pre-Treatments Using Potassium Metabisulphide And Alkaline Ethyl Oleate On The Drying Kinetics Of Apricots .*Bio-Systems Engineering* (2004) 89 (3), 281-287.
- [33]. **Fellows P., 2000.** Food processing technology principles and practice. *CRC press, New York*, 571p.
- [34]. **Ferradji A., Malek A., Bedoud M., Baziz R. et Aoua1 S.A., 2001.** Séchoir Solaire à Convection Forcée pour le Séchage des Fruits en Algérie. *Rev. Energ. Ren., Vol. 4* : 49 – 59.
- [35]. **Ferreira F.A., Hasegawa N., Edvan C., Rafael P., Purgatto E. et Adriana Z., 2009.** Cultivar influence on carotenoid composition of loquats from Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis*, **22**: 196–203.
- [36]. **Figiel A., 2010.** Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, **98** : 461–470.
- [37]. **Fikret Karatasa, Fethi Kamışlıb.(2005)** . Variations Of Vitamins (A, C And E) And MDA In Apricots Dried In IR And Microwave, *Journal Of Food Engineering*, Xxx (2005)Xxx-Xxx.
- [38]. **Gautier M., 1987.** La Culture fruitière. Volume1. Ed : *Tec et Doc., Paris*, 492p.
- [39]. **Gonzalez-Fesler M., Salvatori D., Gomez P. et Alzamora S.M., 2008.** Convective air drying of apples as affected by blanching and calcium impregnation. *Journal of Food Engineering*, **87** : 323–332.
- [40]. **Gornicki K. et Kaleta A., 2007.** Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition *Journal of Food Engineering*, **82** : 160–170.
- [41]. **Haddad M., 2007.** Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation. Thèse doctorat, Université de la Rochelle, France, 221p.
- [42]. **Hanachi M., 2009.** Étude de l'influence de la déshydratation osmotique sur les cinétiques de séchage de l'ail (*allium sativum* l.). Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, 53p.
- [43]. **Hassini L., Azzouz S., Peczalski R. et Belghith A., 2007.** Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, **79** : 47–56.
- [44]. **Hilaire j.u., 2008.** Etude comparative de deux méthodes de séchage (solaire, étuve) dans la transformation de deux variétés de mangues. Thèse d'ingénieur, **Université d'Etat d'Haiti**, 48p.
- [45]. **İnci Türk Toğrul, DursunPehlivan. (2002).** Mathematical Modelling Of Solar Drying Of Apricots In Thin Layers. *Journal Of Food Engineering*, 55(2002) 209-216.

- [46]. **İnci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan (2004)**. Modelling Of Thin Layer Drying Kinetics Of Some Fruits Under Open-Air Sun Drying Process. *Journal Of Food Engineering*, 65 (2004) 413-425.
- [47]. **Jannot Y, 2008**. Cours transferts thermiques 2^{ème} année école 2 des Mines. Nancy.
- [48]. **Jayaraman K.S. et Gupta D.K., 2006**. Drying of fruits and vegetables. In : Arun S. Mujumdar. (Eds). Hand book of industrial drying. Ed by Taylor & Francis Group, LLC. Singapore : pp 606-631.
- [49]. **Jena S. et Das H., 2007**. Modelling for vacuum drying characteristics of coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79: 92–99.
- [50]. **Kaymak-Ertekin Figen, Gedik Atil. (2004)** .Sorption Isotherms And Isothermic Heat Of Sorption For Grapes, Apricots, Apples And Potatoes. *Lebensm-Wiss.U.-Technol.* 37 (2004) 429-438.
- [51]. **Krokida M.K. et Philippopoulos C., 2006**. Volatility of apples during air and freeze drying. *Journal of Food Engineering*, 73 : 135–141.
- [52]. **Lahbari M. et Benmoussa H., (2014)**. Impact of the cut form on the drying behavior without pretreatment of carrots in a convective dryer. *International Revue of Mechanical Engineering* Vol.8, N.1: 162-166.
- [53]. **Lampe JW**. Health effects of vegetables and fruit: assessing mechanisms of action in human experimental studies. *Am J Clin Nutr.* 1999;70(3).
- [54]. **Laurienzo P., DiStasio M., Malinconico M. et Volpe M. G., 2010**. Dehydration of apples by innovative bio-films drying. *Journal of Food Engineering*, 97: 491–496.
- [55]. **Lewicki P.P. 1998**. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36: 81 – 87 .
- [56]. **Lichou J., Audubert A., Prax M. et Minodier R ; 1993 ; « L'abricotier » ; CTIFL ; PP.351 – 379**
- [57]. **İnci Türk Toğrul et al. (2003)**. Modelling Of Drying Kinetics Of Single Apricot. *Journal Of Food Engineering*, 58 (2003) 23-32.
- [58]. **Lorient D., 1998**. Modifications biochimiques des constituants alimentaires. *Technique de l'ingénieur*, F3400 : Vol. Génie des Procédés.
- [59]. **Mafard P., 1996**. Génie industriel alimentaire. deuxième édition, *Tec et Doc., Tome 1, Paris*, 335p.
- [60]. **Maldonado S., Arnau E. et Bertuzzi M.A., 2010**. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering*, 96 : 333–341.

- [61]. **Marco Riva, Stefano Campolongo, Alexa Avitabile Leva, Andrea Maestrelli, Danila Torreggiani. (2005).** Structure–Property Relationships In Osmo-Air-Dehydrated Apricot Cubes. *Food Research International*, 38 (2005)533-542.
- [62]. **Mohammad Rahimzade Khoyi, , Javad Hesari (2006).** Osmotic Dehydration Kinetics Of Apricot Using Sucrose Solution. *Journal Of Food Engineering*, Xxx (2006)Xxx-Xxx.
- [63]. **Mujumdar S., 2006.** Hand book of industrial drying. Ed by *Taylor & Francis Group, LLC. Singapore* : 631p.
- [64]. **Nantawan T. et Weibiao Z., 2009.** Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia Opiz ex Fresen*). *Journal of Food Engineering*, **91**: 482–489.
- [65]. **Nawirska A., Figiel A., Kucharska A.Z., , towska A.S. et Biesiada A., 2009.** Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. *Journal of Food Engineering*, **94** : 14–20.
- [66]. **Noomhorm A, 2007.** Overview of Dehydration Method on Quality of Fruit and Vegetable. *SWU. Sci. J.*, **23** : 2550-2562.
- [67]. **Oğuz Bozkır (2005).** Thin-Layer Drying And Mathematical Modelling For Washed Dry Apricots. *Journal Of Food Engineering*, Xxx (2005)Xxx-Xxx.
- [68]. **Ounissi E. 2009.** Influence de la température, la pression et le blanchiment sur les cinétiques de séchage de l'ail (*Allium Sativum L.*). Thèse d'ingénieur. Université de Batna. 62p.
- [69]. **Perumal R., 2007.** Comparative performance of solar cabinet, vacuum assisted solar and open sun drying. A thesis of Master of Science. Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal, Canada. 89p.
- [70]. **Quevedo R., Jaramillo M ., Díaz O., Pedreschi F. et Aguilera J. M 2009.** Quantification of enzymatic browning in apple slices applying the fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering*, **95** : 285–290.
- [71]. **Raj D., Subanna V.C., Ahlawat O.P., Perdeep G. et Huddar V., 2006.** Effect of pre-treatment on the quality characteristics of dehydrated onion rings during storage. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, **4** issue 1: 30-33.
- [72]. **Rizza R.A., Go V.L.W., McMahon M.M. et Harrison G.G., 2002.** Encyclopedia of foods a guide to healthy nutrition. Ed *Academic Press An Imprint of Elsevier San Diego, California*, 516p.
- [73]. **Roustels P., 2002.** Découpe des produits alimentaires. *Technique de l'ingénieur*. F1230, Vol. Génie des Procédés.

- [74]. **Sacilik K. et Konuralp A., 2006**, The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, **73**: 281–289.
- [75]. **Sacilik K. et Unal G., 2005**. Dehydration Characteristics of Kastamonu Garlic Slices. *Biosystems Engineering*, **92** (2) : 207–215.
- [76]. **Sacilik K., 2007**. The thin-layer modelling of tomato drying process. *Agric. conspec. Sci.*, **72**: 343-349.
- [77]. **Sacilik K., Keskin R. et Elicin A.K., 2006**. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, **73**: 231-238.
- [78]. **Sdayria A., 2008**. Performance d'un séchoir solaire en boucle fermée contrôlée. Mémoire de Mastère MAFTT (FST). Université de tunis E-Manar. Tunisie. 65p.
- [79]. **Sirousazar M., Mohammadi-doust A. et Achachlouei B.F., 2009**. Mathematical investigation of the effects of slicing on the osmotic dehydration of sphere and cylinder shaped fruits. *Czech J. Food Sci.*, **27** (2): 95–101.
- [80]. **Srikiatden J. et Roberts J.S., 2008**. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*, **84**: 516–525.
- [81]. **St. George S.D., Cenkowski S. et Muir W.E., 2004**. A review of drying technologies for the preservation of nutritional compounds in waxy skinned fruit, ASAE/CSAE Conference, Canada. Paper No. MB04-104.
- [82]. **Sunjka P. S., 2003**. Microwave/vacuum and osmotic drying of cranberries. Unpublished Ph. D. Thesis., McGill University. Montreal. 117p.
- [83]. **Swasdisevi T., Sakamon D., Poomjai S. et Somchart S., 2009**. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, **92** : 100–106.
- [84]. **Touati B., 2008**. Étude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). Thèse doctorat de l'I.N.S.A. Université de Tlemcen. 83p.
- [85]. **Venkatachalapathy K., 1998**. Combined osmotic and microwave drying of strawberries and blueberries. Unpublished Ph. D. Thesis, McGill University. Montreal, 194p.
- [86]. **Vierling E., 2003**. Aliments et Boissons : filières et produits. ED CRDP d'Aquitaine. Bordeaux, 270 p.
- [87]. **Wilhelm L.R., Suter D.A. et Brusewitz. G.H., 2005**. Food & Process Engineering Technology. *ASAE publication; American Society of Agricultural Engineers*, 303p.

- [88]. **Wua L., Orikasa t., Ogawa Y. et Tagawa A., 2007.** Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering*, **83** : 422–429.
- [89]. **Zedam F., 2006.** Influence de la température, la pression et la découpe sur les cinétiques de séchage de la pomme de terre (variété *spunta*). Mémoire d'ingénieur. Université de Batna, 92p.
- [90]. **Zeki B., 2009.** Food process engineering and technology. Ed : *Elsevier Inc. Paris*. 622p.
- [91]. **Zielinska M. et Markowski M., 2010.** Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing*, **49**: 212–218.

Références Web

- [i.] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Abricot>
[0]
- [ii.] **Biologie et Multimédia - Université Pierre et Marie Curie - UFR des Sciences de la Vie 2009.**
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/>
- [iii.] **Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.**
<https://www.anses.fr/fr/content/composition-nutritionnelle-des-aliments>
- [iv.] **Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW**
www.acw.admin.ch
- [v.] **Ann Charlotte de Déshydrateur.org 2009**
<http://deshydrateur.org/tout-savoir-sur-la-conservation-des-aliments/>
- [vi.] <http://www.realagro.com/>

Abstract

The aim of this work is to determine the drying kinetics of three varieties of apricots 'Louzi, Rosé and Khed-Erroumia' products in the Aurès region of Algeria.

The drying tests were performed on the automatically controlled laboratory pilot dryer, installed in ENSIA, France.

The convective hot air drying was carried out on a sample of apricot purchased from the local market of Batna stored in the cold room ENSIA for a month at 4 ° C.

The drying kinetics of these varieties was obtained for parameters of temperature and air speed as following: 30, 40, 50, 60°C and 1m/s.

Desorption isotherms of two varieties (Louzi and Rosé) are also performed for two temperatures: 30 and 60°C. Finally, statistical software: Statistica and CurveExpert for smoothing experimental curves were used to determine all required parameters to get the best mathematical model in nonlinear regression treatment.

This work allowed us to get hold of a remarkable experience namely: handling equipment in upstream and downstream stages of food drying manipulations, determination of sorption isotherms by the gravimetric method and use of various instruments for measuring various parameters during drying operations and also how to prepare samples and experiments repeatability in this area.

Concerning the solar drying, results of some tests conducted on solar dryers made at Batna University, are presented and which look very promising for this area in the future.

ملخص:

الهدف من هذا العمل الميداني هو تحديد حركية تجفيف ثلاثة أصناف من المشمش منتجة في منطقة الأوراس (الجزائر) و هي: اللوزي، الروزي و خد الرومية .

لقد أجرينا اختبارات التجفيف على مجفف نموذجي آلي التحكم، يوجد بمختبر التجفيف التابع ل: ENSIA بماسي في فرنسا حيث تم تنفيذ التجفيف بالحمل الحراري بواسطة الهواء الساخن على عينة من المشمش تم جلبها من السوق المحلية بباتنة و تم تخزينها في غرفة التبريد التابعة للمخبر السابق لمدة شهر على درجة حرارة قدرها 4 درجات مئوية.

تم الحصول على حركية تجفيف كل هذه الأصناف لدرجات حرارة هواء التجفيف التالية: 30، 40، 50 و 60 درجة مئوية مع سرعة هواء قدرها: [1 m/s].

كما تم الحصول على المنحنيات المتساوية الحرارة (الأيسوثرم) لنوعين من المشمش (اللوزي و الروزي) بدلالة درجتي الحرارة التاليتين: 30 و 60 درجة مئوية. كما تم استخدام البرمجيات الإحصائية: *Statistica* و *CurveExpert* لتمهيد المنحنيات التجريبية لتحديد جميع المعلمات اللازمة لإيجاد النماذج الرياضية باستعمال الانحدار غير الخطي.

في هذا العمل الميداني اكتسبنا خبرة كافية فيما يخص كيفية استعمال المعدات و التعامل الصحيح خلال تجفيف الغلال قبل وبعد العملية، وإيجاد منحنيات الأيسوثرم تجريبيا من خلال طريقة الجاذبية واستخدام وسائل القياس المختلفة لقياس عدة معطيات خلال مختلف مراحل عملية التجفيف وكيفية تحضير العينات والتكرار خلال التجارب في هذا المجال.

أما فيما يخص التجفيف الشمسي، فقد قدمت في هذه الرسالة بعض نتائج الاختبارات التي أقيمت على مجففات شمسية أنجزت بجامعة باتنة و التي تبدو جد واعدة في هذا الميدان بالنسبة للمستقبل.

Résumé

Le but de ce travail est de déterminer les cinétiques de séchage de trois variétés d'abricots : 'Louzi, Rosé et Khed-Erroumia' produits dans la région des Aurès en Algérie.

Les essais de séchage ont été effectués sur le séchoir-pilote automatiquement contrôlé, installé au laboratoire de séchage à l'ENSI A en France.

Le séchage convectif à air chaud a été réalisé sur un échantillon d'abricot acheté du marché local de Batna et stocké dans la chambre froide du laboratoire précédent pendant un mois à 4°C.

Les cinétiques de séchage des trois variétés ont été obtenues pour les températures et la vitesse d'air suivantes : 30, 40, 50, 60°C et 1m/s.

Les isothermes de désorption de deux variétés (Louzi et le Rosé) sont également réalisées pour deux températures : 30 et 60°C.

Enfin l'utilisation des logiciels statistiques : *Statistica* et *CurveExpert* pour le lissage des courbes expérimentales a permis de déterminer tous les paramètres de la régression non linéaire nécessaires à la recherche des modèles mathématiques adéquats.

Dans ce travail on a pu acquérir une expérience pratique très remarquable à savoir la manipulation du matériel utilisé lors des expériences amont et aval du séchage d'un produit alimentaire, la détermination des isothermes de sorption par la méthode gravimétrique et l'utilisation des différents instruments de mesure de différents paramètres relevés lors des manipulations ainsi que la façon de préparer les échantillons et la répétitivité des expériences dans ce domaine.

Concernant le séchage solaire, des résultats de certains tests sur des séchoirs solaires réalisés à l'Université de Batna sont présentés et qui semblent très prometteurs pour ce domaine dans l'avenir.