REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie chimique

Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage par micro-ondes des agrumes en couche mince

---

Présenté par :

Mr. BECHERAIR Mohamed

Mlle. TRIKI Hamida

Proposé et Dirigé par :

Pr. HANINI Salah

Mr. HENTABLI Mohamed

Mme. BENIMAM Hania

Promotion 2019

Remerciements

*Le plus grand merci revient à **ALLAH** qui nous a guidé dans le bon sens durant notre vie qui nous aide à réaliser ce travail.*

*Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur **HANINI Salah**, Professeur à l'Université de Yahia Farés de Médéa, qu'il trouve ainsi l'expression de notre profonde reconnaissance pour ses compétences, ses encouragements et ses précieux conseils durant le déroulement de ce travail qui ont éclairé mon chemin vers la réussite de la concrétisation de mon mémoire.*

*Nous tenons vivement à exprimer ma profondeur gratitude à mon directeur de mémoire monsieur **HENTABLI Mohamed**, ingénieur de laboratoire au SAIDAL, pour son assistance, ses encouragements et ses précieux conseils continue à mes travaux dès le début jusqu' à la fin.*

*Nous tenons vivement à exprimer ma profondeur gratitude à ma directrice de mémoire madame **BENIMAM Hania**, (MAA) à l'UYFM, pour son assistance, ses encouragements et ses précieux conseils continue à mes travaux dès le début jusqu' à la fin.*

*Nos remerciements vont aussi au Dr. **LAIDI Mammar (MCA)** et au Dr. **BOUMAHDI Mouloud (MCB)** à l'UYFM et également à M. **YAMIN MESELLEM (MAA)** à la même université, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.*

Mes remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignants du département de génie des procédés et environnement.

*Nos remerciements vont également à Mr. **CHIBA** Directeur de hall technologique à l'UYFM et à tout le personnel veillant sur le bon déroulement des travaux de recherche effectués au sein de l'institution.*

En fin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Dédicace

Je dédie cet événement marquant de ma vie

A *toute ma famille en commençant par mes chers parents, plus particulièrement*

A *ma mère qui a partagé avec moi ma peine et ma fatigue*

A *mon père qui n'a jamais cessé de chercher le meilleur pour chacun de ses enfants*

A *ma femme pour sa patience son soutien et ses encouragements tout au long de mon parcours professionnelle et personale.*

Je ne manquerais pas de dédier ce travail

A *tous mes collègues*

A *mes amis sans exception*

A mes enseignants de tous les cycles.

Au *membre du laboratoire de chimie II de Hall technologique de l'UYF a Médéa*

A *tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

Mohamed

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire

A ALLAH tout puissant qui m'assistée en me donnant la force et la santé pour réaliser le présent travail.

A mes très chers parents

A mes frères : Messaoud, Faysal, Bilal, el Marion . A mes sœurs : Ratiba, Ikram, Nabila, et Fayza.

A mon fiancé : Messaoud. T

Á toutes mes amies surtout : Imane, Rania, Houria Saida, Ahlam, Dalila, Hamida, Khawla, Linda, Fatma, et Semia.

A Toutes La promotion de génie chimique.

A tous la famille Triki.

الملخص : دراسة ونمذجة حركيات تجفيف الميكروويف لفواكه الحمضيات ذات الطبقة الرقيقة.

الهدف من هذه الدراسة ودراسة تجريبية و نمذجة حركية تجفيف الحمضيات (البرتقال والليمون). يتم تنفيذ هذه الحركية بواسطة الميكروويف والفرن لدرجات حرارة مختلفة من الفرن (70 و 105 درجة مئوية) ومستويات مختلفة من طاقة الميكروويف (100 ، 200 ، 300 ، 400 ، 500 ، 600 و 900 W) .سيتم تنفيذ الجزء التجريبي والنمذجة على التوالي داخل بهو التكنولوجيا مخبر كيمياء 2 بجامعة المدية.

هذه الدراسة مقسمة على مساهمتين:

في البداية ، تمت دراسة تأثير بعض العوامل {ép. W} على وقت التجفيف. تعتمد نمذجة أوقات التجفيف على استخدام طريقة التصميم التجريبية (برنامج MODDE) التي سمحت بالحصول على نموذج تجريبي من الدرجة الثانية (الانحدار متعدد الخطوط MLR) من خلال إجراء عدد قليل فقط من التجارب.

في المساهمة ألثانية. تم ضبط البيانات التي تم الحصول عليها باستخدام 64 نموذجًا شبه تجريبي للتجفيف بطبقة رقيقة من محتوى الماء المخفض (MR) لشرائح البرتقال المدروسة ، و نموذج تجريبي مقترح في هذه الدراسة و اخر SVMRيجمع كل حركية التجفيف. تم اختيار النموذج المقترح كأنسب نموذج لو صف حركية تجفيف البرتقال. بدقة جيدة للغاية تبلغ RMSE = 0.0149 وR^2 = 0.9957

الكلمات المفتاحية: تجفيف الميكروويف ، النمذجة التجريبية ، نمذجة دعم ناقل الماكينة ، التصميم التجريبي ، ثمار الحمضيات.

Résume : Etude et modélisation de la cinétique de séchage par micro onde des agrumes en couche mince

L'objectif de cette étude et l'étude et la modélisation de la cinétique de séchage des agrumes (orange et citron). Cette cinétique est effectuée par microonde et étuve pour différentes températures de l'étuve (70 et105 °C) et pour les différentes puissances du micro-onde (100, 200, 300, 400, 500, 600 et 900W),. La partie expérimentale et modélisation seront réalisées respectivement au sein de halle de technologie laboratoire chimie deux ,d'université de Médéa.

Cette étude est scindée sur deux contributions :

Dans la première, on a étudié expérimentalement l'effet de quelques paramètres opératoires {ép., W} sur le temps de séchage. La modélisation de temps de séchage repose sur l'utilisation de la méthode de plan d'expériences (logiciel MODDE) qui permis d'obtenir un modèle empirique quadratique (Régression multilinéaire MLR) en n'effectuant qu'un nombre minimal d'expérimentations.

Dans la deuxième contribution : Les données obtenues ont été ajustées à l'aide de 64 modèles semi-empiriques de la littérature de séchage sur couche mince de la teneur en eau réduite (MR) de tranches d'orange étudiée, un modèle semi-empirique proposé dans cette étude et un SVMR de statique regroupant toutes les cinétiques étudiées. Le modèle proposé a été choisi comme le modèle le plus approprié à décrire la cinétique de séchage de l'orange. Avec une très bonne précision de RMSE=0.0149 et R^2=0.9957.

Mot clés : Séchage par micro onde, modélisation par plan d'expérience, modélisation empirique, modélisation par machine à vecteurs de support, les agrumes.

.

Abstract: Study and modeling of the microwave drying kinetics of citrus fruits in thin layers

The objective of this study and the study and modeling of drying kinetics of citrus (orange and lemon). This kinetics is performed by microwave and oven for different temperatures of the oven (70 and 105 ° C) and for different powers of the microwave (100, 200, 300, 400, 500, 600 and 900W). The experimental part and modeling will be carried out respectively within Médéa University Technology Hall.

This study is divided on two contributions:

In the first, the effect of some operating parameters {ep., W} on the drying time has been studied experimentally. The modeling of drying times is based on the use of the experimental design method (MODDE software) which allowed to obtain a quadratic empirical model (multilinear regression MLR) by performing only a minimal number of experiments.

In the second contribution: The data obtained were adjusted using 64 semi-empirical models of thin-layer drying literature of the reduced water content (MR) of the studied orange slices, a semi-empirical model proposed in this study. and a SVMR of static regrouping all studied kinetics. The proposed model was chosen as the most appropriate model to describe the drying kinetics of the orange. **Key words:** Microwave drying, empirical modeling, support vector machine modeling, experimental design, citrus fruit. with a very good precision of RMSE = 0.0149 and R^2 = 0.9957.

Key words: micro onde, empirical modeling, support vector modeling (SVMR), experimental design, citrus.

Nomenclature

A	Surface de séchage, (m^2).
a	Constante ; (-).
a_w	Activité de l'eau ; (-).
b	Constante ; (-).
C	Facteur de compressibilité ; (-).
C_1, C_2 et C_3	Constantes empiriques ; (-).
C_e	Concentration en vapeur d'eau dans le gaz ; (mol/m^3).
C_h	Chaleur massique de l'air ; (J/kg°C).
Cp	Chaleur massique du gaz ; (J/kg°K).
D_e	Coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air ; (m^2/s).
D_{eff}	Coefficient de diffusion effectif ; (m^2/s).
d_p	Taille des particules ; (µm).
H	Enthalpie de l'air humide ; (J/kg).
m	Constante ; (-).
M_R	Teneur en eau réduite.
P	Pression du gaz ; (bar).
r	Rayon ; (cm).
T	Température de la bulbe humide ; (°C).
X	Teneur en eau ; kg eau/kg matière sèche.
X_0	Teneur en eau initiale ; kg eau/kg matière sèche.
Ar	Nombre d'Archimède.
Gr	Nombre de Gukhman.
Nu	Nombre de Nusselt.
Pr	Nombre de Prandtl.
Re	Nombre de Reynolds.
Sh	Nombre de Sherwood.
Sc	Nombre de Schmidt.
Le	Nombre de Lewis.
bj	Biais (-).
dp	Diamètre des particules µm.
m	Masse Kg ou g
R	Coefficient de régression (-).
t	Temps (s ou min).
Tair	Température de l'air °C.

Nomenclature

Tcalo	Température du caloporteur °C.
Uair	Vitesse de l'air m/s.
Umf	Vitesse minimale de fluidisation m/s.
Wij	Poids synaptique (-)
W	Puissance de micro onde watts.

ABREVIATION

R	Coefficient de corrélation.
R^2	Coefficient de détermination.
R^2_{ajust}	Coefficient de détermination.
RMSE	Root-mean-square error.
RNA	Réseau de Neurones Artificiel.
GA	Génétique algorithme.
Lsqcurvefit	Méthode d'ajustement de courbe non linéaire.
DOE	Méthode des plans d'expériences.
Q^2	Capacité de prédiction du modèle.
$\boldsymbol{SS_{tot}}$	Somme totale des carrés.
$\boldsymbol{X^2}$	Chi Square Statistic.
Épi	épuisseur
MR	Teneur en eau réduire

Table des matières

Table des matières

Nomenclature.

Abréviation

Table des matières.

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Introduction générale. 1

Chapitre I **: Etude théorique du séchage**

Introduction..... 3

I.1 Terminologie de séchage

I.1.1 Séchage

I.1.1.1 Définition..... 3

I.1.1.2 Objectif de séchage d'un produit..... 3

I.1.1.3 Domaine d'utilisation..... 3

I.1.1.4 Types du séchage..... 4

I.1.2 Humidité

I.1.2.1 Définition..... 4

I.1.2.2 Taux d'humidité..... 4

I.1.2.3 Taux d'humidité à l'équilibre..... 5

I.1.2.4 États de siccité..... 5

I.1.3 Les caractéristiques de l'eau et de solide humide

I.1.3.1 L'eau dans un matériau 5

I.1.3.2 La teneur en eau X..... 6

I.1.3.3 Activité en eau d'un produit..... 6

I.1.3.4 Transferts d'eau en séchage..... 6

I.1.3.5 Description du solide humide 7

I.1.3.6 Hygroscopicité - teneur en humidité hygroscopique..... 8

I.2 Caractérisation de séchage

I.2.1 Isothermes de sorption 8

I.2.2 Mécanismes intervenant au cours du séchage..... 9

I.3 Modes de séchage

I.3.1 Transferts de chaleur

I.3.1.1 Séchage direct ou par convection 10

I.3.1.2 Séchage par contact indirect ou par conduction..... 13

I.3.1.3 Séchage par rayonnement..... 14

I.3.1.4 Séchage par pertes diélectriques 15

I.3.1.5 Le séchage par atomisation ou pulvérisation..... 15

I.3.2 Transferts de matière

I.3.2.1 Transferts d'eau en séchage..... 16

I.3.2.2 Description physique du séchage..... 16

I.3.3 Types de séchage

I.3.3.1 Séchage naturel 17

I.3.3.1.1 Séchoirs solaires……...…..... 18
I.3.3.2 Séchage artificiel (ou le séchage forcé) …….……..... 19
I.3.4 Technologique de séchage forcé
I.3.4.1 Sécheur à tambour…….....……..……. 20
I.3.4.2 Sécheur à compartiments……..... 20
I.3.4.3 Sécheurs à cylindres..... 21
I.3.4.4 Sécheur hélicoïdal..... 21
I.3.4.5 Sécheur rotatif sous vide partiel..... 22
I.3.4.6 Sécheur à air chaud 22
I.3.4.7 Sécheur à bande 23
I.3.4.8 Généralités sur le séchage par microondes
I.3.4.8.a. Définition des micro-ondes..... 23
I.3.4.8.a. Mécanisme de séchage par microonde
I.3.4.8.a.1 Principe 24
I.3.4.8.a.2 Le four à micro-ondes..... 24
I.3.4.8.b Paramètres influençant le séchage microondes
I.3.4.8.b.1 Propriétés diélectriques des aliments 25
I.3.4.8.b.2 Puissance microondes dissipée 25
I.3.4.8.b.3 Profondeur de pénétration des microondes..... 25
I.3.4.8.b.4 Effet du facteur de perte..... 25
I.3.4.8.c Technologies de séchages combinés aux micro-ondes..... 25
I.3.4.8.d. Avantages des micro-ondes..... 26
I.3.5 Le choix du procédé de séchage..... 26
I.6 .Cinétique du séchage..... 26
I.6.1 Vitesse de séchage..... 26
I.6.2 Durée de séchage..... 27
I.B Conclusion..... 28

Chapitre II : Généralités sur les plans d'expérience et SVM

II.A Introduction..... 29
II.1 Généralité sur le plan d'expérience
II.1.1 Définition 29
II.1.2 Objectif de plan d'expérience..... 29
II.1.3 Espace expérimental..... 30
II.1.4 Domaine d'un facteur 30
II.1.5 Domaine d'étude..... 31
II.1.5.1 Méthodologie des plans sans contraintes..... 32
II.1.5.2 Surfaces de réponse..... 32
II.1.6 Les méthodes des plans d'expériences..... 33
II.1.7 Les types de plans d'expériences..... 33
II.1.7.1 Plans factoriels complets..... 33
II.1.7.1.1 Comment fonctionne un plan d'expériences ? 34
II.1.7.2 Notion de modélisation mathématique..... 34
II.1.7.3 Le modèle de l'expérimentateur..... 35

II.1.7.4 Analyse statistique..... 35
II.2 Étude théorique sur SVM
II.2.1 Définition 37
II.2.2 Technique de SVM..... 37
II.2.3 SVM régression..... 38
III.2.4 SVM a noyaux (Kernel)..... 39
II.2.5 Évaluation..... 41
II.2.6 Méthode HoldOut..... 41
II.B Conclusion..... 42

Chapitre III : Etude expérimentale
Contribution A ***: Modélisation par plan d'expériences***
III.A. Application de la méthode de plan d'expérience
III.A.1. les étapes du processus d'expérimentation..... 43
III.A.2.Résumé de la conception..... 44
III.A.3. variable de réponse 44
III.A.4. Définition des facteurs..... 44
III.A.5. Définition du domaine expérimental..... 45
III.A.6. Construction du plan d'expériences et le choix du modèle..... 45
III.A.7. Plan expérimental 46
III.A.8. Matériels et méthodes des expérimentations..... 46
III.A.8.1. Matières premières..... 46
III.A.8.1.1. Orange..... 47
II.A.8.1.1.1.Description..... 47
III.A.8.1.1.2.Structure..... 47
III.A.8.1.1.3. Composition chimique et valeur nutritive..... 48
III.A.8.1.2. Citron..... 48
III.A.8.1.2.1. Description..... 49
III.A.8 .1.2.2.Composition chimique et valeur nutritive..... 49
III.A.8.2. Méthode de traitement de l'orange et du citron
III.A.8.2.1.Matériels utilisés..... 50
III.A.8.2.2. Collecte des échantillons 50
III.A.8.2.3. Préparation de l'échantillon..... 50
III.A.8.2.4. Détermination de la teneur en eau 51
III.A.8.2.5.Taux de matière sèche 51
III.A.9. Études préliminaires
II.A.9.1. Cinétique du séchage par étuve ventile (conventionnel)..... 51
III.A.9.1.a. Orange..... 52
III.A.9.1.1. Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage 52
III.A.9.1.2. Influence de température sur les cinétiques de séchage 53
III.A.9.1.3.Temps d'équilibre (optimal) des séchages à l'étuve 55
III.3.1.b. Citron 55
III.3.1.b.1. Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchag..... 55

III.3.1.b.2 Influence de température sur les cinétiques de séchage 56
III.3.1.b.3 Temps d'équilibre (optimal) des séchages à l'étuve 57
III. A.9.2. Cinétique du séchage par micro-onde..... 58
III.A.9. 2.a. Orange..... 58
III.A.9. 2.a.1 Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage 58
III.A.9. 2.a.2 Influence de la puissance sur les cinétiques de séchage 61
III.A.9. 2.a.3 Temps d'équilibre 62
III.A.9.3. Comparaison entre les deux modes de séchage 63
III.A.**9**.3.a. Effet sur la durée du séchage..... 63
III.A.9.3.b Effet sur la forme de produit après le séchage..... 65
III.A.10. Analyse des résultats
III.A.10.1.1. Analyse mathématique des résultats d'essais..... 61
III A.10.1.2.Analyse de la variance (ANOVA)..... 62
III.A.10.1.3. Analyse graphique du modèle..... 63
III.A.10.2.1. Analyse globale des résultats d'essais..... 63
III.A10.2.2. Analyse mathématique des résultats d'essais..... 63
III.A.10.2.3. Conception des expériences (Modèle mathématique)..... 64
III.A.10.2.4. Analyse statistique des modèles..... 64
III.A.10.2.4.1.Analyse statistique des coefficients du modèle..... 64
III.A.10.2.4.2.Effets des facteurs..... 65
III.A.10.2.4.3.Analyse de la variance (ANOVA)..... 66
III.A.10.2.5. Analyse graphique du modèle..... 67
III.A.10.2.5.1. Courbe de criblage 67
III.A.10.2.5.2. Résumé de l'ajustement (Les statistiques sommaires..... 67
III.A.10.2.5.3. Représentation graphique des surfaces de réponses..... 68
III.A.10.2.5.4. Représentation graphique de l'effet des facteurs 69
III.A.10.2.5.5. Courbes iso-réponse..... 69
Conclusion..... 70

Chapitre III ***: Etude expérimentale***
Contribution B ***: Modélisation mathématique et Modélisation par SVMR***
III.B.1 Modélisation des cinétiques de séchage 71
- Teneur en eau réduite..... 71

- ❖ Analyse des transferts lors du séchage 71

III.B.2.Analyse de base de données expérimentale..... 71

III.B.3. Modèles semi empiriques et empirique..... 72

III.B.3.1. Modélisation semi empiriques et empirique..... 72

III.B.3.2.Méthodologie..... 74

III.B.3.3.Résultats de la modélisation..... 74

III.B.4. Modélisation par SVM 78

III.B.4.1. Conception de la topologie de SVM..... 78

III.B.4.2. Conception de la Base de données..... 78

III.B.4.3. Normalisation de la base de données..... 87

III.B.4.4. Mise en forme des données..... 78

III.B.4.5. Optimisation de SVMR..... 78

III.B.4.6. Interprétation des résultats de modélisation par SVM..... 79

III.B.4.7.comparaison entre les modèles semi-empiriques et le modèles DA-SVM-90..... 79

III.B.4.8.Représentation graphique du meilleur modèle..... 79

III.B.5. Conclusion 80

Chapitre I

Tableau I.1	Mécanisme d'absorption de l'eau dans les pore	8

Chapitre II

Chapitre III *Contribution A :*

Tableau III.A.1	Résumé de la conception	44
Tableau III.A.2.	La nature des différents Facteurs	44
Tableau III.A.3	Les variables indépendantes et les niveaux de facteurs influençant sur le séchage assisté par micro-ondes	45
Tableau III.A.4	Expériences réalisées dans le plan expérimental	46
Tableau III.A.5	principaux composés d'orange	48
Tableau III .A.6	Composition biochimique moyenne du citron	49
Tableau III.A.7	Les expériences réalisées pour étudier l'influence d'épaisseur	52
Tableau III.A.8	Les expériences réalisées pour étudier l'influence d'épaisseur	59
Tableau III.A.9	Analyse de variance (ANOVA) de temps d'équilibre (t) pour le séchage ire statistique	62
Tableau III.A.10	La liste des critères statistiques adoptés.	62
Tableau II.A.11	Coefficients de modèles	63
Tableau III.A.12	Analyse statistique des coefficients du modèle	65
Tableau III.A.13	Analyse statistique des coefficients du modèle après traitement	65
Tableau III.A.14	Analyse de variance (ANOVA) de $\mathbf{t_{eq}}$ pour le séchage	66

Chapitre III *- Contribution B*

Tableau III.B.1	Paramètres statistiques des paramètres d'entrée et de sortie	71
Tableau III.B.2	Paramètres statistiques	72
Tableau III.B.3	Modèles proposés dans la littérature	73
Tableau III.B.4	Résultats statistiques des meilleurs modèles dans la littérature et du modèle proposé.	77
Tableau III.B.5	résume les paramètres du modèle	79
Tableau III.B.6	RMSE moyen de quelques modèles étudiés dans ce travail	79

Chapitre I

Figure I.1	L'état de l'eau dans le matériau	5
Figure I.2	Représentation schématique d'un solide humide	7
Figure I.3	Allure générale des isothermes d'adsorption	9
Figure I.4	Séchage par convection	12
Figure I.5	Séchage par contact	13
Figure I.6	Séchage par rayonnement	14
Figure I.7	Description physique du séchage	17
Figure I.8	Séchoir solaire direct	18
Figure I.9	Séchoir solaire indirect	19
Figure I.10	Sécheur à Tambour	20
Figure I.11	Sécheur à compartiments	20
Figure I.12	Sécheur à cylindrique	21
Figure I.13	Sécheur hélicoïdal	21
Figure I.14	Sécheur rotatif sous vide	22
Figure I.15	Sécheur à air chaud	22
Figure I.16	Sécheur à bande	23
Figure I.17	Schéma d'une micro-onde	24
Figure I.18	Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique	24
Figure I.19	Schématisation des différents composants du four à micro-ondes	25
Figure I.20	Le taux d'humidité du produit (n_s) en fonction du temps	26

Chapitre II

Figure II.1	L'espace expérimental de l'étude de deux facteurs pour un plan à deux dimensions	30
Figure II.2	Le domaine de variation des facteurs	30
Figure II.3	Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs sans contraintes	31
Figure II.4	Le domaine d'étude sous contraintes est représenté par la partie grisée	31
Figure II.5	Exemple de disposition des points expérimentaux dans un domaine sans contraintes	32
Figure II.6	L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse	32
Figure II.7	Séparation souple par SVM	38
Figure II.8	Points non linéairement séparables et leur projection vers un autre espace d'une dimension supérieur.	39

Chapitre III *- Contribution A*

Figure III.A.1	Fruit d'orange	47
Figure III.A.2	Caractéristiques morphologiques d'une orange	47
Figure III.A.3	Fruit de citron	49
Figure III.A.4	Photographie de tranches des oranges et des citrons avant le séchage	50
Figure III.A.5	Etuve ventile	51
Figure III.A.6	Evolution de la teneur en eau (x) de l'orange en fonction du temps du Séchage à T=105 °C	52
Figure III.A.7	Evolution de la teneur en eau de l'orange en fonction du temps de séchage à T=70 °C	53
Figure III.A.8	Influence de la température sur l'évaluation X (%) de la fonction du temps	53
Figure III.A.9	Influence de la température sur l'évaluation X (%) de la fonction du temps de séchage à épi=6 mm	54
Figure III.A.10.	Influence de la température sur l'évaluation X (%) de la fonction du temps de séchage à épi=3 mm	55
Figure III.A.11	Temps optimal de séchage par étuve à différentes températures – épaisseur. séchage à T=105 °C	55
Figure III.A.12	Evolution de la teneur en eau de citron en fonction du temps du séchage à105 °C	56
Figure III.A.13	Evolution de la teneur en eau de citron en fonction du temps du séchage à **70 °C**	56
Figure III.A.14	Influence de la température sur l'évaluation X (%) de la fonction du temps de séchage à épi=10 mm	57
Figure III.A.15	Temps optimal de séchage par étuve à différentes l'épaisseur à (70 et 105 °C)	58
Figure III.A.16	micro onde	58
Figure III.A.17	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage à micro onde, **l'orange** à Puissance 100 w	59
Figure III.A.18	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage à micro onde, **l'orange** à puissance 200 W	59
Figure III.A.19	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage par micro onde, **l'orange** à Puissance 300 W	59

Figure III.A.20	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage par micro onde, **l'orange** à puissance 400 W	60
Figure III.A.21	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage par micro onde, **l'orange** à puissance 500 W	60
Figure III.A.22	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage par micro onde, **l'orange** à puissance 600 W	60
Figure III.A.23	Influence de l'épaisseur sur l'évaluation de la teneur en eau pendant le séchage par micro onde, **l'orange** à puissance 900 W	61
Figure III.A.24	La corrélation entre les valeurs prédites et de l'expérience	63
Figure III.A.25	La corrélation entre les valeurs prédites et de l'expérience	67
Figure III.A.26	Résumé de l'ajustement de MODDE	68
Figure III.A.34	Surface de réponse épi /w en fonction le temps de séchage (t_{eq})	68
Figure III.A.28.	Effets des facteurs sur les réponses	69
Figure III.A.29	Courbes iso-réponse	69

Chapitre III *- Contribution B*

Figure III.B.1	Histogramme comparative d'erreur des 31 modèles de littérature avec le modèle proposé	75
Figure III.B.2	Présentation graphique de variation de l'erreur des onze meilleurs modèles	76
Figure III.B.12	Méthodologie de modélisation par SVM	76
Figure III.B.3	Régression linéaire entre la M_R expérimentale et M_R calculée par le model SVM utilisant la fonction de noyau polynomiale	79
Figure III.B.4	Comparaison des erreurs de modèles	80

INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERALE

L'opération de génie de séchage joue souvent un rôle important lié à l'amélioration de la qualité des produits dans plusieurs procédés de production dont on peut citer, les domaines alimentaires, biologiques ou miniers, domaines de la chimie, et de la pharmacie, …, etc.

Du point de vue scientifique, le séchage est une opération caractérisée par des transferts couplés de chaleur, de masse et de quantité de mouvement. Du point de vue industriel alimentaire, le séchage a pour objet principalement d'assurer la conservation de certains produits, de réduire leur poids afin de faciliter leur transport,…

Certains auteurs signalent que le séchage est un phénomène complexe, il regroupe de nombreux autres phénomènes qui ressortent de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et des transferts thermiques et massiques.

Dans la plupart des cas, le séchage peut être considéré comme l'opération la plus utilisée dans le secteur alimentaire et agroalimentaire vu qu'il permet d'éviter l'utilisation de conservateurs qui sont souvent déconseillés pour la consommation. C'est pourquoi il est à la fois indispensable et utile d'étudier le procédé de séchage et les conséquences résultantes afin de prédire et d'optimiser les processus de séchage surtout des produits alimentaires à consommation directe.

La révolution de l'informatique et le développement de nouvelles méthodes de calcul numérique basé sur l'intelligence artificielle et les sciences cognitives ont donné naissance durant les dernières décennies à de nouvelles méthodes de calcul et de modélisation telles que les machines à vecteurs de support (SVM), les systèmes experts, les algorithmes génétiques et la logique floue.

Dans ce contexte, ce travail est consacré à l'étude expérimentale et à la modélisation du séchage des tranches d'orange et de citron pour des fins de conservation. Le thème est inspiré du besoin de conservation de ces fruits vu le volume de récolte massif que connaisse cette année en particulier.

En effet, le séchage peut être effectué par deux méthodes, conventionnel dans une étuve ou bien par micro-onde. La meilleure méthode correspond à une préservation de la qualité du produit après le séchage, et respect de contraintes économiques assurant des procédés efficaces et avec un minimum de cout. La présente étude est répartie en trois chapitres, et s'achève par une conclusion générale et des perspectives.

Le **premier** chapitre, regroupe des généralités sur le séchage, une synthèse bibliographique concernant les différents types et équipements de séchage, un bilan de connaissance sur la cinétique de séchage, en expliquant toutes les phases de séchage.

Le **deuxième** chapitre, concerne les méthodes de modélisation et d'optimisation tels que les plans des expériences et les machines à vecteurs de support.

Le **troisième** chapitre comporte deux contributions. La première consiste à la réalisation d'une série d'expériences désignées par la méthode des plans des éxpériences, et les résultats obtenus de cette dernière sont utilisés pour modéliser les cinétiques de séchage, ce qui représente la deuxième contribution présentée dans ce troisième chapitre.

Enfin, une conclusion générale rassemblant les résultats obtenus dans les deux contributions et leur explications suivie de perspectives marque la fin de ce modeste travail.

Chapitre I

Etude théorique du séchage

I.A Introduction

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes de conservation des aliments. Il consiste en sujets d'évaporation de l'eau et de composés volatils, réduisant la croissance des micro-organismes et des réactions chimiques non désirées telles que le brunissement enzymatique afin d'augmenter la vie du produit. Il aide à obtenir un produit sec et homogène à l'extrémité du séchage. (Verdier et al., 2016).

I.1 Terminologie de séchage

I.1.1 Séchage

I.1.1.1 Définition

Il est défini comme séparation thermique consistant à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant (eau dans la plupart des cas) un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide, qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle, (Arlabosse, 2008).

Le matériau à traiter est supposé fait de deux constituants :

- La matière sèche : c'est la partie du produit à conserver, soit parce qu'elle a de la valeur, soit pour la traiter séparément du liquide.
- La matière humide : elle se vaporise et quitte le produit sous forme de vapeur (Djerroud, 2010).

I.1.1.2 Objectif de séchage d'un produit

L'utilisation du séchage dans les industries agro-alimentaires a de multiples buts

- Le liquide résiduel est incompatible avec l'utilisation ultérieure du produit, pour des raisons chimiques ou physiques.
- Le produit humide se conserve mal, qu'il subisse une dégradation chimique (hydrolyse de la molécule solide par exemple), ou que son aspect physique soit modifié (mottage d'une poudre par exemple).
- Le coût des manipulations du produit humide est grevé par la présence de liquide résiduel même si ce dernier ne gêne pas l'application (coût de transport par exemple).
- Le séchage, outre son objectif principal qui est d'éliminer le liquide, apporte une modification morphologique du solide intéressante pour son usage ultérieur (création de pores par exemple), (Koller, 2009).

I.1.1.3 Domaine d'utilisation

- Industrie agroalimentaire par exemple (les pâtes alimentaires, Certains produits en poudre. Cacao, lait, …).

- Industrie papetière.
- Industrie du bois.
- Bouchons de liège.
- Matériaux de construction par exemple (briques, carrelages…).
- L'industrie céramique par exemple (assiettes, bols, plats…).
- La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique par exemple (levure en poudre, antibiotiques, séchage de principes actifs sous forme de poudre avant pastillage…).

I.1.1.4 Types du séchage

- **Séchage mécanique :** C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression, décantation et filtration).
- **Séchage chimique :** C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (chlorure de calcium) pour extraire l'eau.
- **Séchage thermique :** Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur, (McCabe et al., 1985; Seghier and Rouas, 2016).

I.1.2 Humidité

I.1.2.1 Définition

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage, (Cavaillé and Charreau, 1995).

Elle est caractérisée sur un plan quantitatif global par la teneur en eau (X), Cette quantification ne permet cependant pas d'évaluer les différentes formes que peut prendre l'eau dans un solide. Dans cet ordre d'idée, l'activité de l'eau affine un peu la description, (Trichaiyaporn, 1991).

I.1.2.2 Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre. La norme expérimentale E 33-060 définit les différentes méthodes permettant d'évaluer le taux d'humidité (elle permet également de caractériser les performances des sécheurs), (Cavaillé and Charreau, 1995)

I.1.2.3 Taux d'humidité à l'équilibre

Le taux d'humidité à l'équilibre désigne l'humidité d'un produit en équilibre avec la vapeur contenue par l'agent de séchage. C'est le taux minimum d'humidité auquel un matériau peut théoriquement être séché à des conditions données, (Mennouche, 2006).

I.1.2.4 États de siccité

- Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.
- Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul, (Cavaillé and Charreau, 1995).

I.1.3 Les caractéristiques de l'eau et de solide humide

I.1.3.1 L'eau dans un matériau

L'eau titrable dans un matériau existe sous trois états comme le rappellent Nadeau :

- **L'eau libre** elle se trouve-dans les espaces libres existent à l'intérieur de la structure elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire et la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (La plus grande partie de l'eau contenue dans un matériau se présente sous l'état libre).
- **L'eau liée** elle est adsorbée sur la surface interne et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leur constituants.
- **La vapeur d'eau** elle occupe en mélange avec de l'air sec les espaces vides non saturés par l'eau liquide, (Puiggali and Nadeau, 1995).

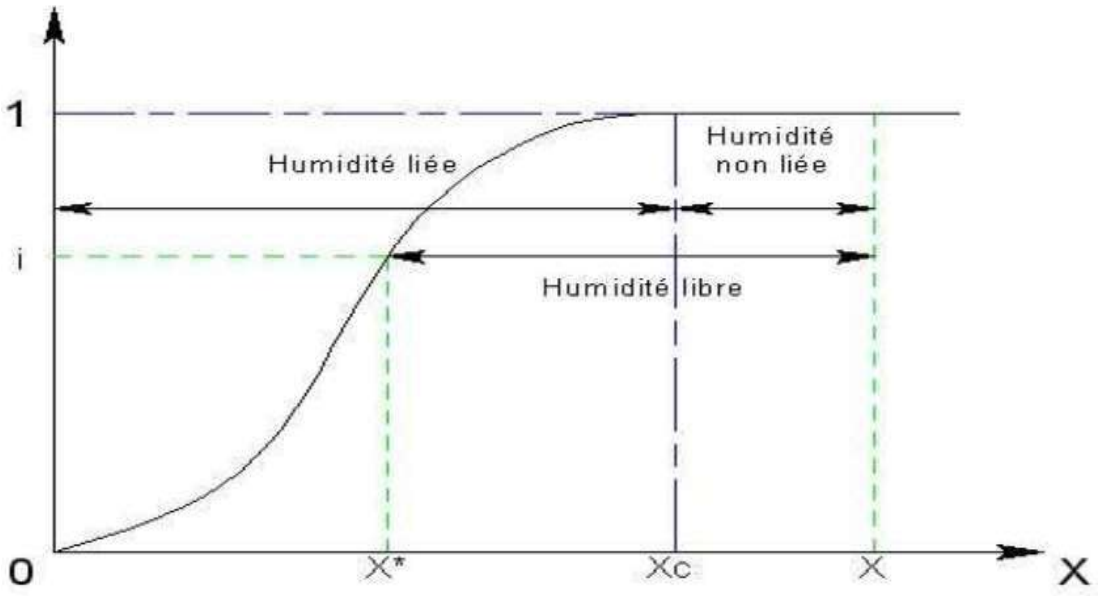


Figure I.1 : L'état de l'eau dans le matériau

I.1.3.2 La teneur en eau X

La teneur en eau *X* est définie comme le rapport entre la masse d'eau m_e et la masse de solide sec m_s à laquelle elle est associée, (Charreau and Cavaille, 1991):

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad \text{(I.1)}$$

Avec *X* : la teneur en eau (%), m_e : la masse d'eau (g) et m_s : la masse sec (g)

I.1.3.3 Activité en eau d'un produit

L'eau contenue dans le matériau n'est ni « pure » au sens qu'elle contient souvent des solutés, ni « libre » au sens qu'elle est plus au moins liée à la matière sèche (forces capillaires, liaisons hydrogènes, forces de Van der Waals, liaisons polaires, solvatations des ions, …).

Tous ces phénomènes créent une liaison entre l'eau et la matière sèche dite aussi « sorption ». Cette liaison peut être évaluée par l'activité de l'eau, notée a_e ou a_w.

L'activité de l'eau est définie comme le rapport de la pression partielle de la vapeur en équilibre avec l'eau du produit, P_v est à la tension de vapeur saturante P_s pour une même température *T*, (Bonazzi and Bimbenet, 2003; Gevaudan, 1989).

$$a_e = \frac{P_v}{P_s} \quad \text{(I.2)}$$

Avec a_e: l'activité de l'eau, P_v : la pression partielle de la vapeur en équilibre et P_s : la pression de vapeur saturante

Lorsque $a_e = 1$

- L'énergie de liaison de l'eau avec le solide est faible.
- L'eau peut migrer librement sous forme liquide.
- L'eau dans le produit est dite « eau libre ».
- C'est cette eau qui est éliminé en premier pendant le séchage.

Lorsque $a_e < 1$

- L'eau est dite liée.
- L'énergie de liaison est élevée comparée à celle de l'eau libre.
- Demande une énergie plus élevée pour passer à l'état vapeur.

Au cours du séchage l'eau libre part en premier, puis l'eau est de plus en plus liée, Il ne reste à la fin qu'une eau résiduelle très liée, (Bonazzi and Bimbenet, 2003; Gevaudan, 1989).

I.1.3.4 Transferts d'eau en séchage

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau

est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important), (Bimbenet, 1984).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau, L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière, (Charreau and Cavaille, 1991).

I.1.3.5 Description du solide humide

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante (figure I.2). Le solide a un film d'eau adhérant à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores :

Les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et entrainent à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses, (Mujumdar, 1987).

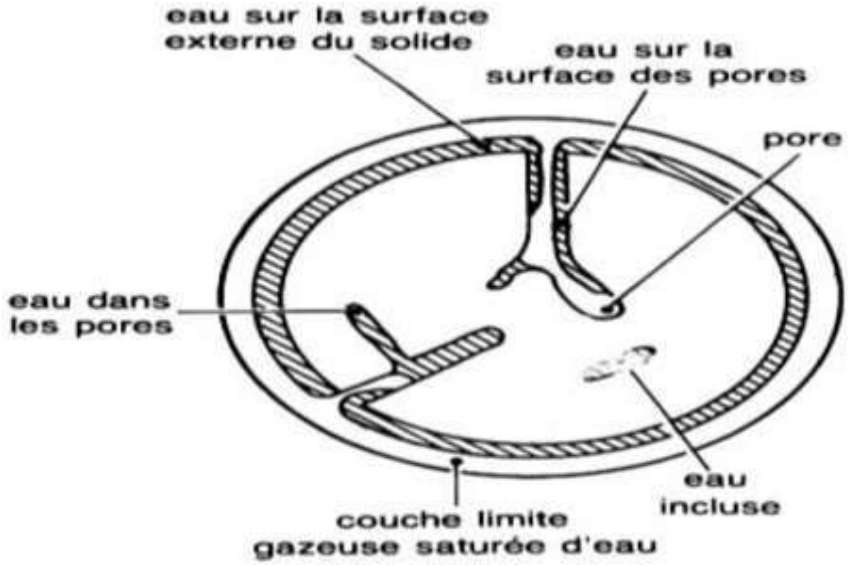
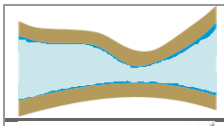
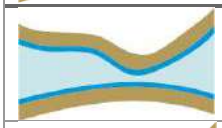
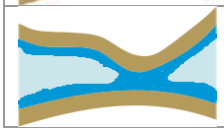


Figure I.2 : Représentation schématique d'un solide humide, (Cavaillé and Charreau, 1995)**.**

I.1.3.6 Hygroscopicité - teneur en humidité hygroscopique

Un matériau donné, poreux et à pores ouverts placés dans un air humide va absorber une certaine quantité d'humidité qui dépend uniquement de l'humidité relative (H_r) de l'air et qui lui est proportionnelle. Ainsi, un matériau tout à fait sec placé dans l'air humide voit sa masse augmenter. Un état d'équilibre s'établit après un certain temps.

Tableau I.1 : Mécanisme d'absorption de l'eau dans les pore, ("Energie," 2017).

	Pour une faible humidité relative, de l'eau est absorbée par le matériau et forme une fine couche d'eau sur les parois des pores.
	Lorsque l'humidité relative augmente, l'épaisseur de la couche absorbée augmente. Dans les canaux les plus étroits, les couches se touchent.
	Lorsque l'humidité relative augmente encore, de la condensation se forme dans les pores les plus étroits du matériau ; on dit qu'il y a condensation capillaire.

I.2 Caractérisation de séchage

I.2.1 Isothermes de sorption

Une isotherme de sorption (adsorption ou désorption) représente à l'équilibre, et pour une température déterminée, la relation entre la teneur en eau du produit et l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure. Elle est habituellement décrite par une courbe rapportant la quantité d'eau adsorbée en fonction de l'activité. Les courbes de sorption ont le plus souvent des allures de sigmoïdes particulièrement pour des produits biologiques. Pour une même valeur de l'activité de l'eau, elles peuvent différer selon qu'elles correspondent à une adsorption ou à une désorption exprimant alors un phénomène d'hystérésis, (Trichaiyaporn, 1991).

L'activité a_e de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température T, la courbe représente pour une température T donnée et de teneur en eau X en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_e ou de l'humidité relative de l'air en équilibre Hr est appelé :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminer expérimentalement en portant d'un produit sec
- Isotherme de désorption si elle a été déterminer expérimentalement en portant d'un produit saturé en eau, (Jannot, 2008).

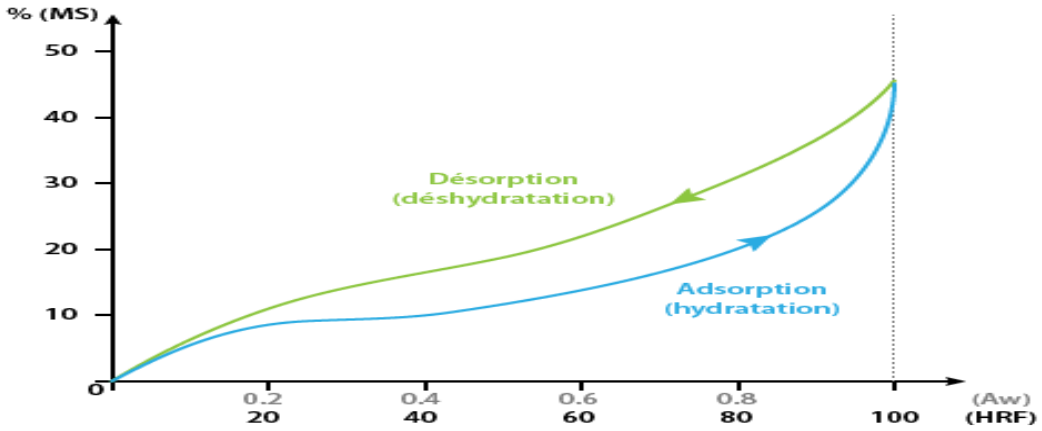


Figure I.3 : Allure générale des isothermes d'adsorption, (Charreau and Cavaille, 1991).

I.2.2 Mécanismes intervenant au cours du séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement. Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexister dans un produit à un moment donné (Bimbenet, 1984).

- **Séchage par ébullition :** L'idée la plus simple consiste à porter le produit à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. L'ébullition a lieu lorsque la température du matériau est à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau en équilibre avec ce matériau P_v, est égale à la pression totale ambiante P_t

$$P_v = P_t \tag{I.3}$$

P_v : la pression de vapeur d'eau en équilibre avec ce matériau.

P_t : la pression totale ambiante.

Il découle de cette définition que, la température d'ébullition $T_{éb}$ dépend à la fois de la pression totale et de l'activité de l'eau, selon la formule :

$$P_v = a_e\, P_e\,(T) = P_s(T) \tag{I.4}$$

$P_s\,(T)$: La pression de vapeur saturante de l'eau pure à la température T du matériau.

$P_e\,(T)$: La pression de l'eau à la température T du matériau.

α_e : L'activité de l'eau.

Le gaz en contact avec la surface du produit est de la vapeur d'eau pure, cette propriété permet de sécher des produits oxydables en l'absence d'oxygène de l'air ou d'éliminer un solvant volatil, combustible en présence d'air, par ébullition dans une enceinte fermée**,** (Bonazzi and Bimbenet, 2003).

- **Séchage par entrainement :** Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :
  - Le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau.
  - L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau.
  - La vapeur d'eau est transférée par diffusion et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz.

La température de surface du produit reste toujours inférieure ou égale à celle de l'air et donc nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau, (Djerroud, 2010).

I.3 Modes de séchage

I.3.1 Transferts de chaleur

Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction – rayonnement, ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux, **(**Charpentier, 1996).

Le bilan thermique se rapportant à un produit soumis au séchage (conditions constantes), pour la première période de séchage sera, (Charreau and Cavaille, 1991) :

$$Q_{conv} + Q_{cond} + Q_r = w_{pv} \quad \text{(I.5)}$$

Q_{conv} : transfert de chaleur par conduction.

Q_{cond} : transfert de chaleur par conduction.

Q_r : transfert de chaleur par rayonnement.

W_{pv} : l'énergie mécanique totale fournie durant le transfert de chaleur.

I.3.1.1 Séchage direct ou par convection

C'est le mode de séchage utilisé par la très grande majorité des installations de l'industrie chimique. L'échange thermique est obtenu par contact direct entre le solide humide et des gaz (air) chauds qui agissent comme moyen de transport pour le fluide évaporé.

- La circulation de l'agent séchant peut-être naturelle ou forcée, lorsque la matière à sécher et le gaz circulent dans le même sens, l'opération est appelée anti-méthodique.
- Le mode de séchage méthodique (produit et agent sont de sens contraires) s'applique aux produits peu sensibles aux chocs thermiques, (Koller, 2009).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide.

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».
- Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle », (Bennamoun and Belhamri, 2007).

Ce type de transfert utilise l'équation suivante :

$$Q_{conv} = \alpha S(T_a - T_p) \tag{I.6}$$

Avec :

α : le coefficient global d'échange thermique par convection.

S : la surface d'échange thermique entre produit et l'agent séchant.

$(Ta - Tp)$: l'écart entre la température de l'air (ou gaz de séchage) et la température superficielle du produit à sécher, (Charreau and Cavaille, 1991).

La surface d'échange S n'est pas toujours très bien définie. Pour les produits granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on choisit un diamètre moyen des particules. En divisant la répartition granulométrique en tranches, à chaque tranche correspond un diamètre moyen d_{pi} mais aussi un pourcentage x_i de la masse totale de l'échantillon sur laquelle l'analyse a été effectuée. De cette manière, le diamètre moyen des particules sera égal à :

$$d_{pm} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \tag{I.7}$$

En supposant que les particules sont sphériques, la surface spécifique de la couche est alors :

$$a = \frac{6}{d_{pm}} \ (m^2/m^3) \tag{I.8}$$

Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm, le coefficient d'échange par convection α peut être calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{\alpha \, d_p}{\lambda_a} \tag{I.9}$$

Avec

λ_a : conductivité thermique de l'air, grâce à la relation.

$$Nu = CRe^{0.8}\,Pr^{0.5} \qquad \text{(I.10)}$$

Où

Re : est le nombre de Reynolds.

Pr : est le nombre de Prandtl, égal à 0,7 dans le cas de l'air.

C : est une constante ajustée expérimentalement (valeur proche de 2).

Pour exprimer le coefficient d'échange par convection dans les sécheurs rotatifs,(Friedman and Marshall, 1949), ont proposé la formule empirique suivante :

$$Ua = 20\left(\eta_f - 1\right)\frac{G^{2/3}}{\mathrm{D}} \qquad \text{(I.11)}$$

Avec

Ua ($W{\cdot}m^{-3}{\cdot}K^{-1}$) : Coefficient moyen volumique d'échange par convection (Exprimé par rapport au volume interne du sécheur rotatif).

η_f : Nombre de pelles.

G ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) : Débit spécifique d'air de séchage à travers le sécheur.

D (m) : Diamètre du sécheur.

Dans les sécheurs rotatifs industriels, U_a est voisin de 150 $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$, (Busin et al., 1995).

Le séchage par convection nécessite un apport énergétique important et demande pour être efficace une température relativement élevée quand on élimine de l'eau (60-80°C), ce qui peut poser des problèmes avec les produits thermosensibles dégradables à ces niveaux de température, (Rankelli et al., 1996).

Pendant cette période la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas, (Claude, 1993**)**.

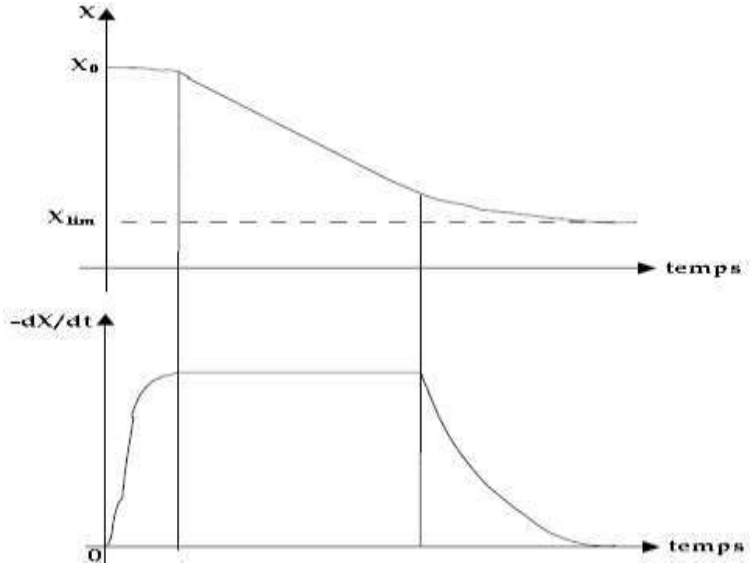


Figure I.4 : Séchage par convection, (Claude, 1993).

I.3.1.2 Séchage par contact indirect ou par conduction

L'échange thermique est obtenu par contact entre le solide humide et une paroi métallique (fig. I.5) réchauffée par un fluide (eau, vapeur, etc.).

La température de la matière est supérieure à la température du bulbe humide correspondant à l'humidité du gaz porteur. La surface d'échange thermique est fonction de la température de la paroi et de la capacité évaporatoire du produit. Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible, plus la surface d'échange devra être importante, à même capacité évaporative. En séchage conductif, la diminution de la température de séchage s'obtient sous pression réduite.

Le séchage sous vide est particulièrement intéressant si l'on traite des produits sensibles à l'oxydation lorsqu'ils sont chauffés, (Koller, 2009).

Le liquide évaporé est éliminé par aspiration sous vide ou bien par émission de gaz de transport. Pour disposer d'un bon transfert de chaleur entre la matière et la paroi chauffante, il faut appliquer cette méthode aux produits liquides, solides pâteux, pulvérulents ou en suspension, ainsi qu'aux matières en ruban : papier, tissu.

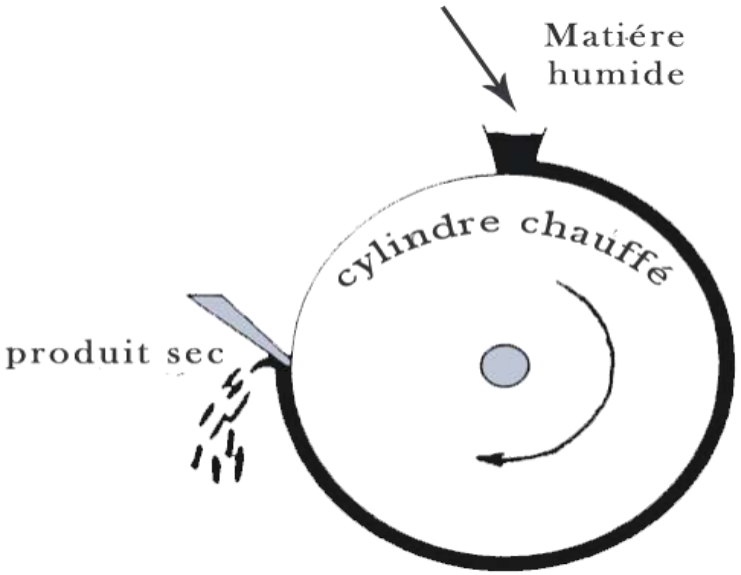


Figure I.5 : Séchage par contact (conduction), (Koller, 2009).

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation (I.12), (Marcel Loncin, 961) :

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \qquad \text{(I.12)}$$

Avec λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/km).

dT/dt : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

I.3.1.3 Séchage par rayonnement

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann, (Charreau and Cavaille, 1991) :

$$Q = A_1\, C \left[\left(\frac{T1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T2}{100}\right)^4\right]\varphi \qquad \text{(I.13)}$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)}\,\sigma \qquad \text{(I.14)}$$

Avec :

T_1 (K) : température de la source émettrice.

T_2 (K) : température du produit.

A_1 (m^2) : surface du corps recevant le rayonnement.

A_2 (m^2) : surface de l'émetteur d'infrarouge.

φ : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

(Lorsque l'émetteur entoure le produit, On a $\varphi = 1$).

ε_1 : émissivité du produit à traiter, (grandeurs sans dimensions).

ε_2 : émissivité de l'émetteur.

σ : constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5,673 $\times 10^{-8}$W · m^{-2}· K^{-4}). (Charreau and Cavaille, 1991)

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

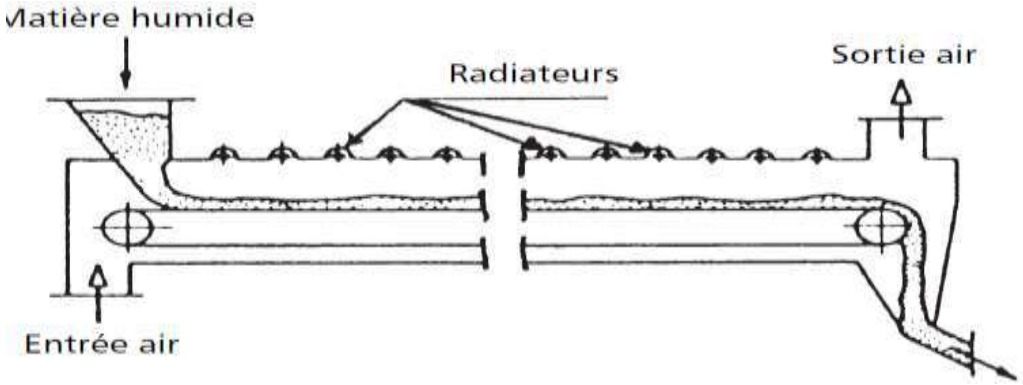


Figure I.6 : Séchage par rayonnement, (Koller, 2009).

I.3.1.4 Séchage par pertes diélectriques

Un diélectrique est un matériau ayant la particularité d'être un isolant électrique. Placé dans un champ électrique, les atomes ou les molécules constituant ce matériau se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée, l'attraction des charges électriques change de direction, ce qui a comme conséquence une déformation de la matière qui, si elle est entretenue, provoque son échauffement, (Koller, 2009)**.**

On emploie les hautes fréquences en séchage des produits textiles en masse, biscuits après cuisson, produits pharmaceutiques et céramiques… etc.

Le chauffage des micro-ondes est utilisé pour :

- Le séchage des colles sur papier et des films photographiques.
- Le séchage, la cuisson et le frittage des céramiques.

I.3.1.5 Le séchage par atomisation ou pulvérisation

Depuis plus de quarante ans, le séchage par atomisation (pulvérisation) est la technique de séchage la plus employée dans plusieurs industries, (Jeantet et al., 2006)**.**

- **Principes le séchage par pulvérisation**

Souvent appelé séchage par atomisation, est une technique de séchage particulaire. Il consiste à pulvériser le produit à sécher (qui se présente sous forme liquide ou en suspension) dans un courant d'air (ou un autre gaz) suffisamment chaud et sec de manière à obtenir une poudre., il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tel, (Jeantet et al., 2006) :

- Qu'un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Qu'un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit.
- Transferts couplés de chaleur et d'eau entre une gouttelette et l'air de séchage

I.3.2 Transferts de matière

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment, (Saravacos, 1995).

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la

composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation, (Saravacos, 1995).

Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par filtration à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface, (Bimbenet, 1984).

L'agitation du solide est un facteur important en permettant le transfert du liquide vers la phase vapeur par évaporation, mais également le transfert thermique entre le moyen de chauffage et le solide humide. Cette agitation peut être réalisée par :

- Agitation externe du sécheur (mouvement de rotation, mouvement alternatif, vibration de basse fréquence).
- Agitation interne (racloir, vis sans fin assurant également le déplacement du solide, agitateur à palettes).
- Fluidisation à l'aide d'un gaz tiers (séchage par entrainement).
- Atomisation (mélange intime du solide et du gaz de séchage dans une turbine d'atomisation), (Djerroud, 2010).

I.3.2.1 Transferts d'eau en séchage

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure I.2), (Charreau and Cavaille, 1991).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau, (Charreau and Cavaille, 1991).

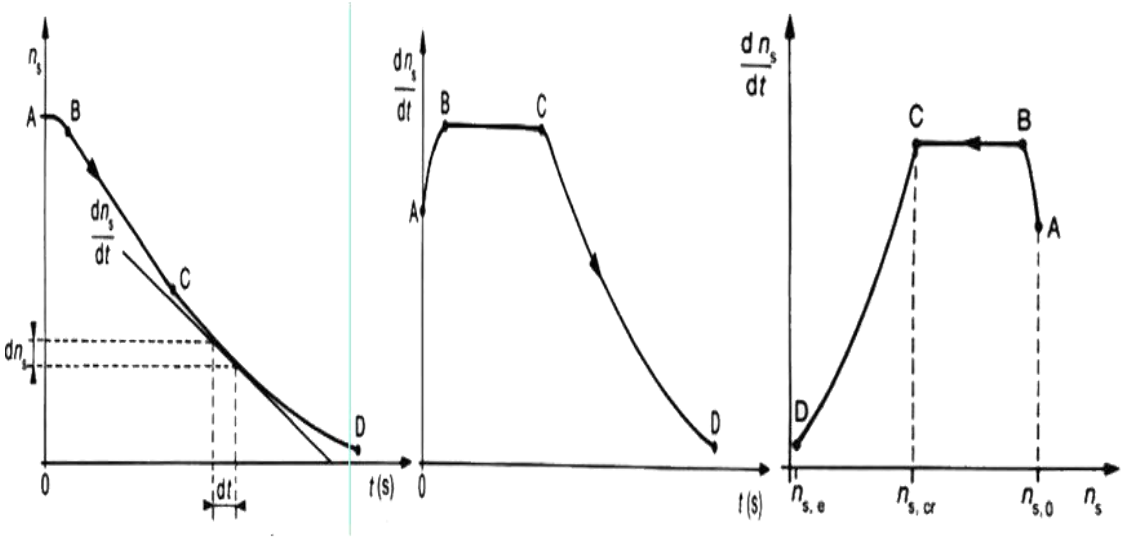
Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides. Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle, (Saravacos, 1995).

I.3.2.2 Description physique du séchage

Les caractéristiques du séchage d'un produit ont une meilleure description lorsqu'elles sont représentées par des courbes. L'une des plus intéressantes et indispensable représentation est le taux d'humidité du produit (n_s *ou* M_R*) en* fonction du temps *t* donnée sur la (figure I.7.a), ou encore la vitesse du séchage dn_s/dt en fonction du temps *t* donnée sur la (figure I.7.b). Ces

courbes de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent).

Krisher a proposé un autre mode de représentation ; c'est la vitesse de séchage dn_s/dt en fonction du taux d'humidité *ns* représentée sur la (figure I.7.c).



a b c

Figure I.7 : Description physique du séchage.

Ces trois types de représentation, mettent en évidence l'existence de plusieurs phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables, (Charreau and Cavaille, 1991).

Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

AB : La phase transitoire de mise en température du produit à sécher.

BC : La phase à vitesse de séchage constante.

CD : La phase à vitesse de séchage décroissante.

C : Le point critique du séchage.

I.3.3 Types de séchage

I.3.3.1 Séchage naturel

Le séchage naturel effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Il est encore utilisé pour des matériaux dont le séchage est aisé comme les briques, mais présente des insuffisances et des inconvénients :

- L'exposition des produits à des conditions climatiques défavorables et irrégulières.
- Une longue durée de séchage.
- L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis.
- L'attaque par les champignons et les insectes (cas du bois).

Toutes ces raisons ont conduit les professionnels à s'orienter vers le séchage artificiel.

I.3.3.1.1 Séchoirs solaires

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

Le séchage nécessite de l'énergie et de la chaleur dépendant de la teneur en humidité de l'air, du système de séchage utilisé, de la température de séchage et des spécificités du produit concerné (épaisseur, superficie, et résistance à l'air) et de l'humidité contenu dans l'élément à sécher. Le fonctionnement du séchoir dépendra directement de la quantité d'irradiation et de l'humidité du lieu d'utilisation, (Benkhelfellah et al., 2005).

- **Le séchoir solaire direct :** Le séchage solaire direct utilise les rayons directs du soleil pour sécher les aliments. Il est simple à réaliser.



Figure I.8 : Séchoir solaire direct

1 : Trous d'aération (pour qu'il n'y ait pas de condensation)

2 : plaque de verre ou de plastique transparent.

- **Le séchoir solaire indirect** Les séchoirs solaires indirect constituent des systèmes plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment (Couleur, Aspect et Valeur nutritive), (Seghier and Rouas, 2016).



Figure I.9 : Séchoir solaire indirect

I.3.3.2 Séchage artificiel (ou le séchage forcé)

Le séchage forcé permet, dans une certaine mesure de pallier les inconvénients du séchage naturel, il permet de réduire considérablement la durée du séchage et d'atteindre l'humidité souhaitée des matériaux. Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont :

- Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- Le séchage à la vapeur surchauffée.
- Le séchage par atomisation centrifuge.
- Le séchage à bande.
- Le séchage par pompe à chaleur.
- Le séchage par chambre chaude.
- Le séchage sous vide.
- Le séchage à lit fluidisé.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage des poudres pharmaceutiques. Ces phénomènes sont sous la dépendance des caractéristiques du gaz (air ou vapeur surchauffée) environnant à savoir :

- Sa température.
- Son humidité relative s'il s'agit de l'air.
- Sa vitesse.
- Sa pression.

I.3.4 Technologique de séchage forcé

I.3.4.1 Sécheur à tambour

Sécheur tambour convient surtout pour le séchage des solides en grains et le séchage de certaines suspensions.

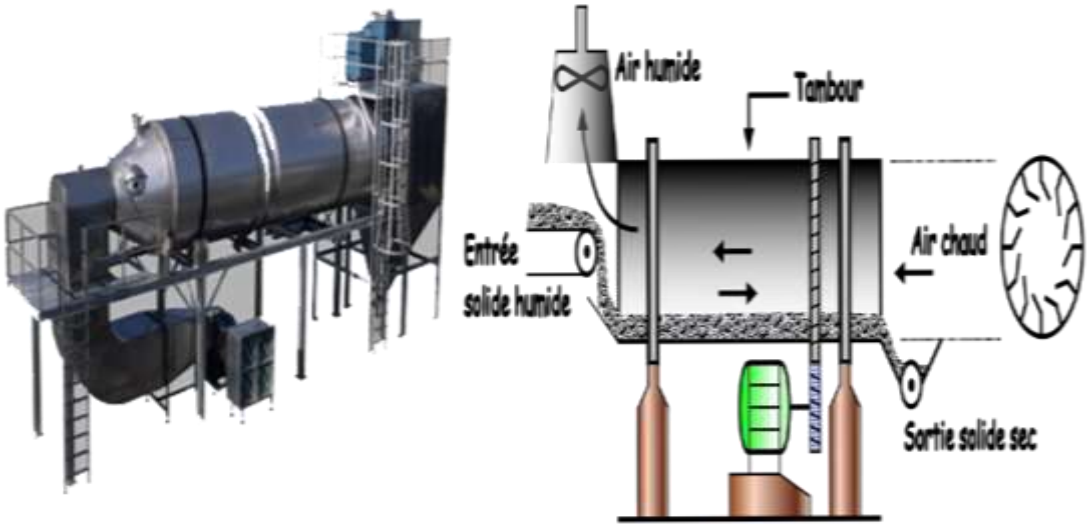


Figure I.10 : Sécheur à Tambour**,** (“Azprocede,” 2007).

I.3.4.2 Sécheur à compartiments

Le sécheur à compartiments est utilisé particulièrement pour les produits pâteux, granuleux ou encore les gâteaux de filtration.



Figure I.11 : Sécheur à compartiments**,** (“Seed Processing,” 2017).

I.3.4.3 Sécheurs à cylindres

Sécheur à cylindrique servant au séchage de matières peuvent être disposées en une couche mince, d'épaisseur régulière (fine pellicule ou matières en ruban).

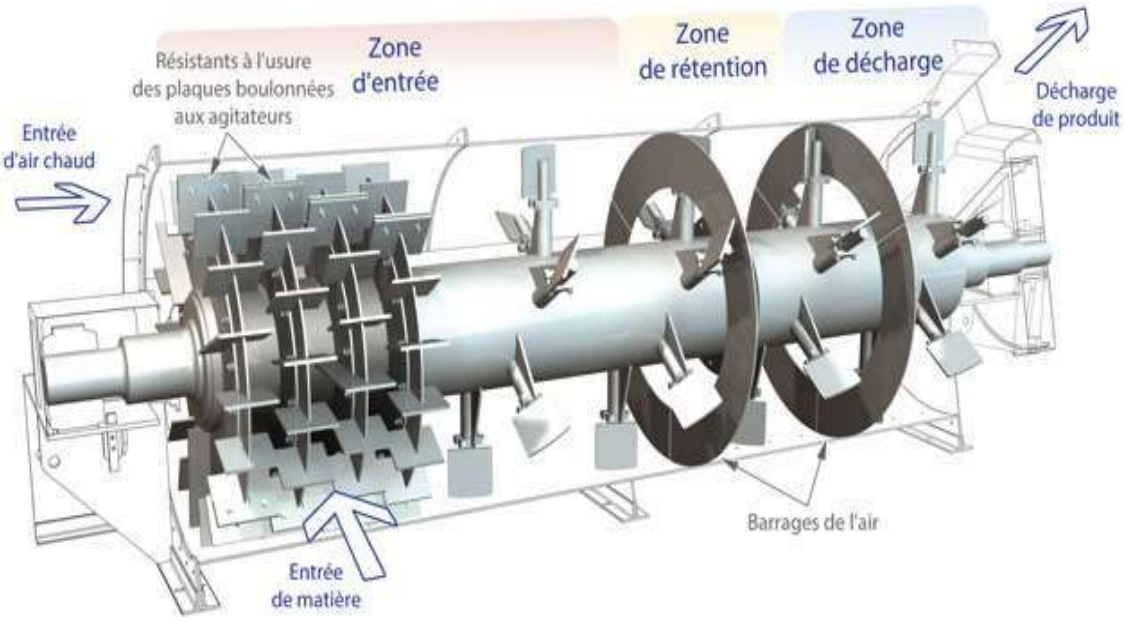


Figure I.12 : Sécheur à cylindrique**,** (Atritor, 2017)**.**

I.3.4.4 Sécheur hélicoïdal

Sécheur hélicoïdal particulièrement bien à la déshydratation, au réchauffement et au refroidissement en continu de produits pulvérulents ou granulés, susceptibles d'être convoyés pneumatiquement, tels que : farines, amidons, dextrine, poudre de coffrage.



Figure I.13 : Sécheur hélicoïdal, (AVA, 2016).

I.3.4.5 Sécheur rotatif sous vide partiel

Un procédé de séchage sous vide pour le séchage de produits pharmaceutiques, chimiques et pour certains types de boues.

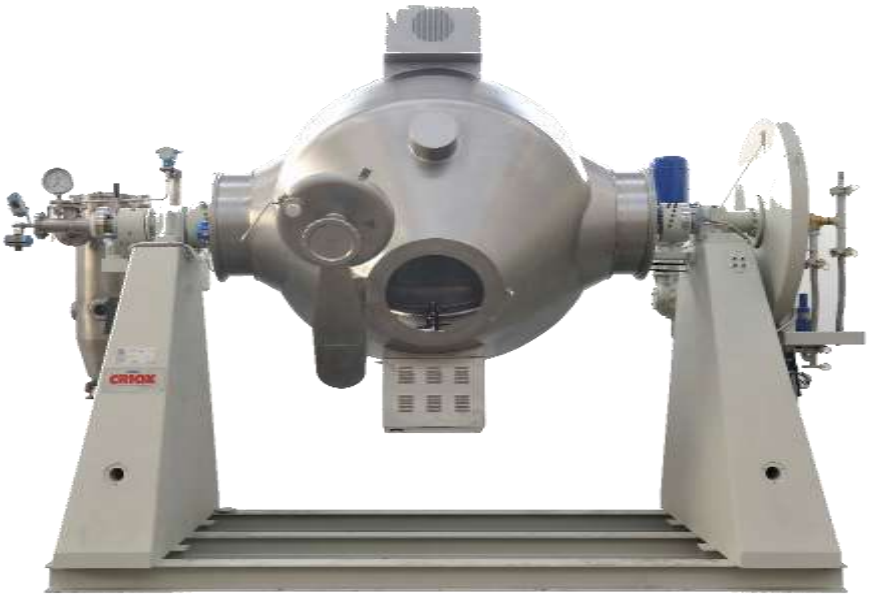


Figure I.14 : Sécheur rotatif sous vide , (“Medibalt,” 2017).

I.3.4.6 Sécheur à air chaud

Le sécheur à air chaud est adapté pour le séchage de déshydratation des matières premières dans les domaines (pharmaceutiques, chimiques, alimentaires et agricoles subsidiaires…).

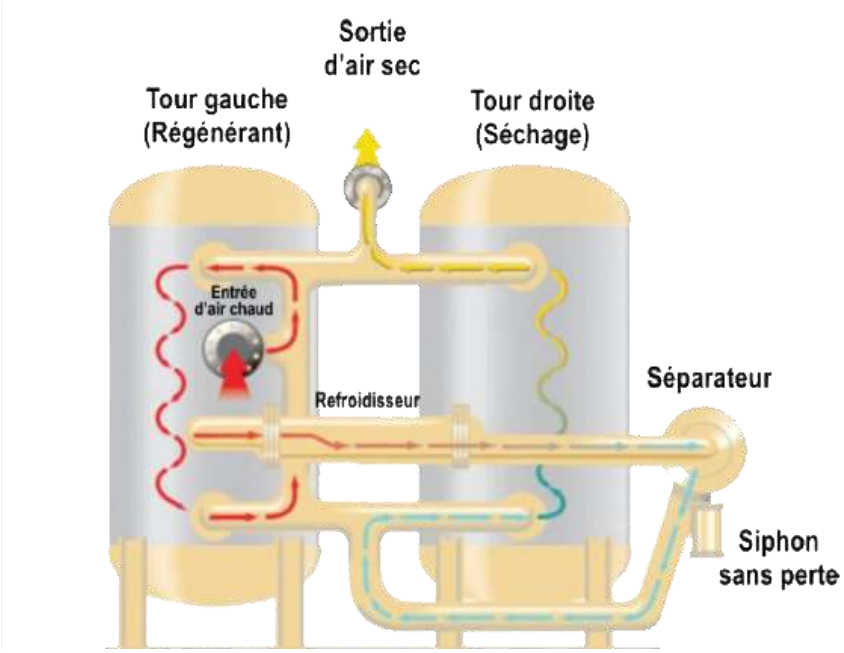


Figure I.15 : Sécheur à air chaud**,** (Karaouani, 2013)**.**

I.3.4.7 Sécheur à bande

Le sécheur à bande est très populaire pour le séchage en continu. Il est largement utilisé dans l'industrie (chimique, alimentaire, pharmaceutique, des matériaux de construction, électronique...).

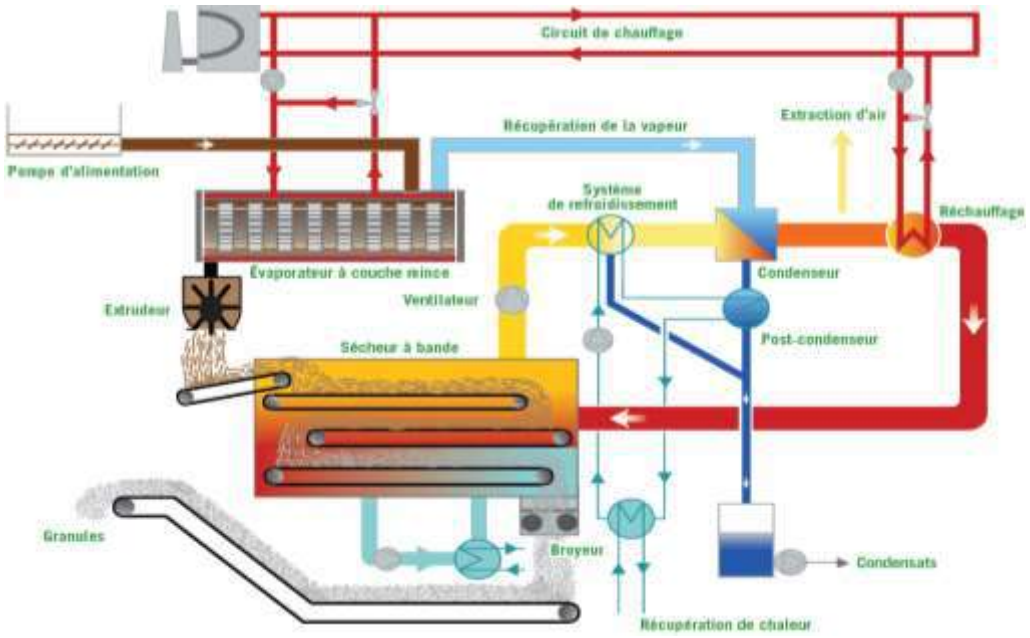


Figure I.16 Sécheur à bande, (“Degremont,” 2017)**.**

I.3.4.8 Généralités sur le séchage par microondes

Plusieurs méthodes de séchage existent, entre autres le séchage par microondes qui est efficace en énergie et en temps et peut, dans certains cas, améliorer la préservation de la qualité du produit (Li et al., 2010).

I.3.4.8.a Définition des micro-ondes

Les micro-ondes ou hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques non ionisantes, composées d’un champ électrique et d’un champ magnétique. Les fréquences des micro-ondes se situent dans le domaine des fréquences allant de 300 MHz à 300 GHz ce qui correspond à une longueur d’onde de 1 millimètre à 1 mètre. La fréquence la plus utilisée est 2450 MHz correspondant à la fréquence de la majorité des magnétrons des fours micro-ondes de cuisine ayant une puissance de 600 à 1000 Watts et une longueur d’onde dans l’air de 12,2 cm.

Les ondes produites sont dirigées vers l’agitateur d’onde et pénètrent dans l’enceinte métallique où se trouve l’aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire d’être exposé aux ondes qui pénètrent l’aliment pour atteindre les molécules d’eau (Mathavi et al., 2013).



Figure I.17 Schéma d'une micro-onde.

I.3.4.8.a Mécanisme de séchage par microonde

I.3.4.8.a.1 Principe

Le phénomène fondamental responsable du chauffage microondes (appelé aussi chauffage par hystérésis diélectrique) est la dégradation par dissipation d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique. Un matériau diélectrique est un isolant donc un mauvais conducteur d'électricité. Il s'échauffe du fait de la polarisation et de la rotation de ses dipôles (figure I 18) puis de leur relaxation lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques alternatifs.

Le dégagement de chaleur résultant diffère fondamentalement du chauffage par effet Joule qui est provoqué par des frictions internes entre les électrons et les molécules. De plus, contrairement au chauffage classique, il a lieu dans le volume, d'où son appellation de « chauffage volumique » (Singh and Heldman, 2001).



Figure I.18 Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique (Singh and Heldman, 2001).

I.3.4.8.a.2 Le four à micro-ondes

Un four à micro-ondes est constitué de trois éléments principaux (figure I.19).

- Le générateur micro-onde.
- Le guide d'onde.
- La cavité micro-onde.

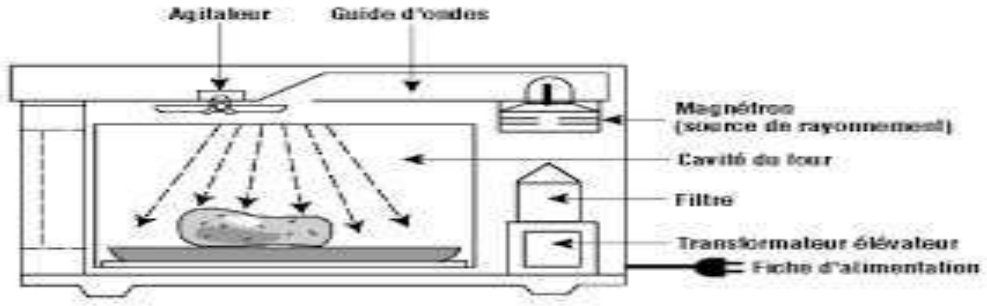


Figure I.19 Schématisation des différents composants du four à micro-ondes

I.3.4.8.b Paramètres influençant le séchage microondes

I.3.4.8.b.1 Propriétés diélectriques des aliments

Dans le traitement microondes, seules les propriétés électriques du matériel à chauffer sont importantes pour la dissipation de l'énergie électrique en chaleur.

I.3.4.8.b.2 Puissance microondes dissipée

La puissance microondes est en réalité une densité de puissance (ou puissance volumique) dissipée dans le produit. L'énergie microondes en elle-même n'est pas une énergie thermique. La chaleur provient plutôt de la conséquence de l'interaction entre l'énergie des microondes et le matériau (Copson, 1975).

I.3.4.8.c Profondeur de pénétration des microondes

L'absorption progressive de la puissance est caractérisée par la profondeur de pénétration (dp). Elle est définie comme la profondeur dans le matériau pour laquelle le transfert de l'onde a été réduit de 37% par rapport à la puissance entrante (Buffler, 1993).

I.3.4.8.d Effet du facteur de perte

Le facteur de perte ε" d'un matériau varie avec sa température, sa teneur en eau et la fréquence du champ électrique qui lui est soumis (Sosa-Morales et al., 2010).

I.3.4.9 Technologies de séchage combinées aux micro-ondes

Pour comparer les différentes techniques de séchage, quatre aspects principaux du processus peuvent être pris en considération. Il s'agit de la vitesse de déshydratation, de la qualité et les caractéristiques du produit final, des couts énergétiques et économiques du processus. Le séchage micro-onde pet être combiné au (Maskan, 2001; Ranjbaran and Zare, 2013; Scaman and Durance, 2005)

- Le séchage micro-ondes combiné à la lyophilisation.
- Le séchage en lit fluidisé combiné aux micro-ondes.

- Le séchage micro-ondes combiné à l'air chaud.
- Le séchage sous vide combiné aux micro-ondes.

I.3.4.10 Avantages des micro-ondes

Du point de vue chimique, les micro-ondes ne permettent pas d'affecter le matériel biologique, elles n'ont pas d'effet ionisant. Les micro-ondes ont une grande profondeur de pénétration ce qui entraîne une distribution de chaleur rapide et uniforme, principalement dans la partie humide du produit exposé, ce qui accélère le processus de séchage et limite la dégradation thermique. De plus, le séchage avec cette technologie présente un grand avantage en termes de cout et d'impact environnemental (Bantle et al., 2013; Yılmaz et al., 2005).

I.3.5 Le choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné est basé sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.

Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité, …), (McCabe et al., 1985).

I.6 Cinétique du séchage

En portant le taux d'humidité du produit ns (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps *t*, on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure (I.20).

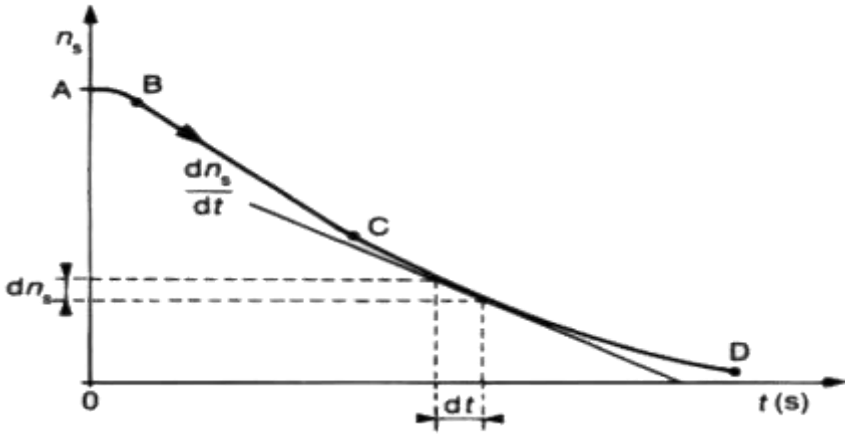


Figure I.20 Le taux d'humidité du produit (n_s) en fonction du temps, (Cavaillé and Charreau, 1995).

I.6.1 Vitesse de séchage

Simultanément en jeu une évaporation à la surface du solide et un flux interne de liquide, par diffusion ou capillarité, de l'intérieur vers la surface. Le processus de séchage comporte donc deux étapes fondamentales, à savoir :

- L'échange thermique, c'est-à-dire la transmission de la chaleur pour l'évaporation du liquide ;
- Le transfert de masse ou le transfert de liquide dans le solide et sous forme vapeur à partir de la surface du solide.

La vitesse de séchage spécifique est définie comme le rapport entre la quantité d'humidité enlevée du produit à sécher par unité de temps et de surface de séchage :

$$\frac{dw}{dt} = -m_s \frac{dX}{dt} = K_g(p_s - p_v \quad \text{(I.16)}$$

Avec

X : Le taux d'humidité du produit (en kg eau/kg matière anhydre).

K : Le coefficient global de transfert de matière qui peut être déterminé expérimentalement ou évalué par relations faisant intervenir les critères de similitude.

m_s : La masse de solide à sécher

$(p_s - p_v)$: La différence entre la pression des vapeurs saturées dans la couche d'air à la surface du produit humide et la pression partielle des vapeurs dans l'air en circulation, en millibars.

Un processus de séchage peut être illustré par différents diagrammes :

- Diagramme taux d'humidité/temps de séchage (courbe de séchage).
- Diagramme débit de séchage/taux d'humidité (courbe de la vitesse de séchage).
- Diagramme température du matériel /taux d'humidité (courbe de température).

I.6.2 Durée de séchage

Étant donné la forme de la courbe de séchage, le temps de séchage doit être déterminé séparément pour les deux phases de séchage.

La durée de séchage pendant la phase à vitesse constante (première période) peut être calculée, pour un sécheur fonctionnant en continu, en effectuant un bilan sur un élément de l'appareil :

$$t_1 = \frac{m_s}{Sk_{ev}}(x_i - x_{cf}) \quad \text{(I.17)}$$

Avec

m_s : La masse du produit à sécher.

S : La surface soumise au séchage. $S = am_s / \rho_{app}$ (I.18)

k_{ev} : La vitesse d'évaporation (kg /m2·s)

La vitesse d'évaporation ou le coefficient d'évaporation de l'eau sur la surface humide du produit (dans la première période de séchage) *kev* (en kg /m2·s) peut se calculer avec la formule :

$$k_{ev} = 0.0016\, w_a^{0.8}\, \Delta P \qquad \text{(I.19)}$$

w_a : Est la vitesse de l'air à la surface du produit à sécher,

ΔP : La différence entre la pression des vapeurs saturées dans la couche d'air à la surface du produit humide et la pression partielle des vapeurs dans l'air en circulation (en millibar).

$$t_2 = \left(\frac{d_p^2}{4\pi^2\, D_{ef}}\right) \ln M_R \qquad \text{(I.20)}$$

La durée de séchage totale est évidemment égale à la somme des temps de séchage t_1 et t_2 (quand la phase à vitesse constante existe), (Koller, 2009).

I.B Conclusion

Parmi toutes les méthodes de conservation des aliments, le séchage reste une opération très avantageuse en raison de la durée de conservation longue, de la facilité de stockage à température ambiante et de la réduction de masse (transport).

Dans ce travail, nous étudierons la cinétique de séchage, par deux mode du séchage : le séchage convection (l'étuve ventile) et le séchage innovant par le micro onde, de notre produit (orange et citron), et ainsi nous étudierons les effets de la puissance de micro onde/température de étuve ventile et l'épaisseur des tranches sur cette cinétique. Le modèle étudié est régi des lois du transfert de chaleur et de masse.

Chapitre II

Généralités sur les plans d'expérience et SVM

II.A Introduction

La modélisation numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique. La notion de modèle en mathématiques se présente sous un double aspect : d'une part, les mathématiques permettent de modéliser, c'est-à-dire de représenter, toutes sortes de situations, d'objets et de structures du monde réel, l'étude mathématique ou les simulations informatiques de ces représentations nous informant lorsque les représentations sont bonnes sur le monde réel d'autre part, une notion précise et formelle de modèle est définie et étudiée en logique mathématique par la théorie des modèles, ce qui établit un lien précis entre objets syntaxiques (les formules) et structures mathématiques, puis produit sous la forme de théorèmes toutes sortes d'informations sur la nature de ce lien, le tout constituant une théorie abstraite de l'activité de modélisation au sens précédent.

II.1 Généralité sur le plan d'expérience

II.1.1 Définition

La méthode des plans d'expériences (DOE) cherche à déterminer une relation entre 2 types de grandeurs :

- La réponse, qui correspond à la grandeur physique étudiée.
- Les facteurs, qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par, l'expérimentateur et sensées influer sur les variations de la réponse.

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y, porte le nom de réponse, les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs *x,* on parle donc des facteurs qui influent sur une réponse, les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

II.1.2 Objectif de plan d'expérience

Ceci est une question courante dans les entreprises. En recherche et développement, souvent la moitié des ressources est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation. Avec l'augmentation rapide du coût des expériences, il est essentiel que l'optimisation puisse être faite avec le moins possible d'expériences. Ceci est une des raisons importantes pour lesquelles il faut utiliser les plans d'expériences.

Des exemples typiques :

- Le développement de nouveaux produits et procédés
- L'optimisation de la qualité et de la performance d'un produit existant

- L'optimisation de procédés industriels dans les domaines suivants (chimie, polymères, matériaux, médicaments et produits pharmaceutiques, aliments et boissons, cosmétique, peintures).

II.1.3 Espace expérimental

Pour présenter l'espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques. Il est ensuite facile d'étendre les notions introduites à des espaces multidimensionnels. Un facteur continu peut être représenté par un axe gradué et orienté. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure II.1).

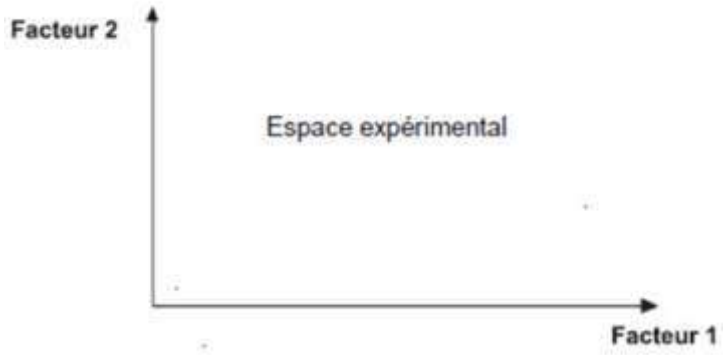


Figure II.1 : L'espace expérimental de l'étude de deux facteurs pour un plan à deux dimensions.

II.1.4 Domaine d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut (figure II.2).L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. Les variables centrées réduites idéique zéro [-1 0 1].

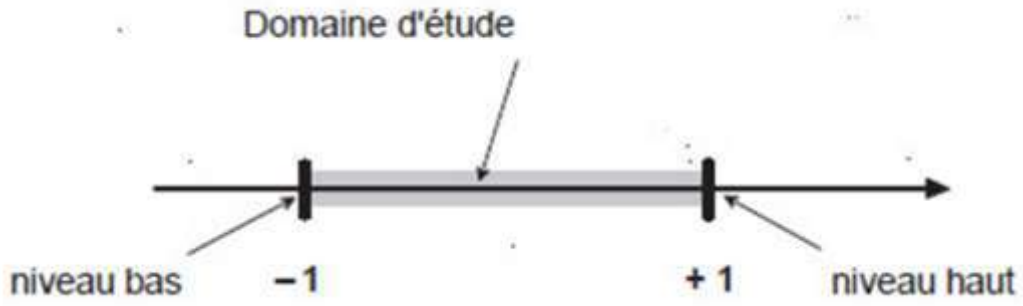


Figure II.2 : Le domaine de variation des facteurs**.**

II.1.5 Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude (figure II.3). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs, (Goupy & Creighton, 2006).

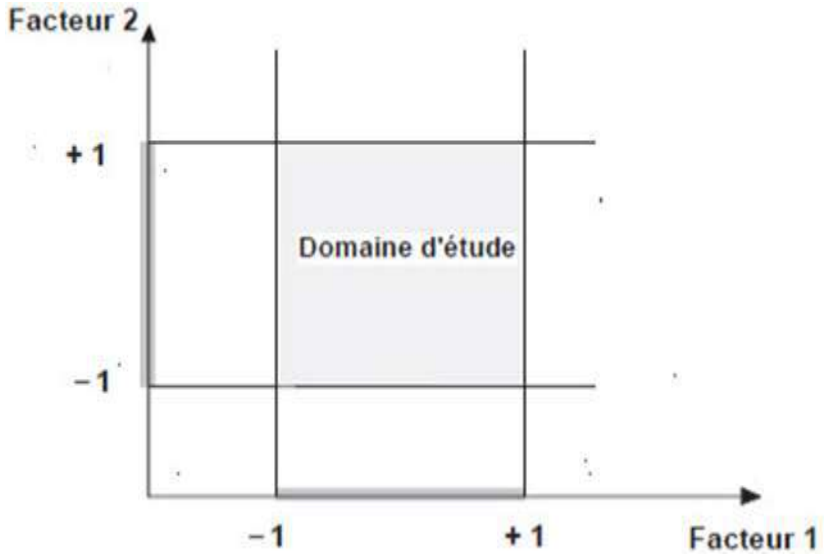


Figure II.3 : Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs sans contraintes.

Il peut y avoir des contraintes sur le domaine d'étude La figure (II.4) illustre une réduction possible du domaine d'étude initial. Une zone du domaine d'étude initial échappe aux expériences.

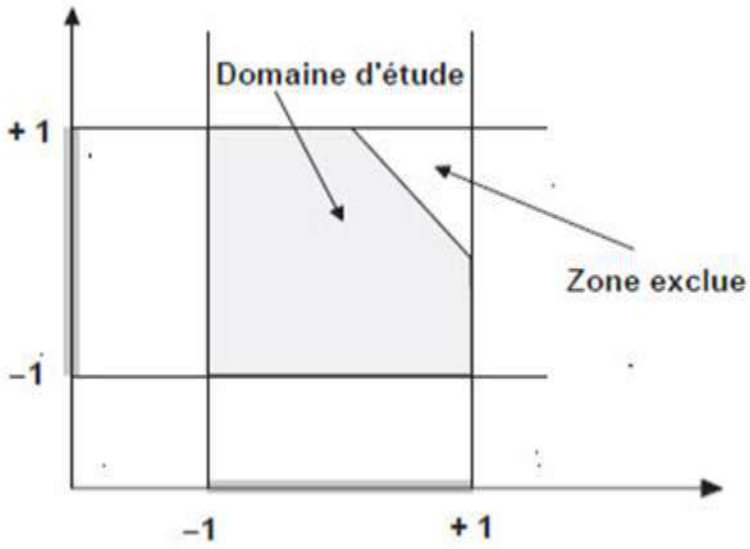


Figure II.4 : Le domaine d'étude sous contraintes est représenté par la partie grisée.

II.1.5.1 Méthodologie des plans sans contraintes

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à réaliser le minimum d'expériences tout en réduisant l'influence de l'erreur expérimentale sur les modélisations mathématiques qui serviront à prendre des décisions. On atteint ce but en considérant les propriétés mathématiques et statistiques qui relient la réponse aux facteurs. Lorsqu'il n'y a pas de contraintes sur le domaine d'étude, il existe des plans classiques qui possèdent d'excellentes qualités statistiques et qui permettent de modéliser les réponses dans les meilleures conditions (figure II.5).

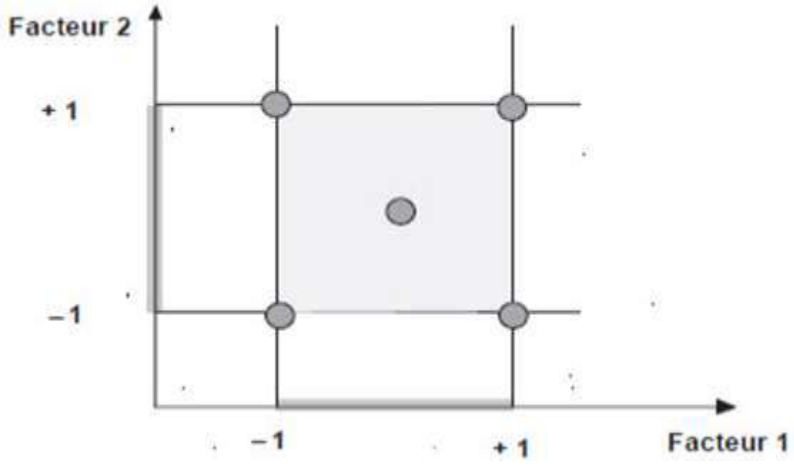


Figure II.5 : Exemple de disposition des points expérimentaux dans un domaine sans contraintes.

II.1.5.2 Surfaces de réponse

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse (figure II.6), (Goupy & Creighton, 2006).

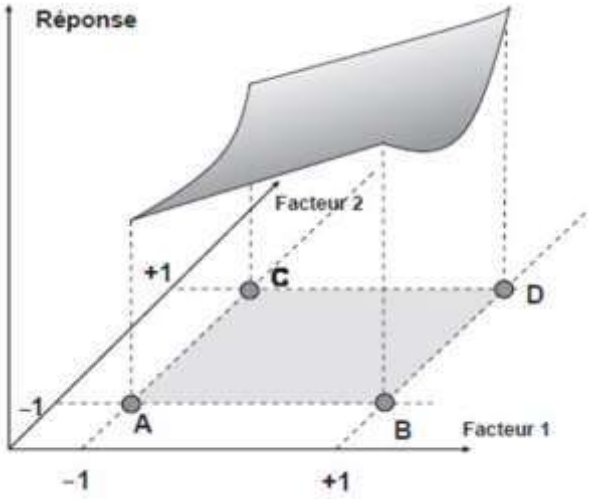


Figure II.6 : L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.

II.1.6 Les méthodes des plans d'expériences

Les méthodes de plans d'expérience sont utilisées pour trois types d'investigations :

- **Les plans de criblage ou screening** sont utilisés au début d'une investigation. Ici, l'objectif premier est de réduire l'ensemble initial des facteurs qui peuvent affecter le résultat à un petit ensemble de facteurs qui ensemble influencent le plus le résultat.
- **Les plans en surface de réponse (MSR)** sont utilisés ensuite dans l'investigation pour l'optimisation finale, et lorsque l'on veut développer un modèle reliant les facteurs dominants aux réponses permettant de quantifier les résultats (performance, rendement, qualité).
- **Les plans spéciaux** sont nécessaires pour les mélanges. Ce type de problème est courant en chimie, dans les industries alimentaires, en cosmétique et en pharmacie. Ils sont nécessaires car les facteurs sont exprimés en pourcentages dont la somme fait 100%. Cela introduit une contrainte sur le plan et cela doit être résolu par des outils et des modèles spéciaux.

La construction d'un plan d'expériences consiste à extraire du domaine expérimental, un nombre suffisant N de combinaisons particulières afin d'estimer, avec une incertitude à la fois minimale mais aussi homogène, les p inconnues du modèle (additif ou polynomial) tout en respectant au mieux les contraintes techniques et économiques de l'étude, (Rabier, 2007).

II.1.7 Les types de plans d'expériences

Nous allons maintenant appliquer les notions et les propriétés que nous venons de décrire aux plans d'expériences les plus classiques. Il y a les plans suivants :

- Plans factoriels complets.
- Plans factoriels fractionnaires.
- Plans à plusieurs niveaux.
- Plans pour surfaces de réponse.
- Plans de mélanges.

II.1.7.1 Plans factoriels complets

Une première catégorie de plans d'expériences est destinée à fournir une information la plus complète possible sur des systèmes présentant relativement peu de facteurs. Ces plans consistent à tester toutes les combinaisons possibles, en faisant varier tous les facteurs à tous leurs niveaux de manière exhaustive, d'où leur nom de plans factoriels complets ou plus simplement plans complets.

Pour ce faire, *Yates et Hunter* ont proposé une technique simple pour le cas où chaque facteur n'a que deux niveaux. Elle consiste à numéroter les facteurs et à faire varier successivement leurs niveaux de la façon suivante :

Au premier essai, tous les facteurs sont au niveau bas, on change le niveau du premier facteur à chaque essai..., celui du deuxième facteur tous les 2 essais ..., et plus généralement, celui du Kème facteur tous les 2k-1 essais. La méthode peut s'adapter au cas où les facteurs ont plus de deux niveaux, (Gendre, Savary, & Soulier, 2009).

II.1.7.1.1 Comment fonctionne un plan d'expériences ?

Les plans d'expériences (DOE) constituent la meilleure approche pour organiser un travail expérimental. Ils permettent de sélectionner un ensemble varié et représentatif d'expériences dans lequel tous les facteurs sont indépendants les uns des autres même si l'expérimentateur les fait varier façon simultanée. Le résultat est un modèle prédictif indiquant les importances des facteurs et de leurs interactions. Ce modèle peut être résumé sous la forme de graphiques de contours mettant en évidence la combinaison optimale des niveaux des facteurs. Les plans d'expériences sont utilisés pour trois objectifs, (Umetrics, 2014):

- **Criblage :** quels sont les facteurs les plus influents et dans quelles plages
- **Optimisation :** comment trouver le réglage optimal prenant en compte de multiples réponses
- **Test de robustesse :** une fois le point optimal trouvé, peut-on garantir la robustesse au voisinage de ce point ou faut-il modifier les spécifications pour obtenir cette robustesse

II.1.7.2 Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de *Taylor-Mac Laurin*. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \cdots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\ldots\ldots z} x_i x_j \ldots\ldots x_z \qquad \text{(II.1)}$$

Avec

y : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

x_i : représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai.

Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).

a_0, a_i, a_{ij} , a_{III} : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences, ce modèle est appelé modèle postulé ou modèle a priori, (Goupy & Creighton, 2006).

II.1.7.3 Le modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit. Le premier complément est le manque d'ajustement. Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (lack of fit en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales. Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée e. Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \cdots . + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\ldots\ldots z} x_i x_j \ldots \ldots x_z + e \qquad \text{(II.2)}$$

II.1.7.4 Analyse statistique

Cette étape de l'analyse statistique aboutit à la construction du tableau d'analyse de régression et à la détermination de la qualité descriptive du modèle (Eriksson, Johansson, Kettaneh-Wold, Wikström, & Wold, 2000).

- Le Q^2 estime la capacité de prédiction du modèle, à savoir, sa capacité à généraliser à de nouvelles données invisibles. Le Q2 est défini comme :

$$Q^2 = 1 + \frac{PRESS}{SS_{tot}} \qquad \text{(II.13)}$$

$$\text{Où} \qquad SS_{tot} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \qquad \text{(II.14)}$$

SS_{tot} : c'est la somme totale des carrés (total sum of squares) des échantillons de formation autour de la moyenne (proportionnelle à la variance de la réponse)

$\bar{y}$: c'est la réponse moyenne

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i \qquad \text{(II.15)}$$

- Lorsque le modèle de régression est un modèle MLR, la « *PRESS* » est calculée comme dans généralisée croisée validation

$$PRESS_{MLR} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{1 - x_i \ (X'X)^{-1} \ x'_i} \right)^2 \quad \text{(II.16)}$$

Lorsque le modèle est un modèle de régression PLS, la presse est calculée dans une croisée procédure de validation.

$$PRESS_{PLS} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_I^{CV})^2 \quad \text{(II.17)}$$

$\hat{y}_I^{CV}$: Est le prédites -out gauche réponse des valeurs de la validation croisée procédure.

- Les modèles de régression sont également validés par la R2, Le coefficient de détermination (aussi parfois appelé le coefficient de corrélation multiple). Le R2 désigne la fraction de la réponse qui est expliquée par le modèle et est défini comme

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y})^{2\prime}} \quad \text{(II.18)}$$

- L'ajusté R2 est la fraction de la variance de la réponse expliquée par le modèle, mais ajusté pour tenir compte des degrés de liberté du modèle, c'est-à-dire

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{res}/DF_{res}}{SS_{tot}/DF_{tot}} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{DF_{res\prime}} \quad \text{(II.19)}$$

Où $DF_{tot} = n - 1$: est les degrés de liberté de la variance de la population de la variable dépendante.

DF_{res} : est les degrés de liberté de l'estimation de la variance de l'erreur de la population. Donc R^2_{adj} peut être négatif.

La valeur de $R^2_{adj} \leq R2 \leq 1$ n'augmente lorsque de nouvelles variables explicatives expliquent les données plus que ce qui peut être attribué au hasard, contrairement à la R2 ce qui augmente lorsque de nouvelles variables explicatives sont ajoutées au modèle.

Avec

y_i La réponse mesurée au point i,

$\hat{y}$ La réponse calculée par le modèle au point i de tous les échantillons,

- **Statistiques sommaires dans (Logiciel MODDE)**

Les statistiques sommaires sont présentés dans quatre paramètres (R2, Q2, validité du modèle, et reproductibilité) où 1, ou 100%, est parfait. R2 et Q2, les deux premières colonnes, devrait être proche de la taille. La différence ne devrait pas être plus de 20% dans la plupart des situations, (Umetrics, 2014).

R^2 : Montre l'ajustement du modèle, un modèle avec R^2 de 0,5 est un modèle avec assez faible importance.

Q2 : Affiche une estimation de la précision de prévision de l'avenir. Q2 doit être supérieure à 0,1 pour un modèle important et supérieur à 0,5 pour un bon modèle. Q2 est le meilleur indicateur.

Validité du modèle : Un test de problèmes modèles divers, une valeur inférieure à 0,25 pour modèle validité indique les problèmes modèles statistiquement significatifs, comme la présence de valeurs aberrantes, un incorrect modèle, ou un problème de transformation. Une faible valeur ici peut également indiquer qu'un terme, comme une interaction ou carrée est manquante. Lorsque l'erreur pure est très faible (réplique presque identique), la validité du modèle peut être faible, même si le modèle est bon et complet. Lorsque l'erreur pure est si faible que les répétitions sont considérés comme identiques par MODDE, la validité du modèle est étiquetée manquant car il ne peut être calculé. Validité du modèle pourrait être faible dans de très bons modèles (Q2> 0,9) en raison de la haute sensibilité du test ou extrêmement bonnes répliques. **Reproductibilité :** La variation des répliques par rapport à la variabilité globale, la reproductibilité doit être supérieure à 0,5.

II.2 Étude théorique sur SVM

II.2.1 Définition

Les machines à vecteur support se situent sur l'axe de développement de la recherche humaine des techniques d'apprentissage. Elles reposent sur une théorie mathématique solide à l'inverse des méthodes de réseaux de neurones. Elles ont été développées au sens inverse du développement des réseaux de neurones : ces derniers ont suivi un chemin heuristique de l'application et l'expérimentation vers la théorie ; alors que les SVMs sont venues de la théorie du son vers l'application. Les SVMs sont dans leur origine utilisées pour la classification binaire et la régression. Aujourd'hui, elles sont utilisées dans différents domaines de recherche et d'ingénierie tel que le diagnostic médical, le marketing, la biologie…etc.(DJEFFAL, 2012).

Les SVM peuvent également appliqués aux problèmes de régression par l'introduction d'une alternative fonction de perte (Smola, 1996).

II.2.2 Technique de SVM

Cette technique est une méthode de classification à deux classes qui tente de séparer les exemples positifs des exemples négatifs dans l'ensemble des exemples. La méthode cherche alors l'hyperplan qui sépare les exemples positifs des exemples négatifs, en garantissant que la marge entre le plus proche des positifs et des négatifs soit maximale. Cela garantit une généralisation du principe car de nouveaux exemples pourront ne pas être trop similaires à

ceux utilisés pour trouver l'hyperplan mais être situés d'un côté ou l'autre de la frontière. L'intérêt de cette méthode est la sélection de vecteurs supports qui représentent les vecteurs discriminant grâce auxquels est déterminé l'hyperplan. Les exemples utilisés lors de la recherche de l'hyperplan ne sont alors plus utiles et seuls ces vecteurs supports sont utilisés pour classer un nouveau cas, ce qui peut être considéré comme un avantage pour cette méthode.

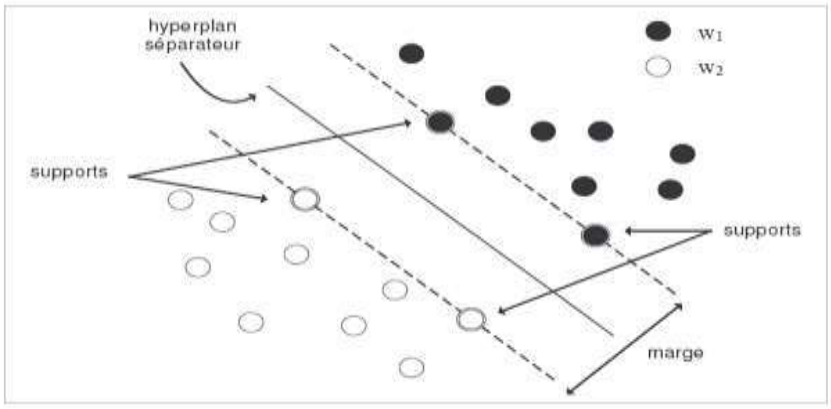


Figure II.7 Séparation souple par SVM

II.2.3 SVM régression

Les SVM peuvent également être mis en œuvre en situation de régression, c'est-à-dire pour l'approximation de fonctions quand Y est quantitative. Dans le cas non linéaire, le principe consiste à rechercher une estimation de la fonction par sa décomposition sur une base fonctionnelle. Avec l'introduction de la fonction de perte ε-insensible, le SVM a été étendu à résoudre l'estimation de régression non linéaire. Considérant le problème de l'approximation de l'ensemble de données $G = \{(x_i, d_i\}_{i=1}^{n}$;x_i est le vecteur d'entrée,d_i est la valeur désirée et n est le nombre total de modèles de données). La fonction de régression est approximée, dans un espace de caractéristiques F, par la fonction suivante :

$$f(x) = w\varphi(x_i) + b \tag{II.20}$$

Où est un vecteur dans F et $\varphi(x_i)$ mappe l'entrée x sur un vecteur dans F. Les coefficients a et b sont estimés en minimisant

$$R(C) = C\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_\varepsilon\big(d_i, f(x_i)\big) + \frac{1}{2}\|w^2\| \tag{II.21}$$

$$L_\varepsilon\big(d_i, f(x)\big) = \begin{cases} |d - f(x)| \geq \varepsilon \\ 0\ autrement \end{cases} \tag{II.22}$$

Dans l'équation (III.B.2), R est la fonction de risque régularisée et le premier terme $C\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_\varepsilon(d_i, f(x_i))$ est l'erreur empirique. Ils sont mesurés par la fonction de perte ε-insensible (L_ε) donné par l'équation (III.B.3). Le deuxième terme $\frac{1}{2}\|w^2\|$est le terme de régularisation.ε est appelé la taille du tube ; il est équivalent à la précision d'approximation

placée sur les points de données d'entraînement, de sorte que si la valeur prédite est dans le tube, la perte est nulle, tandis que si le point prévu est à l'extérieur du tube, la perte est l'amplitude de la différence entre la valeur prédite et le rayon ε du tube. C est le paramètre de pénalité; il détermine l'arbitrage entre le risque empirique et le terme de régularisation. Les deux C et ε sont des paramètres prescrits par l'utilisateur. Introduction de Multiplicateurs de Lagrange (a_i, a_i^*) et l'exploitation des contraintes d'optimalité conduisent à la fonction de décision donnée par

$$f(x, a_i, a_i^*) = \sum(a_i - a_i^*)K(x, x_i) + b \qquad \text{(II.23)}$$

Basé sur les conditions de programmation quadratique de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) (Boot, 1964).

III.2.4 SVM a noyaux (Kernel)

Les limite de l'approche a marge souple s'expose avec la donnée non linéairement séparable n'a tout point de l'espace, la motivation derrière l'utilisation des fonction Kernel est la possibilité de projeter les valeurs des données vers un autre espace d'une dimension supérieur ou la séparation linéaire est possible, ce qui même à utiliser ces approches pour classifier.

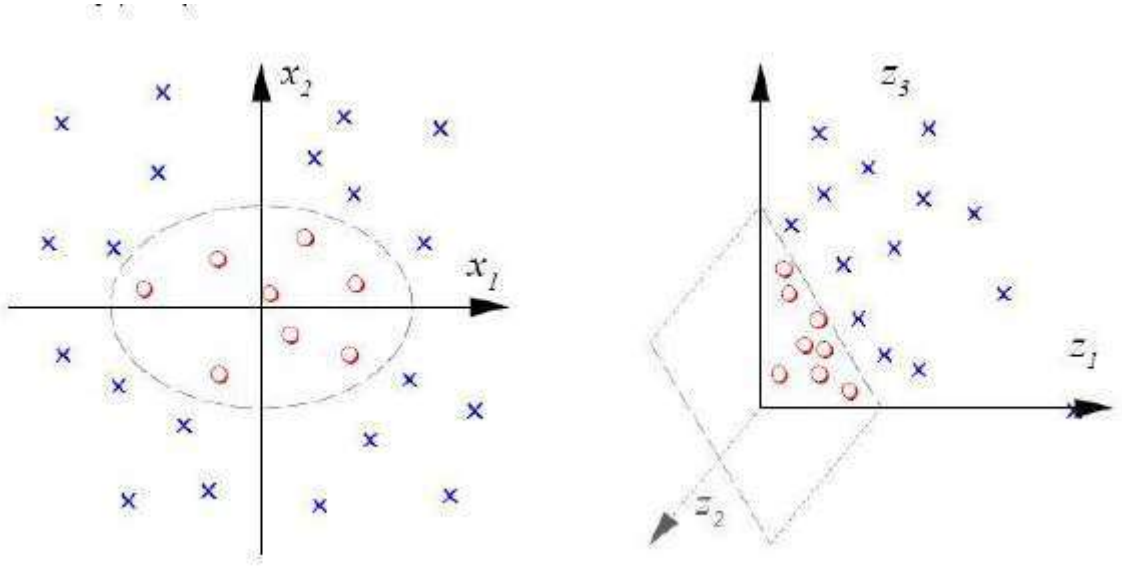


Figure III.8. Points non linéairement séparables et leur projection vers un autre espace d'une dimension supérieur.

La projection sur un espace de dimension supérieur permet d'effectuer des opérations linéaires équivalente à des opérations non linéaires sur l'espace des entrées, cette projection est effectuée par la fonction de projection ϕ définis comme :

$$\phi: E \rightarrow F$$
$$x \rightarrow \phi(X)$$

D'où la fonction objective du problème d'optimisation sera reformulée comme :

$$Max\ \sum_{i=1}^{m} a_i - \frac{1}{2}\sum_{j,i=1}^{m} a_i a_j y_i y_j\ \phi(x_i).\phi(x_j) \quad \text{(II.24)}$$

Le produit scalaire imposé par la projection est plus complexe et très coûteux en calcul due à la grande dimension de $\boldsymbol{\phi}$, d'autres fonctions dites fonction Kernel peuvent réaliser ce calcul sans faire de projection explicite vers d'autres espaces, l'utilisation de fonction Kernel pour éviter la projection est connu sous le nom de « Kernel Trick ». (Schölkopf, Smola, & Bach, 2002).

Une fonction Kernel (noyau) est définie comme :

$$X * X \rightarrow R$$

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i).\phi(x_j) \quad \text{(II.25)}$$

Pour remplacer la fonction de projection une fonction Kernel doit verifier le théoréme de Mercer qui énonce qu'une fonction Kernel représente le produit scalaire si elle est définie positive.

Des exemples des fonctions Kernel :

- Noyau Polynomial de dégrée d :

$$K(x, y) = (x.y + 1)^d \quad \text{(II.26)}$$

- Noyau *Gaussian* avec longueur σ :

$$k(x, y) = exp(\frac{-||x-y||^2}{2\sigma^2}) \quad \text{(II.27)}$$

- Noyau Sigmoïd avec paramètres k et θ :

$$k(x, y) = \tanh(kx.y + \theta) \quad \text{(II.28)}$$

On général le choix d'un Kernel correspond à :

- Choisir une mesure de similarité pour les données.
- Choisir une représentation linéaire aux données.
- Choisir un espace de fonction pour l'apprentissage (Schölkopf et al., 2002).

Avec l'aide du Kernel trick le problème d'optimisation est formulé comme :

$$Max\ \sum_{i=1}^{m} a_i - \frac{1}{2}\sum_{j,i=1}^{m} a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad \text{(II.29)}$$

$$\sum_{i=1}^{m} a_i y_i = 0$$

$$0 \leq a_i \leq C \quad i = 1 \ldots . m$$

Dans ce cas le w sera :

$$w = \sum_{j=1}^{s} a_j y_j\ \phi(x_j) \quad \text{(II.30)}$$

La fonction de decision pour le test :

$$f(z) = \sum_{i=1}^{s} a_i y_i K(Z, X_i) + b \quad \text{(II.31)}$$

II.2.5 Évaluation

La qualité d'un modèle de décision obtenu par la méthode SVM dépend de plusieurs paramètres, à savoir le paramètre de pénalisation sur les multiplicateurs de Lagrange C, le noyau utilisé et ses paramètres (dans le cas du noyau Gassien) et les exemples utilisés pour l'entrainement (les vecteurs supports).

Le choix des valeurs de ces paramètres se fait actuellement à travers plusieurs essais et évaluation pour atteindre des performances satisfaisantes du modèle. Les paramètres (C,σ ,ε) 30 optimaux pour un modèle donné sont les paramètres qui lui permettent de donner une précision de 100%. Cette situation serait idéale si l'ensemble des exemples représentait parfaitement l'ensemble de tous les exemples possibles. Le modèle appris peut donner une très grande précision face aux exemples d'entrainement, mais se comporte très mal avec les nouveaux exemples. Cela représente un phénomène très connu en apprentissage qui est le sur-apprentissage ou l'apprentissage par coeur. Le sur-apprentissage donne, généralement, des modèles à faible capacité de généralisation, et par conséquent la mesure de précision n'est pas suffisante pour qualifier les performances d'un modèle. Les méthodes d'évaluation permettent de tirer des conclusions sur le comportement d'un modèle face à tout l'espace d'exemples en limitant l'influence des exemples d'entrainement et du bruit qui peut y exister (erreurs d'étiquetage, erreurs d'acquisition, ...) et leur ordre sur le modèle appris.

II.2.6 Méthode HoldOut

La méthode HoldOut suppose que les exemples disponibles couvrent suffisamment tout l'espace d'exemples. Elle consiste à diviser l'ensemble des données en deux parties, la première partie est utilisée pour l'entrainement et la deuxième pour les tests. Le test du modèle obtenu sur la partie de test permet de donner une idée sur son comportement en dehors des exemples d'entrainement et éviter le phénomène de sur-apprentissage. Le modèle qui maximise la précision pour tout l'espace d'exemple est donc celui qui la maximise pour la partie de test du fait que cette partie représente la majorité de l'espace. Une question importante qui se pose pour cette méthode est comment choisir les deux parties, puisque ce choix a une grande influence sur la qualité du modèle. Le pire est de mettre les exemples positifs dans une partie et les exemples négatifs dans l'autre. La méthode qui suit répond à cette question.

II.B Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons donné des informations sur quelques méthodes de modélisations d'une façon générale.

Premièrement nous avons définit le plan d'expériences, par une suite d'essais rigoureusement organisés, afin de déterminer avec un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence respective des différents paramètres de conception ou de fabrication d'un produit, afin d'en optimiser les performances et le coût. Et en fin les SVM qui sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistique.

Chapitre III

Contribution A :

Application de la méthode de plan des expériences

III.A. Application de la méthode de plan d'expérience

Afin de valoriser les produits végétaux, une méthodologie expérimentale pour sécher une matière végétale (orange et citron) a été mise en place. D'abord on doit procéder à la recherche des différents facteurs qui jouent un rôle indispensable lors de la procédure de séchage, et qui sont contrôlés par des logiciels informatiques MODDE® (v 11.0), afin de déterminer les nivaux (bas, moyen et haut) de chaque facteur. Puis on va passer au choix du plan d'expérience adéquat à l'étude.

La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

III.A.1. Les étapes du processus d'expérimentation

La méthodologie de surface de réponse **(**MSR) est une combinaison de plan d'expérience statistique, de modélisation empirique et de techniques d'optimisation mathématique employée pour améliorer la performance des processus et des produits **(Myers et Montgomery, 2002).**

La méthodologie de surface de réponse (MSR) vise à proposer des formulations analytiques explicites des résultats d'un système dans le but de réaliser des calculs de fiabilité **(Rguig, 2005).**

Une dépendance fondamentale existe entre l'objectif recherché et la définition du plan d'expérience. Cependant, dans les deux cas, les étapes de la démarche se déroulent dans un ordre similaire à savoir :

1. **Planification :**
   - Définir processus/ problématique / objectifs
   - Choisir les variables de réponse(s) Y à mesurer
   - Choisir les variables ou facteurs X et l'espace de variation
2. **Exécution :**
   - Choisir et comparer des plans expérimentaux (quel plan ?)
   - Préparer pour l'expérience
   - Conduire l'expérience
3. **Analyse**
   - Analyse mathématique des résultats d'essais.
   - Analyse statistique du modèle.
   - Analyse graphique du modèle
   - Analyse globale des résultats d'essais.

III.A.2. Résumé de la conception

Le but de cette étude est d'estimer l'effet des facteurs identifiés comme potentiellement influents et d'identifier ceux ayant une influence statistiquement significative sur les performances observées. Les interactions seront également observées afin de compléter l'estimation des effets moyens des facteurs.

La définition du processus/ problématique / objectif est résumée dans le tableau suivant.

Tableau III.A.1. Résumé de la conception

Objectif	Optimisation **(RSM)**
Modèle de processus	Quadratique
Conception	Full Fac (Mixte)
Fonctionne dans la conception	21
N = courses réelles	21

III. A. 3. Variable de réponse

L'objectif de cette étude étant l'optimisation de la qualité du produit séché vis à vis du temps de séchage, d'où alors la réponse choisie est le temps final du séchage (équilibre) en minutes.

III. A. 4. Définition des facteurs

En se basant sur les observations des études préliminaires, nous avons identifié les facteurs qui sont importants dans le processus de séchage à savoir: l'épaisseur des tranches de fruits (orange et citron), la durée de séchage, la puissance pour les micro-ondes et le niveau (bas, moyen et haut) de chaque facteur sont déterminés. Alors cette étape définit 7 facteurs potentiellement influents sur la réponse observée. Les deux aspects de ces paramètres voire qualitative et quantitative sont identifiés dans le tableau (III.2).

Tableau III.A.2. La nature des différents Facteurs

Natures	**Facteurs**
Qualitative	Le mode de séchage (étuve ; microonde)
	Nature de produit étudié (orange, citron)
	La forme des tranches
Quantitative	La teneur en eau
	Temps de séchage
	Epaisseur des tranches
	La température (par étuve)
	La puissance (par microonde)

III.A.5. Définition du domaine expérimental

L'étude préliminaire effectuée a permis de déterminer les niveaux bas et haut pour les variables influençant l'expérimentation. Ces derniers sont illustrés dans le tableau suivant.

Tableau III.A.3: Les variables indépendantes et les niveaux des facteurs influençant sur le séchage assisté par micro-ondes.

Facteurs	Unité	Domaine
Température	°C	[70-105]
Puissance	Watt	[100-900]
Épaisseur	mm	[3-10]

III. A. 6. Construction du plan d'expérience et le choix du modèle

Selon la formule $\boldsymbol{N = p^k \times p'^{k'} + C}$=$7^1 \times 3^1 + 3 = 24$ essais seront réalisés de manière à pouvoir estimer le model mathématique de la réponse investiguée ; où **N** : est le nombre des expériences**. k, k'**: est le nombre de facteurs. **p, p'**: est le nombre de niveaux. **C** : est le nombre de points centraux.

Nous avons choisi de réaliser le plan factoriel mixte complet pour déterminer les coefficients de modèle, résultant en 24 expériences. Quelques facteurs (paramètres opératoires) tels que la puissance est modifiée et prend sept niveaux étant {100, 200, 300, 400, 500, 600 et 900W} et trois niveaux pour l'épaisseur {3, 6 et 10 mm} et trois points centraux,

Les plans d'expériences seront utilisés afin de réaliser l'analyse des données et l'interprétation, ainsi que les réponses. La méthodologie des surfaces de réponses va permettre de modéliser les réponses étudiées sous forme d'une équation polynomiale du second degré présentée ci-dessus

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{2} a_i x_i + \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{2} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{2} a_{ii} x_i^2 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{23}, a_{13}, a_{11}, a_{22} et a_{33}: sont les coefficients de régression, x_1 et x_2 : sont les facteurs étudiés, y: est la réponse mesurée, et E : est l'erreur.

III.A.7. Plan expérimental

Dans notre étude, une série de 24 expériences ont été faites (voir **Tableau III.A..4**). Les résultats du séchage ont été exprimés en termes des temps de séchage. L'analyse a été réalisée pour estimer la fonction de réponse, donc le temps de séchage peut être prévu par le modèle quadratique comme le montre l'équation précédente **(III.1).**

Tableau III.A.4. Expériences réalisées dans le plan expérimental.

	Les facteurs			Les facteurs	
N° essai	**w (W)**	**épi (mm)**	**N° essai**	**w (W)**	**épi (mm)**
1	100	3	13	600	6
2	200	3	14	900	6
3	300	3	15	100	10
4	400	3	16	200	10
5	500	3	17	300	10
6	600	3	18	400	10
7	900	3	19	500	10
8	100	6	20	600	10
9	200	6	21	900	10
10	300	6	22	400	6
11	400	6	23	400	6
12	500	6	24	400	6

III.A.8. Matériels et méthodes des expérimentations

Le séchage est la méthode la plus ancienne et la plus utilisée pour la conservation des fruits, légumes et des produits aquatiques car il abaisse l'activité de l'eau, prolonge la durée de conservation ralentissant la croissance microbienne, l'activité enzymatique et la réaction chimique. L'utilisation de diverses méthodes de séchage vise à identifier la meilleure méthode qui à la fois préserve une bonne qualité du produit et assure un temps minimal de séchage.

Cette étude rassemble les résultats d'une étude expérimentale effectuée au sein du hall de technologie d'université de Médéa. Les essais de séchage des oranges et des citrons ont été réalisés dans l'étuve et dans le micro onde.

Nous présenterons tout d'abord les caractéristiques de l'orange et du citron, puis nous détaillons les procédures expérimentales concernant les mesures de la teneur en eau des échantillons à sécher, la détermination de la quantité d'eau évaporée et l'étude de la cinétique du séchage.

III.A.8.1. Matières premières

Dans cette partie, nous allons présenter les produits que nous avons étudiés lors de ce travail. Il s'agit principalement d'orange et de citron.

III.A.8.1.1. Orange

III.A.8.1.1.1. Description

L'oranger est un petit arbre ou arbuste, pouvant atteindre 10 à 15 m de hauteur environ. L'arbre est à rameaux nombreux ; formant une cime touffue, avec un feuillage vert sombre, glabre, persistant et légèrement ailé. Les feuilles sont persistantes, cireuses, coriaces et alternes, la floraison blanche très parfumée. Le fruit est une baie, ronde ou allongée, souvent pourvue d'un mamelon proéminent du côté opposé au pédoncule fructifère **(Teuscheret al., 2005).** Les fruits mettent 10 à 12 mois pour murir, ils sont de taille moyenne et de couleur caractéristique orange. L'intensité de la couleur et la forme du fruit sont caractéristiques pour chaque variété **(Loussert, 1989).**

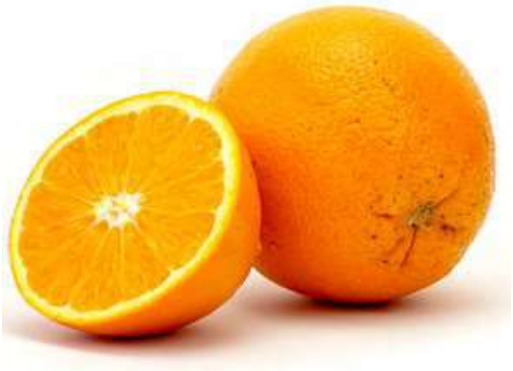


Figure III.A.1 Fruit d'orange

III.A.8.1.1.2. Structure

Tous les fruits des citrus cultivés présentent la même structure anatomique présentée sur la **Figure III.A.2. (Ramful et al., 2010)**

D'un point de vue botanique les agrumes sont des fruits charnus de type baie avec un péricarpe structuré en trois parties bien différenciées : l'épicarpe (Flavédo), mésocarpe (Albédo) et l'endocarpe (pulpe).

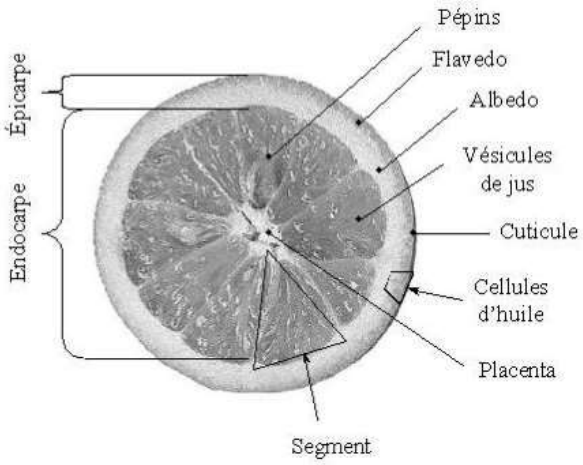


Figure III.A.2 : Caractéristiques morphologiques d'une orange **(Duan et al., 2014).**

III.A.8.1.1.3. Composition chimique et valeur nutritive

Les principaux composés de l'orange sont résumés sur le Tableau III.A..5 **(Bousbia, 2011).**

Tableau III.A.5 : principaux composés d'orange

Constituants	Teneurs
Acides organiques	8.5 à 12% dans le fruit à maturité, représenté par le Saccharose (40%).
Autre composés Energétiques	Lipides concentrés dans les pépins, peu de protéines
Vitamines	• Vitamine C (40 à 80 mg pour 100g). • Vitamines hydrosolubles qui sont toutes des vitamines du groupe • B (B1 et B9, en particulier). • Vitamine A (0.05 à 0.2 mg pour 100g). Vitamine E (0.24 mg pour 100g).
Oligo-éléments	Fer, cuivre, zinc, manganèse, Nickel, Iode. Trace de Bore et Sélénium.
Fibres	Une teneur de 2.4 % en moyenne, elles ont l'originalité d'être riche en pectine (environ 50%).
Flore mésophile	Levures et lactobacilles indispensables à sa bonne digestion
Substances aromatiques	Ce sont des composés complexes caractéristiques de ce fruit (aldéhydes, esters…etc.), des essences odorantes
Glucides	8.5 à 12% dans le fruit à maturité, représenté par le Saccharose (40%).
pigments	Donnent à la pulpe sa couleur plus ou moins marquée jaune orangé pour les flavonoïdes et les caroténoïdes, Jaune pour les xanthophylles, rouge ou rouge violacé pour les anthocyanes.

III.A.8.1.2. Citron

III.A.8.1.2.1. Description

Le citronnier, un membre de la famille des rutacées, est un petit arbre (arbuste) vert et aromatique dont la taille peut varier de 2 à 10 m de haut, porte 5-6 branches charpentières très fournies en rameaux, les racines superficielles forment un réseau dans les 80 premiers centimètres de sol. Les feuilles des citronniers sont des feuilles vertes, alternatives et persistantes, très adurantes en raison des multiples poches à essence qu'elles contiennent, qui sont visibles à l'œil nu **(Gollouin et Tonelli, 2013).**



Figure III.A.3 Fruits de citron.

III.A.8.1.2.2. Composition chimique et valeur nutritive

Le citron est un fruit riche en vitamine C et d'un large éventail de vitamines de groupe B avec des quantités considérables de flavonoïdes. La teneur en glucides et en protéines est faible, il est riche en substance minéral (le potassium est le minéral le plus abondant). **(Valnet, 2001).**

Tableau III.A. .6. Composition biochimique moyenne du citron **(Gollouin et Tonelli, 2013).**

Composants (g)	**Moyennes/100g**
Eau (g)	**90,2**
Glucides (g)	3,16
Protéines(g)	0,7
Lipides (g)	0,6
Acides organiques (g)	4,88
Fibres alimentaires (g)	0,5
Les vitamines (mg)	51,26
Les minéraux (mg)	211,95
Apports énergétiques (Calories)	36,48

III.A.8.2. Méthode de traitement de l'orange et du citron

III.A.8.2.1. Matériels

- Balance analytique de Modèle SARTORIUS, de précision (d=0.001g).
- Etuve ventile.
- Micro-onde avec grill et four. Modèle condor CMW-A3101.
- PH mètre de modèle STARTER3100 OHAUS et de précision 0.001g.
- Agitateur.
- Papier aluminium.

III.A.8.2.2. Collecte des échantillons

Deux variétés d'oranges et de citron ont été récoltées pendant le mois de Février (2019) dans la région Rafighou de la Wilaya de Blida (Algérie). La récolte a été faite d'une manière aléatoire en fonction de la période de maturation de chaque variété. Chaque échantillon, possède un poids moyen de 300 g, a été choisi sur la base de critères établis ; les fruits sélectionnés sont mûrs et sains. Les caractéristiques de chaque variété sont récapitulées sur les tableaux (**Tableau III.A..5 et 6.)** ci-dessus

III.A.8.2.3. Préparation de l'échantillon

Des échantillons des fruits orange et citron, ont été lavés une première fois avec l'eau de robinet, puis une deuxième fois avec de l'eau distillée pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides et autres contaminants. Ils sont ensuite découpés en trois tranches qui ont l'épaisseur de 0,3 cm, 0,6 cm et 1,0 cm comme le montre la **Figure III.A.4**. Le séchage a été réalisé par deux techniques ; séchage conventionnel à différentes températures (70, 105°C) dans une étuve et l'autre séchage par micro onde (procédé innovant) à différentes puissances (100, 200, 300, 400, 500, 600 et 900 W)



Figure III.A.4 : Photographie de tranches des oranges et des citrons avant le séchage.

Pour les deux types de séchage, nous avons étalé les tranches sur un verre de montre, porté sur la plaque tournante de micro-onde et sur les étagères du l'étuve, des pesées ont été effectuées pour les différentes températures de l'étuve (70 et105°C) et pour les différentes puissances du micro-onde (100, 200, 300, 400, 500, 600 et 900W) d'une façon équidistante jusqu'à la pesée correspondante à l'humidité recherché où l'opération s'arrête. Les cinétiques de séchage sont suivies régulièrement jusqu'à l'arrivée la masse constante.

III.A.8.2.4. Détermination de la teneur en eau

Pour détermination de la teneur en eau des échantillons des fruits (orange et citron) qui ont été séchés par micro onde et étuve, on procède au calcul par la méthode décrite par (**Doymaz et *al*., 2004)** suivante :

$$X_h(eau)\% = \frac{(P_{initial - P_{final}})}{P_{initial}} * 100 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec

X_h (%) : taux d'humidité en pourcentage.

$P_{initial}$: poids de l'échantillon avant mise à l'étuve ou micro ode en gramme.

P_{final} : poids de l'échantillon après mise à l'étuve ou microonde en gramme.

III.A.8.2.5. Taux de matière sèche (X)

La teneur en matière sèche est évaluée selon la méthode décrite par **(AFNOR 1986).** Cette dernière est calculée par la formule suivante :

$$X\% = 100 - X_h\% \qquad \textbf{(III.2)}$$

III.A.9. Études préliminaires

Des études préliminaires sont réalisées dans le but de choisir la meilleure mode des séchages (étuve ventile ou micro onde). Et aussi d'étudier l'influence de quelques paramètres (puissance/température et le temps des séchages) sur les cinétiques de séchage. Enfin on détermine les meilleurs paramètres.

III.A.9.1. Cinétique du séchage par étuve ventile (conventionnel)

Dans cette méthode, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter le transfert de chaleur et de masse ; ici la convection est principalement impliquée. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour et la taille de l'échantillon testé. Dans cette partie nous avons séchée les produits (orange, citron) dans le séchoir conventionnel (étuve ventile), sont représentés dans la **Figure III.A.5**



Figure III.A.5. Etuve ventile

III.A.9.1.a. Orange

- **Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage**

Pour étudier l'influence d'épaisseur on a fait les deux expériences, indiquées dans le tableau (III.7) ci-dessous.

Tableau III.A.7. Les expériences réalisées pour étudier l'influence d'épaisseur.

Les paramètres	Les variables
Température : 70, 105 C°	ép. = 01.0 cm
	ép. = 0.6 cm
	ép. = 0.3 cm

Les résultats de l'évolution de l'humidité des différentes tranches d'orange, séchées par l'étuve à différentes températures (70, 105 C°) sont représentés dans les figures III.6 et Figure III.A.7**.**

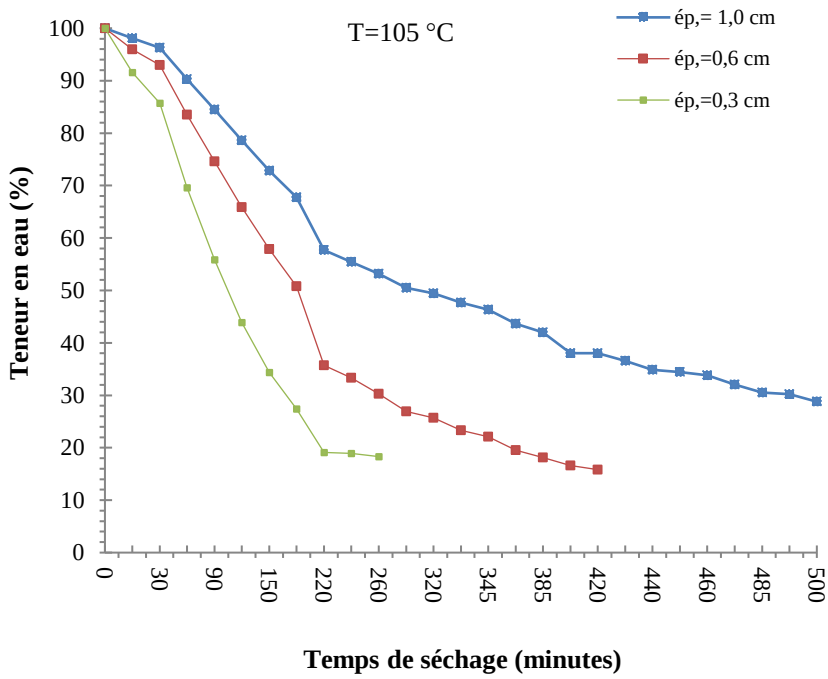


Figure III.A.6. Evolution de la teneur en eau (x) de l'orange en fonction du temps du séchage à T=105 °C

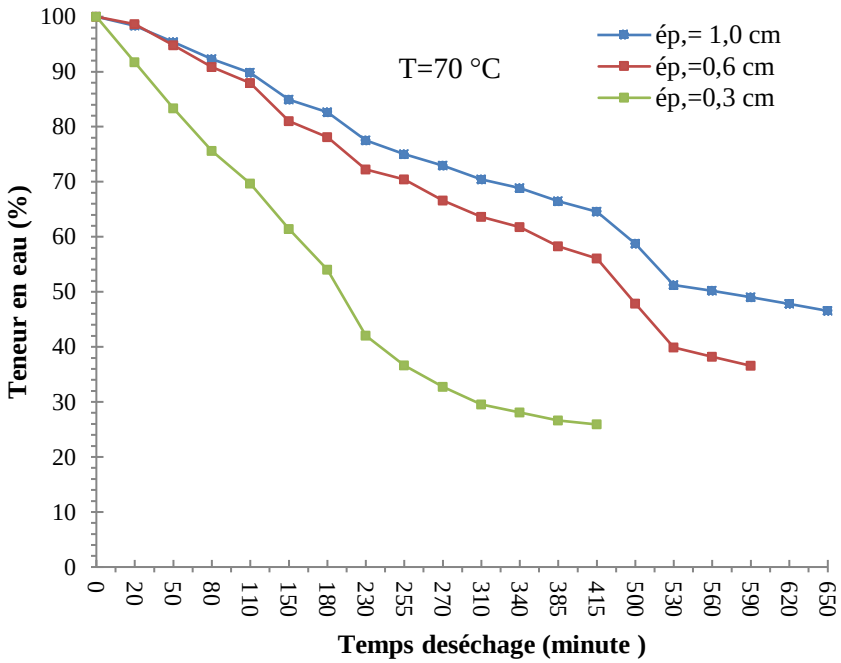


Figure III.A.7. Evolution de la teneur en eau de l'orange en fonction du temps de séchage à T=70 °C.

L'épaisseur de déférentes tranches étudiées dans l'étuve influe directement sur la cinétique de séchage. Les figures (III.6 et III.7) montrent que le temps de séchage augmente lorsque l'épaisseur augmente donc il y'a une relation proportionnelle entre l'épaisseur et le temps de séchage.

Le séchage d'orange à une température T=105C° est terminé en 260 minutes pour épi.=0.3 cm et 420 minutes pour épi.=0.6 cm, mais pour épi.=1.0 cm le séchage prend beaucoup plus de temps environ 500 minutes pour libérer tout l'eau contenue dans l'orange.

- **Influence de température sur les cinétiques de séchage**

  Une série d'expériences a été réalisée pour étudier l'influence de la température sur la cinétique de séchage d'orange et la température est fixée à 70°C et à 105 °C pour obtenir les résultats présentés dans les figures III.8, III.9 et III.10.

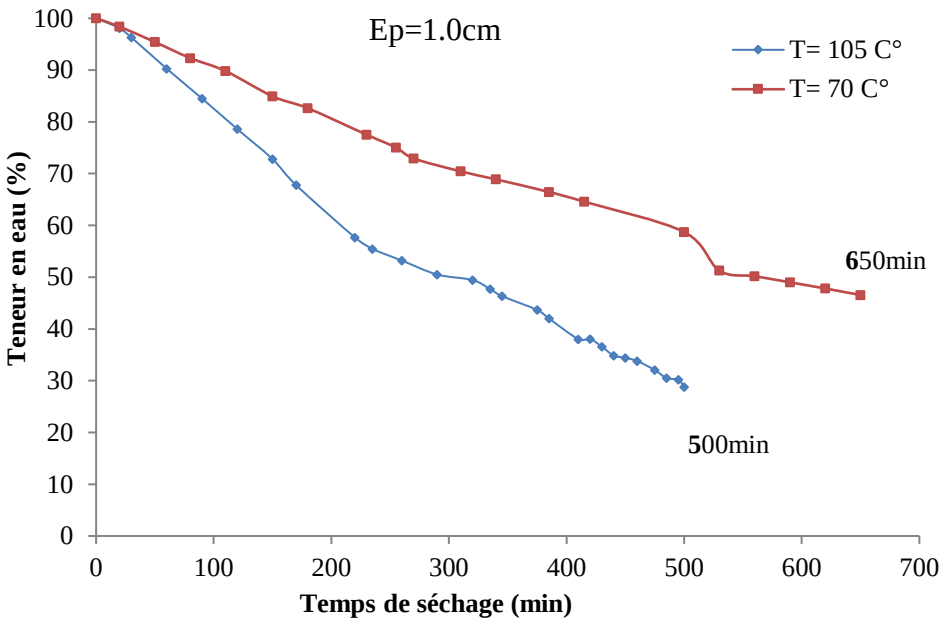


Figure III.A.A.8 Influence de la température sur l'évaluation de la teneur en eau Y (%) en fonction du temps de séchage à épi=1.0cm.

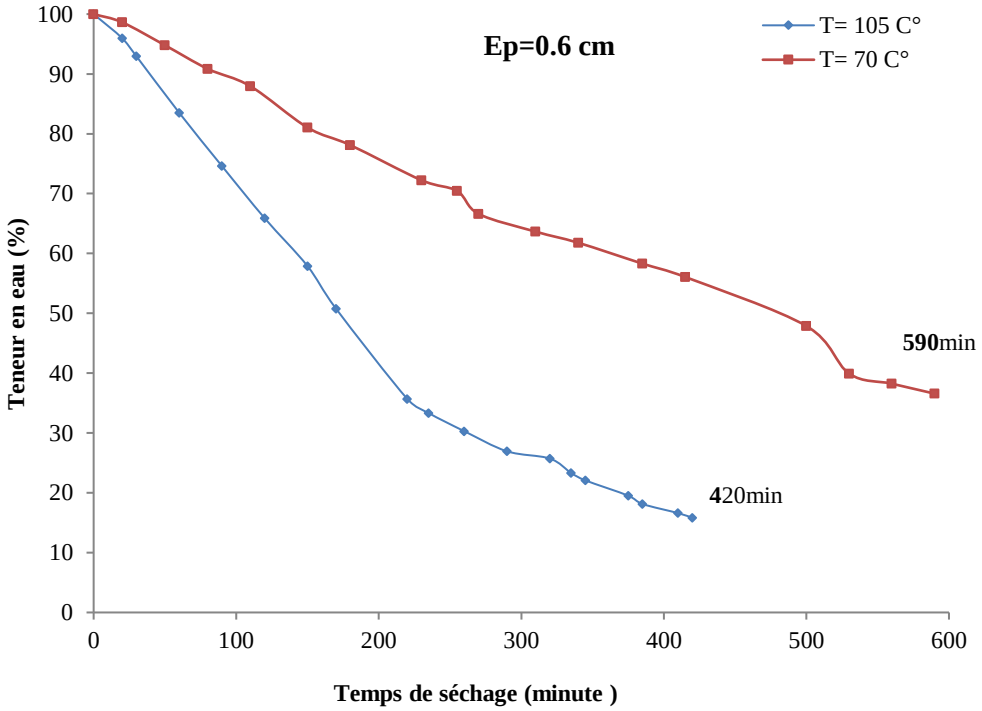


Figure III.A.9. Influence de la température sur l'évaluation de la teneur en eau Y (%) en fonction du temps de séchage à épi=0.6 cm.

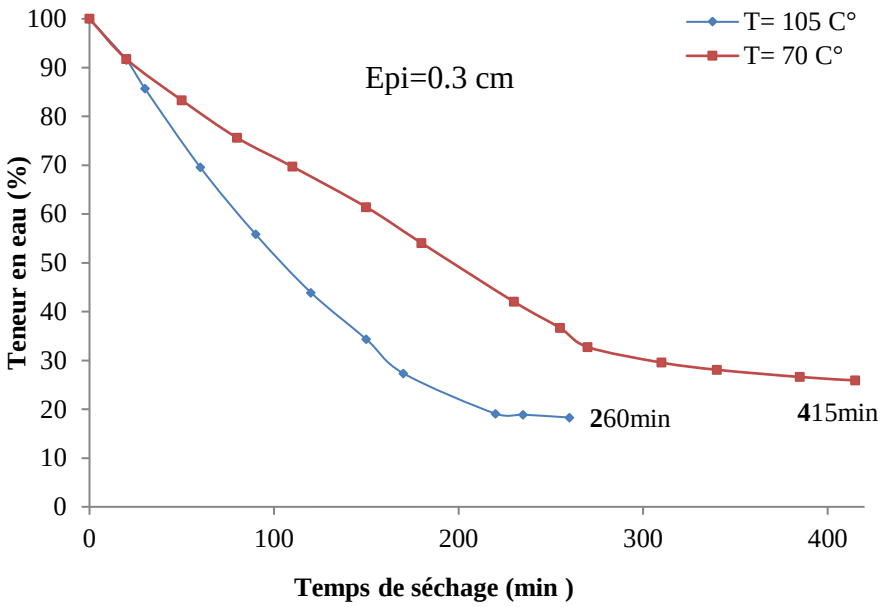
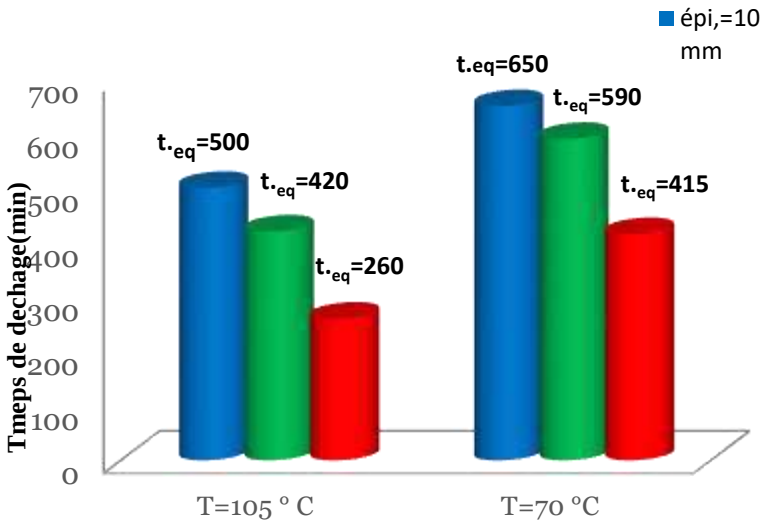


Figure III.A.10. Influence de la température sur l'évaluation de la teneur en eau Y (%) en fonction du temps de séchage à épi=0.3 cm.

Les résultats de cette étude montrent que le taux de perte en eau, pour une épaisseur donnée des tranches, change d'une température à une autre. Le taux de perte le plus rapide est enregistré avec les tranches d'orange de 0.3 cm d'épaisseur séchée à la T= 105°C.

- **Temps d'équilibre (optimal) des séchages à l'étuve**

  D'après les résultats de la courbe de cinétique, nous constatons que le temps mis pour la stabilité du poids des échantillons varie selon la température de séchage appliquée. Par conséquent, les couples (Temps-température) ont été déterminés dont le temps correspond au temps nécessaire pour atteindre la stabilité du poids (temps d'équilibre) et les résultats sont représentés dans la **Figure III.A.11**.



FigureIII.11. Temps optimal de séchage par étuve à différentes températures et épaisseurs.

En effet pour épi=3mm, à haute température T=105°C, la perte en eau est beaucoup plus rapide t_{eq}= 260 minutes ; à 70°C, la masse est devenue stable après t_{eq}= 415 min. Les résultats obtenus montrent que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée.

Pour une épaisseur des tranches égale à 10 mm, la durée de séchage n'est pas la même pour les deux températures, le temps de séchage est plus court avec l'augmentation des températures (pour T=70 °C le t_{eq}=650 minutes, tandis que pour T=105 C° le t_{eq}= 500 minutes) donc on déduit que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température et l'épaisseur choisies.

III.A.9.1.b. Citron

A. Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage

Les résultats de l'évolution de la teneur en eau (Y) dans différentes tranches (3,6 et 10 mm) de citron séchées à l'étuve à (T=105 et T=70°C) et les résultats sont représentés dans les figures III.12 et Figure III.A.13.

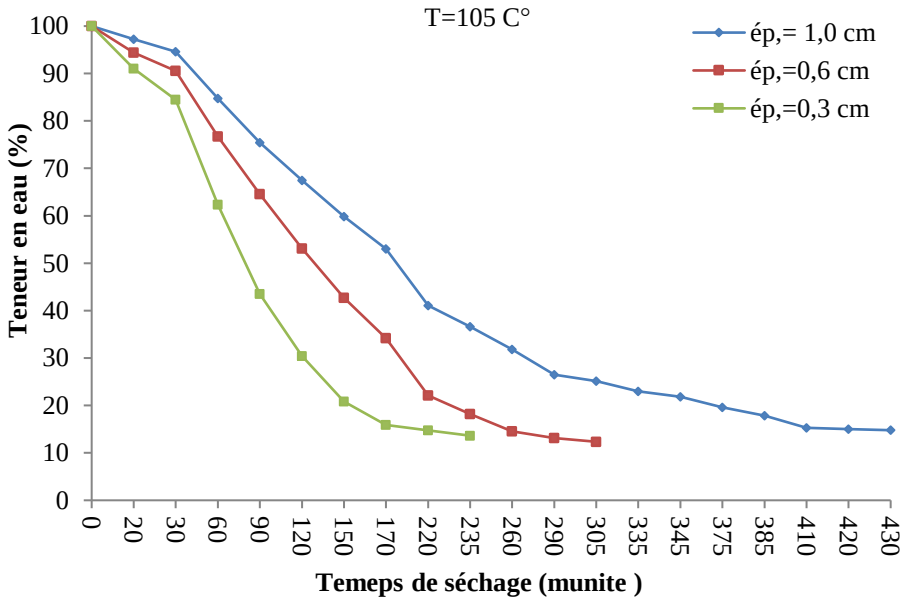


Figure III.A.12. Evolution de la teneur en eau de citron en fonction du temps du séchage à T=105 °C.

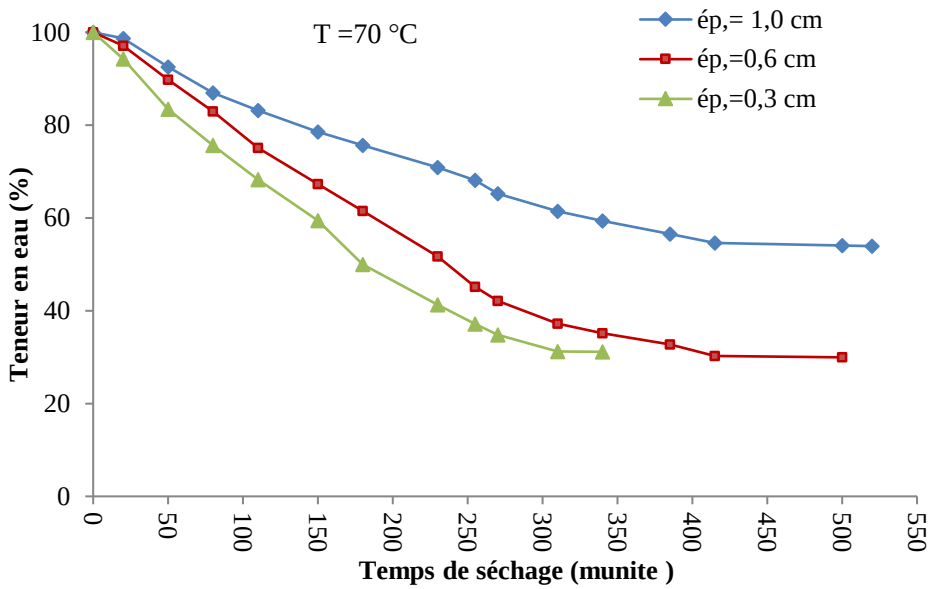


Figure III.A.13. Evolution de la teneur en eau de citron en fonction du temps du séchage à **70 °C**.

Les résultats obtenus montrent que le taux d'humidité résiduelle évolue avec l'évolution de temps de séchage. En effet, les pertes d'humidité sont plus rapides pour les tranches de 0.3, suivi de 0.6 cm puis 1.0 cm sous la même température.

B. Influence de la température sur les cinétiques de séchage

Les résultats de l'évolution de l'humidité des différentes tranches de citron, séchées à l'étuve à différentes températures (70, 105 C°) sont représentés dans la Figure III.A.14.

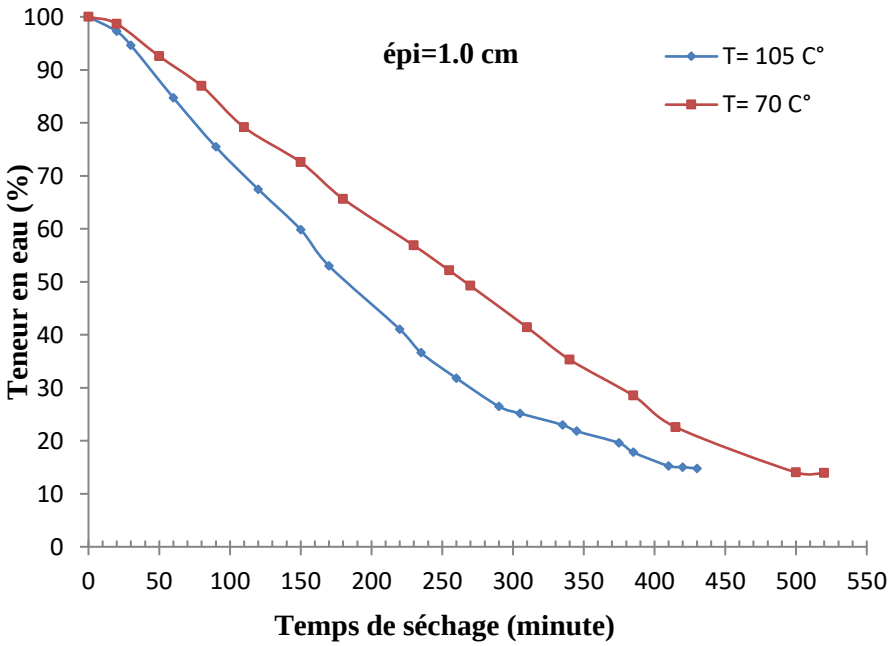


Figure III.A.14. Influence de la température sur l'évolution de Y (%) en fonction du temps de séchage à épi=1.0 cm.

C. Temps d'équilibre (optimal) des séchages à l'étuve

Les combinaisons ou bien solutions (Temps-épaisseur) ont été déterminés pour un temps (t_{eq}) correspondant au temps nécessaire pour atteindre la stabilité du poids. La Figure III.A.15 englobe les résultats obtenus.

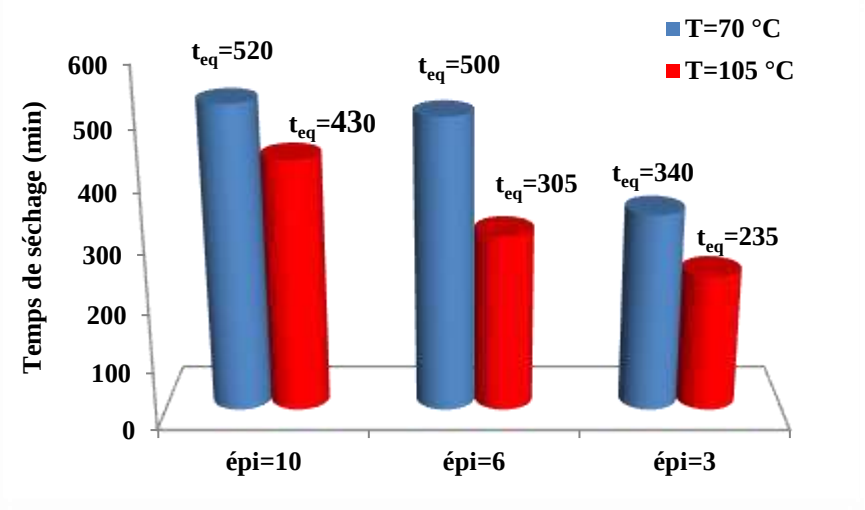


Figure III.A.15. Temps optimal de séchage par étuve à différentes épaisseurs à température variant entre 70 et 105 °C.

En effet pour épi=3mm, à haute température T=105°C la perte en eau est beaucoup plus rapide voir t_{eq}= 235 minutes. À 70°C, la masse est devenue stable après t_{eq}= 340 min, par conséquent, on peut dire que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température appliquée.

III.A.9.2. Cinétique du séchage par micro-onde.

Dans le micro onde, le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau : l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires. Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau. **(Figure III.A.16).**



Figure III.A.16. Photo du micro onde utilisé.

III.A.9.2.a. Orange

a. Influence de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage

Pour étudier l'influence de l'épaisseur, on fait les sept expériences indiquées dans le tableau (III.8) ci- dessous :

Tableau III.A..8 Les expériences réalisées pour étudier l'influence d'épaisseur.

Les paramètres	Les variables
Puissance : 100, 200, 300, 400, 500,600, 900 W	ép.= 1.0 cm
	ép.= 0.6 cm
	ép.= 0.3 cm

Les résultats de l'évolution de l'humidité (teneur en eau) dans différentes tranches d'orange (3mm, 6mm et 10mm) séchées par micro onde, sont représentées graphiquement par les figures III.17, III.18, III.19, III.20, III.21, III.22 et III.23)

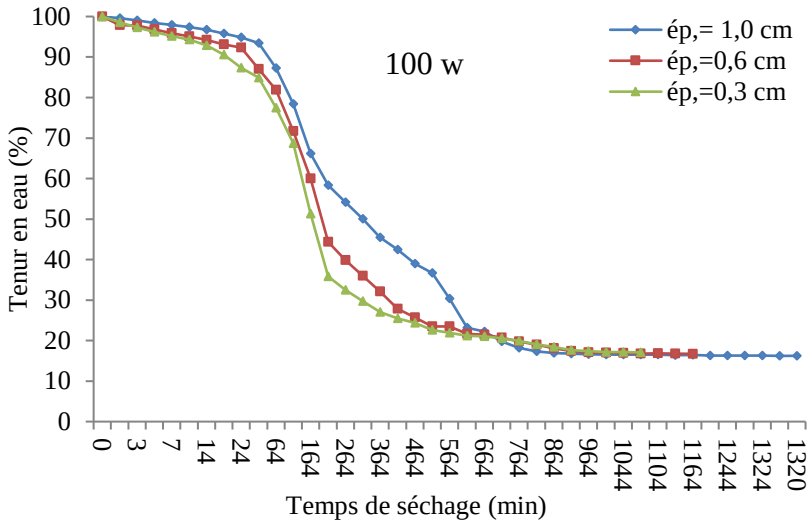


Figure III.A.17. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 100 W.

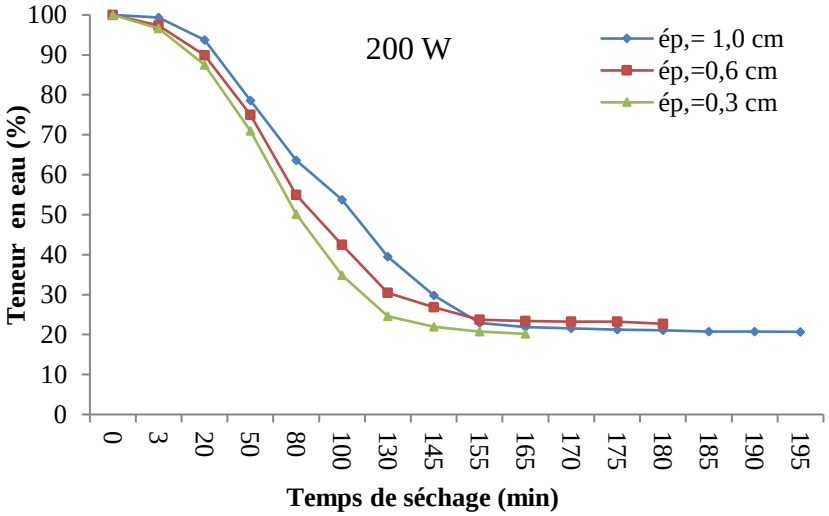


Figure III.A.18. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 200 W.

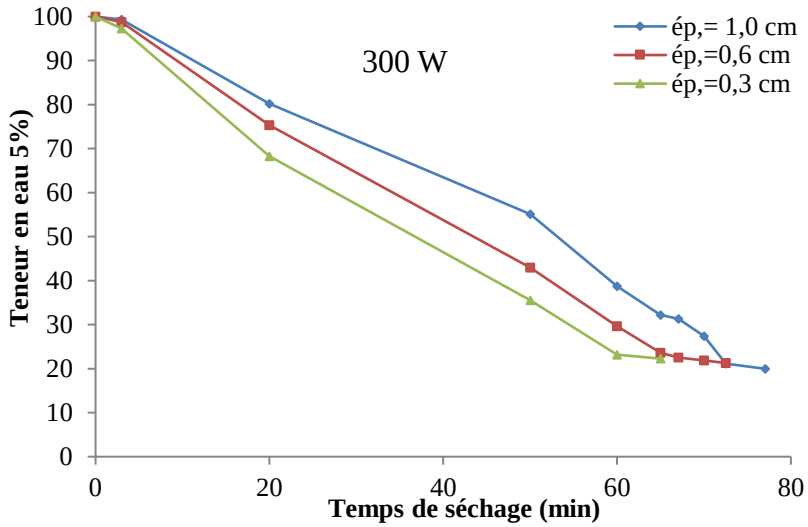


Figure III.A.19. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 300 W

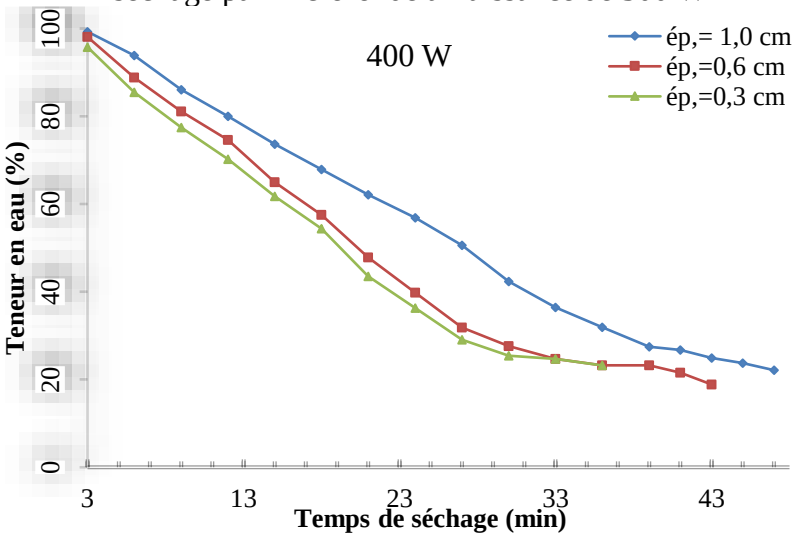


Figure III.A. 20. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 400 W.

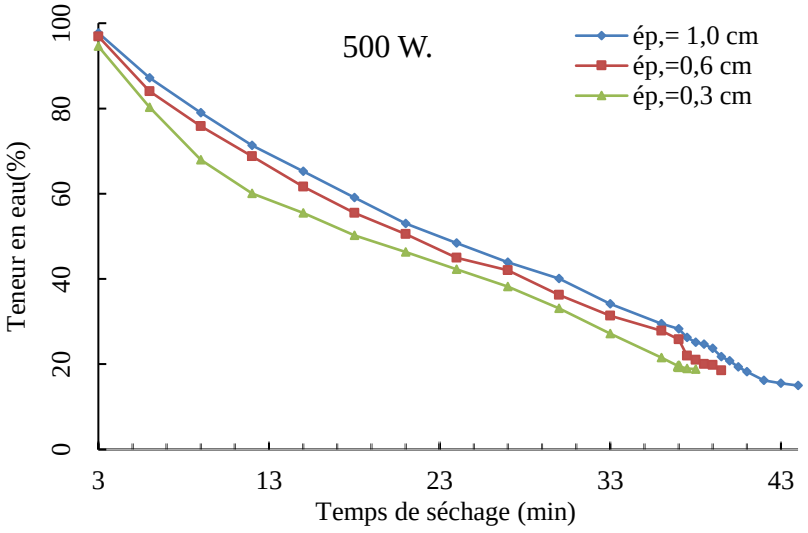


Figure III.A. 21. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 500 W.

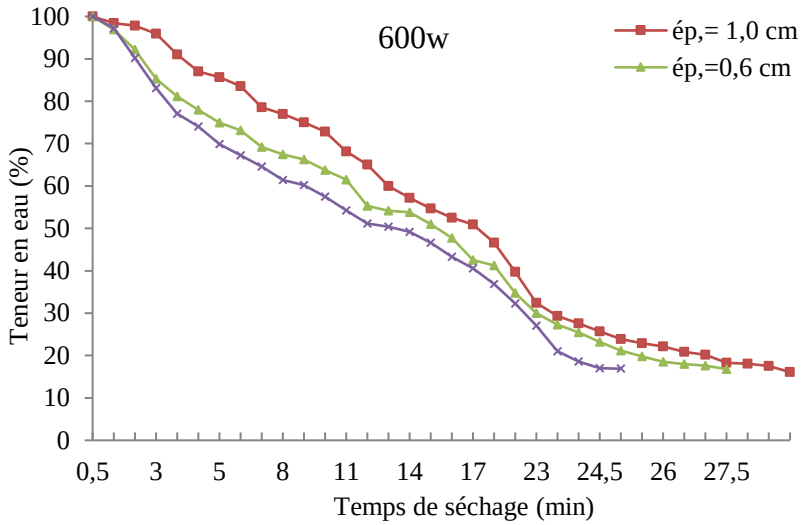


Figure III.A. 22. Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 600 W.

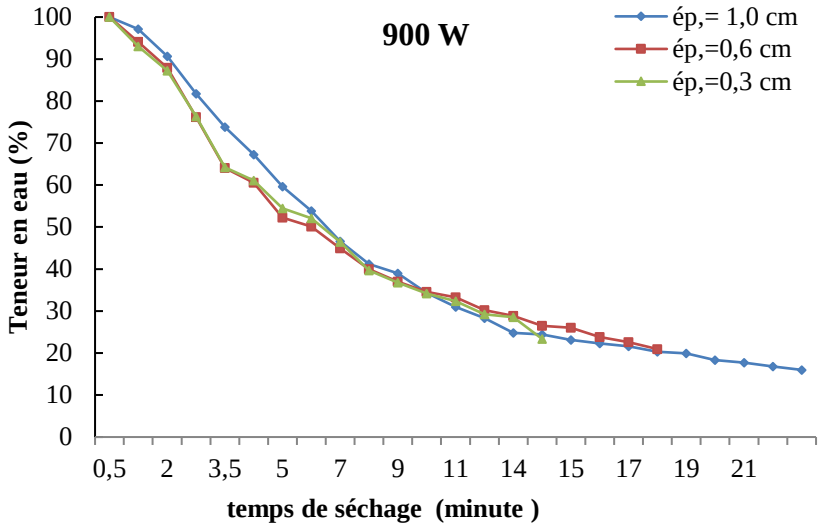


Figure III.A.23 Influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau pendant le séchage par micro-onde à Puissance de 900 W.

Les résultats de la présente étude montrent que le taux d'humidité résiduelle (Y) évolue avec l'évolution de temps selon la puissance utilisée et l'épaisseur des tranches. En effet, les pertes d'humidité sont plus rapides pour les tranches de 0.3, suivi de 0.6 puis 1.0 cm pour la même puissance utilisée. Plus l'épaisseur des tranches est faible, plus la perte en eau est accélérée et ceci est observé pour n'importe quelle puissance utilisée.

III A. 10. Analyse des résultats

III A.10.1.1. Analyse mathématique des résultats d'essais

Les valeurs relevées lors des mesures étant des valeurs particulières de variables

aléatoires, En présence d'une valeur suspecte, l'essai est réalisé de nouveau et la valeur suspecte est écartée.

III A.10.1.2. Analyse de la variance (ANOVA)

Analyse de variance **(ANOVA)** sera basée sur la décomposition de la variabilité de la réponse et les contributions de chacun des facteurs. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de prendre en compte facilement les interactions entre facteurs ce qui permettra d'évaluer également leur contribution. L'intérêt est alors de comparer la contribution des différents facteurs à la variabilité totale. Cela peut être fait en calculant les indices de sensibilité par ANOVA en divisant la somme des carrés des écarts obtenue pour chaque facteur par la variabilité totale (voir Tableau III.A.9).

Tableau III.A. 9. Analyse de variance (ANOVA) de temps d'équilibre (t) pour le séchage

Temps	DF	SS	MS (variance)	F	p	SD
Total	24	4,47758e+006	186566			
Constant	1	985163	985163			
Total correction	23	3,49242e+006	151844			389,672
Régression	5	2,54433e+006	508866	**9,66111**	**0,0000**	713,349
Résiduels	18	948089	52671,6			229,503
Manqué d'ajustement	15	948089	63205,9	--	--	251,408

Avec DF dégrée de liberté**, SS** (Sum Square) est la somme des carrés des écarts ou en Francais SCE, MS (Mean Square) est le carré des moyennes peut être noté aussi CM, F est le teste de fisher, P est le P-Value et enfin SD est l'écart type.

Les qualités descriptives (R^2ajusté) et prédictives (Q^2) ont été calculées pour ces modèles et sont données dans le Tableau III.A..12 suivant.

Tableau III.A.10. La liste des critères statistiques adoptés.

Paramètres	Temps
R^2	0,729
R^2 Adj.	0,653
Q^2	0,428
RSD	229,5
N	24

Les résultats statistiques montrent que ce modèle est médiocre, puisque la valeur de coefficient de détermination est faible (R^2=0.729), d'autre part la valeur de la qualité prédictives est aussi très faible (*Q^2=0.428*).

III.A.10.1.3. Analyse graphique du modèle

La valeur moyenne du coefficient de détermination $R^2_{ajusté}$ associée aux modèles de temps d'équilibre se traduit par des graphiques d'adéquation, fournis dans la figure (III.24), sur laquelle l'alignement des nuages de points est très loin de la première bissectrice. Les parcelles avec les points sont loins d'une droite indiquent que ce modèle est médiocre.

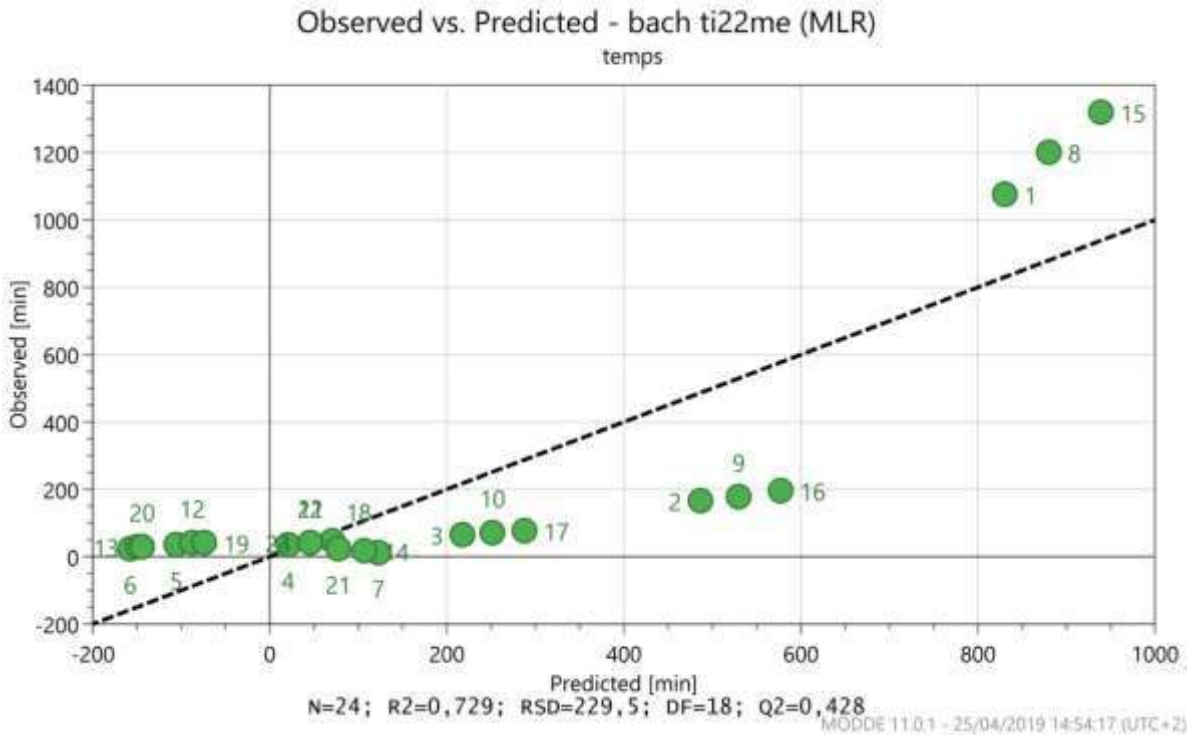


Figure III.A.24. La corrélation entre les valeurs prédites et les points obtenus par l'expérience.

III.A.10.2.1. Analyse globale des résultats d'essais

Basé sur les analyses économique et qualitative, nous avons éliminé les paramètres qui donnent des résultats insatisfaisants, (la puissance 900 watts et 100 watts), puisque la meilleure puissance de séchage a été choisie sur la base du temps minimal pour le séchage, et ce dernier permet d'éviter le risque de dégradation du produit séché. À 900 W les tranches d'orange sont carbonisées, et leurs couleurs sont devenues marrons, indiquant la dégradation du produit. À 100 W, le procédé de séchage est très lent, ce qui n'est pas souhaitable en pratique (industrie) pour des raisons (contraintes) économiques. Les résultats des 18 essais de la matrice d'expériences sont présentés dans le Tableau III.A..13.

III.A. 10.2.2. Analyse mathématique des résultats d'essais

L'analyse mathématique consiste essentiellement à identifier les coefficients des modèles à partir des résultats des 18 expériences réalisées. L'application de la méthode des

moindres carrés sur les résultats d'essais a permis d'obtenir les 6 coefficients de modèle, ces fournis dans le **Tableau III.A.14.**

Tableau III.A.11. Coefficients de modèles

Paramètre	**Coefficients**	**Effet sur la réponse**
Constant	0,455	Temps des séchages (t) au centre
w	-0,233	(-) Effet important de W (défavorable, négatif)
ep	0,064	(+) Effet important d'épi (favorable, positif)
w*w	4,559	(+++) Interaction favorable quadratique de w (positif)
ep*ep	-0,034	(--) Interaction défavorable quadratique d'épi
w*ep	-0,215	(----) Interaction défavorable entre w et épi

Les effets individuels et combinés des différents paramètres sont discutés sur la base de la valeur absolue et du signe de chaque coefficient (Tableau III.A..11)**.** Les valeurs des différents coefficients définissent la force de l'effet correspondant et la façon dont ils agissent sur la réponse (t).

III.A.10.2.3. Conception des expériences (modèle mathématique)

Connaissant les valeurs du coefficient a_0 , les coefficients linéaires, les coefficients des interactions et quadratiques de chaque facteur, ces valeurs sont rapportées dans la fonction de t, le modèle mathématique postulé est un modèle polynomial de second degré présenté par les relations suivantes :

$$Temps = 0.455 - 0.233w + 0.064\,épi + 4.559\,w^2 - 0.034\,épi^2 - 0.215w\,épi \quad \text{(III.3)}$$

III.A.10.2.4. Analyse statistique des modèles

III.A.10.2.4.1. Analyse statistique des coefficients du modèle

Les résultats des coefficients du modèle sont présentés dans le Tableau III.A..15. En effet, les coefficients de variation (conf.int) de chaque paramètre sont largement inférieurs à 30%. Ainsi que les valeurs *p* (probabilités), qui sont hautement inférieures à 0,05 (p<0,05). Cependant, l'analyse de variance, le calcul de RMSE et l'analyse des résidus sont indispensables pour valider ce modèle.

Tableau III.A.12 Analyse statistique des coefficients du modèle

Temps	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
Constant	24,551	5,944	0,001	12,951
w	-12,574	19,667	0,535	42,850
ep	3,453	5,627	0,551	12,261
w*w	246,222	33,079	0,000	72,073
ep*ep	-1,811	7,250	0,807	15,797
w*ep	-11,588	12,966	0,389	28,251

N = 18	**Q^2 =0,904**	Cond. no. = 2,844
DF = 14	**R^2 =0,945**	RSD = 13,94
	R^2 adj. =0,933	Confidence = 0,95

Après le traitement, les nouvelles analyses statistiques des coefficients du modèle sont fournies dans le tableau (III.13.) suivant.

Tableau III.A.13 Analyse statistique des coefficients du modèle après traitement

Temps	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
Constant	42,2417	4,61529	2,77E-07	9,89889
w	-67,5667	5,09077	2,54E-09	10,9187
ep	6,24371	4,38983	0,176833	9,41533
w*w	61,1046	7,73511	1,59E-06	16,5903

N = 18	**Q2 = 0,904**	Cond. no. = 2,844
DF = 14	**R2 = 0,945**	RSD = 13,94
R2 adj. = 0,933		Confidence = 0,95

Le Tableau III.A..15 montre que les facteurs influençant de manière significative le temps final (t_{eq}) pour notre cas de séchage sont la puissance quadratique w^2 de micro-onde (W^2) avec une valeur de P =0.0000 (P<0,05). Par contre l'influence de l'épaisseur (épi) est non significative (P=0,551 >0.05). Ces résultats mènent à dire que l'épaisseur (épi) est moins importante que la puissance de micro-onde.

III.A.10.2.4.2. Effets des facteurs

L'analyse de variance des coefficients de la régression consiste à analyser l'influence des variables (épi, w). Ces dernières seraient plus significatives à des valeurs plus grandes de F et le plus petit P. Les résultats sont illustrés dans les tableaux (III.12 et III.14).

a. Effet linéaire

Le Tableau III.A..13 montre que deux facteurs influencent de manière significative le temps final (t_{eq}) pour la matrice de séchage ; la puissance de micro-onde (W) avec une valeur

de P =0.0000 (*P*<0,05). Par contre l'influence de l'épaisseur (épi) est non significative (P=0,176833 >0.05). Ces résultats mènent à dire que l'épaisseur (épi) est moins importante que la puissance de microonde.

b. Effet d'interaction

Le Tableau III.A..13 montre que l'interaction **w***épi (puissance/épaisseur) n'est pas significative au seuil de probabilité de $P \geq 0{,}005$ (P= 0,389). Ces résultats confirment la non importance de l'interaction w*épi (puissance /épaisseur).

c. Effet quadratique

Le Tableau III.A..13 montre que le facteur quadratique la puissance (w^2) influe d'une manière significative à P<0,05 avec P= (0 .00000). Par contre l'influence du facteur quadratique d'épaisseur ($ép^2$) est non significative (P=0,807>0.05). Ces résultats confirment l'importance de la puissance quadratique w^2 par rapport à l'épaisseur quadratique $ép^2$.

III.A.10.2.4.3. Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) de teneur en eau du séchage d'orange permet de tester l'influence des variables indépendantes utilisées dans les modèles et de représenter graphiquement l'importance de chaque facteur sur la réponse étudiée. L'ANOVA de la régression du plan montre qu'elle est significative à cause de sa faible probabilité (P <0.05), la valeur (Q^2 =0.904) et un facteur de corrélation R^2 élevé (R^2= 0.945), pour le modèle décrivant la réponse expérimentale (t) (voir Tableau III.A..14). Ces résultats statistiques montrent que le modèle est significatif. D'autre part, les probabilités du manque d'ajustement sont très élevées (P>>F). Par conséquent, le modèle validé, expriment le temps d'équilibre (t_{eq}) en fonction des deux facteurs à optimiser (épaisseur, puissance du micro-onde). Le plan de factoriel mixte complet est efficace pour optimiser les conditions de séchage.

Tableau III.A.14 : Analyse de variance (ANOVA) de $\mathbf{t_{eq}}$ pour le séchage

temps	**DF**	**SS**	**MS (variance)**	**F**	**p**	**SD**
Total	18	131120,2500	7284,4585			
Constant	1	81540,6797	81540,6797			
Total corrected	17	49579,5703	2916,4453			54,0041
Regression	3	46858,3906	15619,4639	80,3595	**0,0000**	124,9779
Residual	14	2721,1782	194,3699			13,9417
Manqué d'ajustement	11	2721,1782	247,3798	--	--	15,7283

N = 18 DF = 14	**Q2 = 0,904** **R2 = 0,945** **R2 adj. = 0,933**	Cond. no. = 2,844 RSD = 13,94

R^2 $_{Prévu}$=0,945, représente les valeurs de réponse prédites par le modèle. La différence entre R^2 prévu et $R^2_{ajusté}$ =0,933 doit être toujours dans l'intervalle de 0 à 0,20 pour un modèle

adéquat. Dans notre cas, la différence entre les deux est de 0,041 donc le modèle choisi est adéquat à l'étude

III.A.10.2.5. Analyse graphique du modèle

III.A.10.2.5.1. Courbe de criblage

La valeur élevée du coefficient de détermination $R^2_{ajusté}$ associée aux modèles de temps de séchage (t) se traduit par des graphiques d'adéquation, fournis sur la Figure III.A.32, sur lesquels l'alignement des nuages de points est très proche de la première bissectrice**.** Les parcelles avec les points proches d'une droite indiquent que c'est un bon modèle.

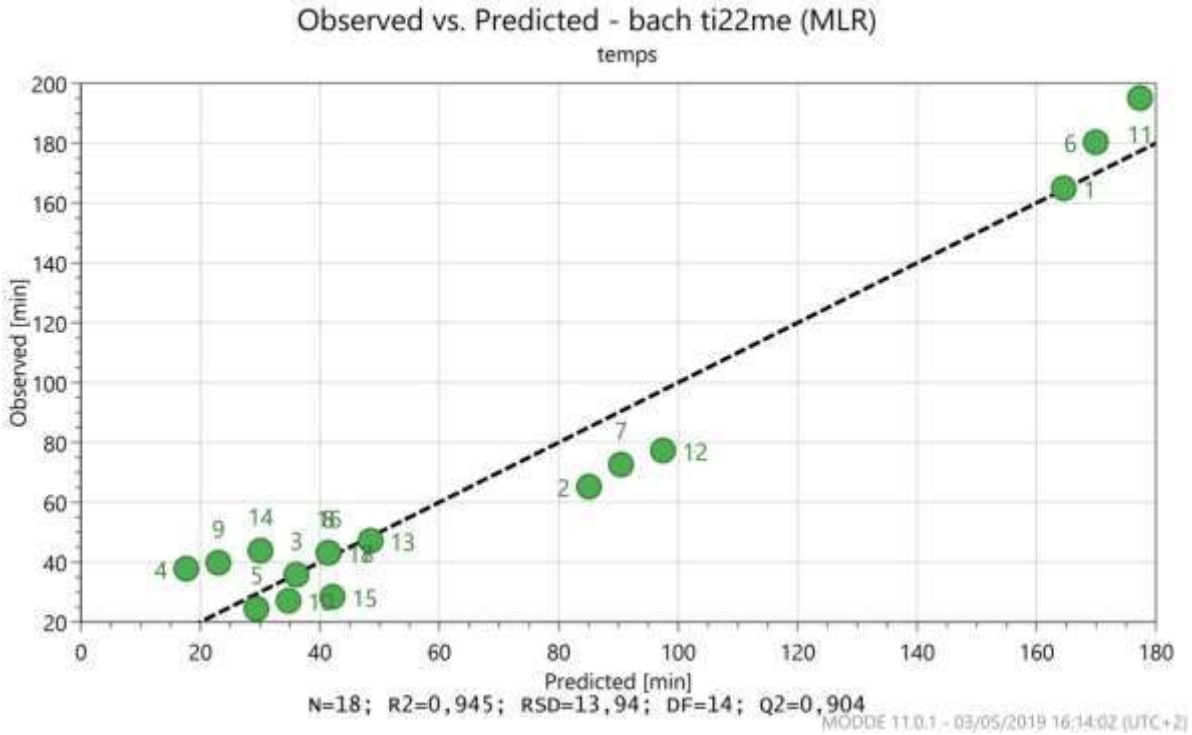


Figure III.A.A.25. La corrélation entre les valeurs prédites et expérimentales.

III.A.10.2.5.2. Résumé de l'ajustement (Les statistiques sommaires)

Le résumé de l'ajustement page de l'assistant d'analyse fournit un résumé des bases statistiques du modèle donné par la figure (III.26).

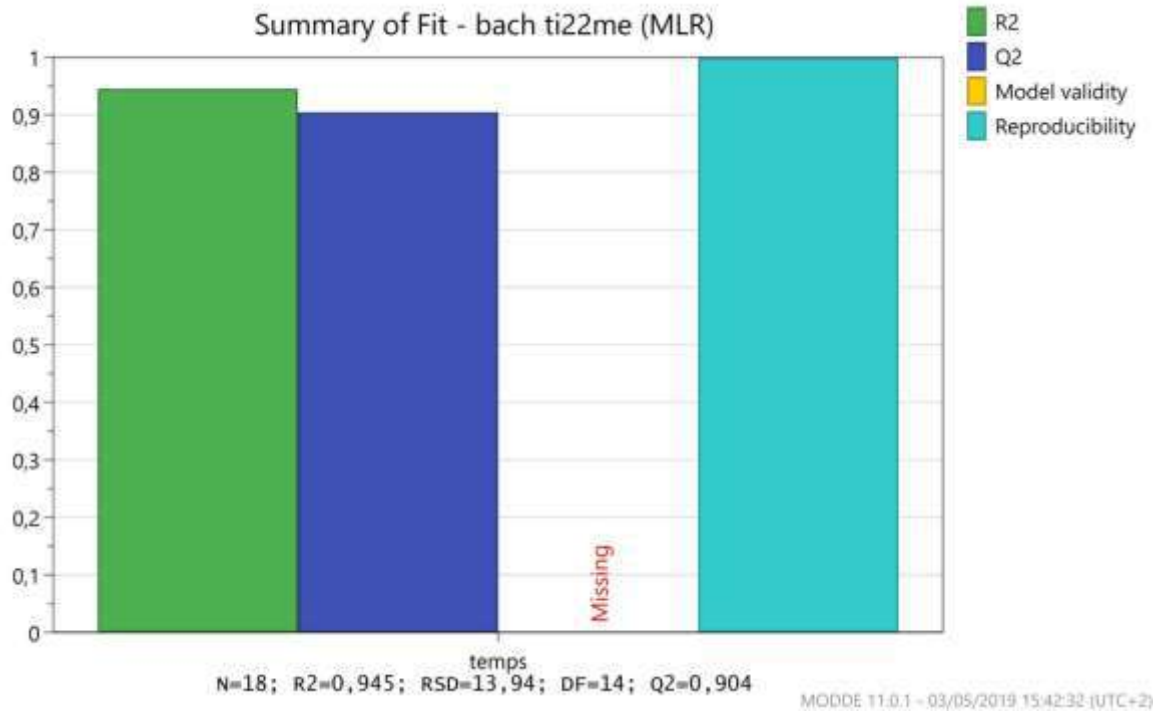


Figure III.A.26 : Résumé de l'ajustement de MODDE

III.A.10.2.5.3. Représentation graphique des surfaces de réponses

Des tracés des surfaces de réponse ont été faits afin de visualiser les effets individuels et interactifs des variables indépendantes. Cela conduira à la détermination des valeurs de facteur, pour le temps d'équilibre (t_{eq}). La Figure III.A.34 représente la surface de réponse.

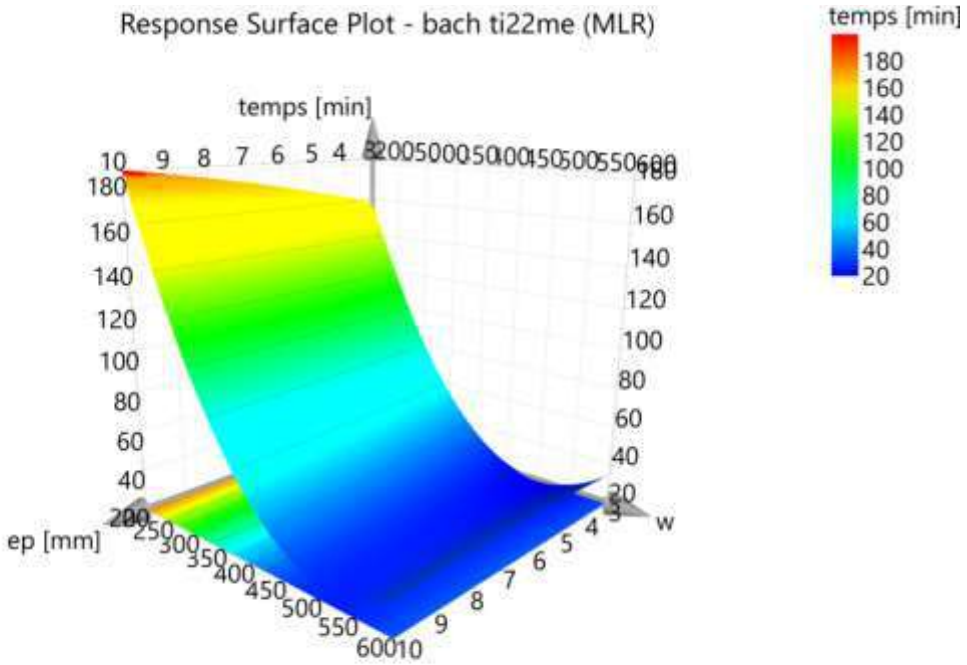


Figure III.A.27. Surface de réponse épi /w en fonction du temps de séchage (t_{eq}).

III.A.10.2.5.4. Représentation graphique de l'effet des facteurs

Le modèle présenté sur l'équation (III.2) exprime le temps d'équilibre (t) de séchage en fonction de deux facteurs et trois interactions entre les facteurs. L'effet de ces interactions est présenté sur la Figure III.A.28.

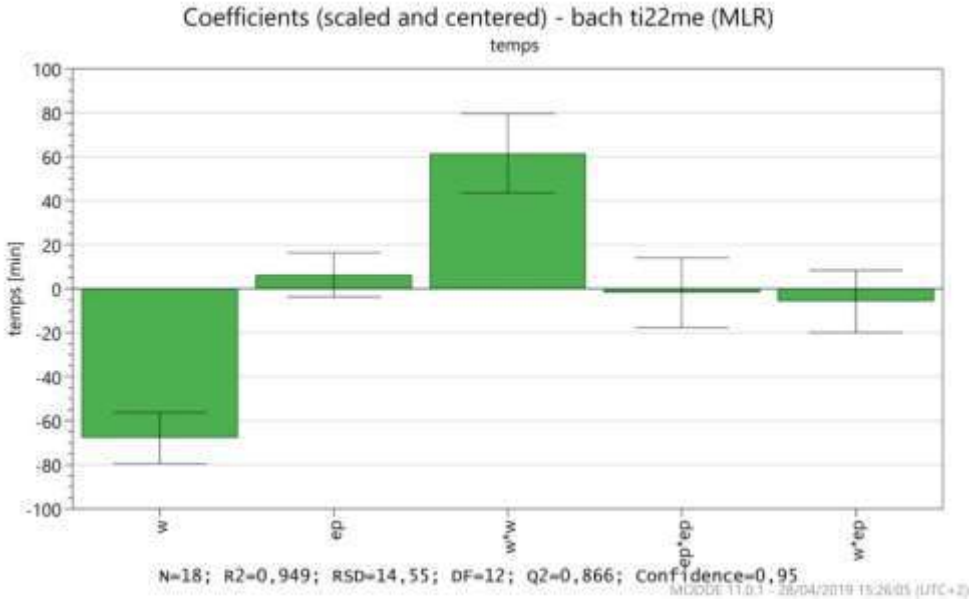


Figure III.A.28. Effets des facteurs sur la réponse

On constate un effet important de la puissance quadratique (w^2) et un effet modéré de l'épaisseur (ép.) et les deux sont de tendance positive sur le temps de séchage, mais l'interaction entre la puissance et l'épaisseur (w*épi), la puissance (W) et l'épaisseur quadratique (epi^2) sont défavorables au temps de séchage.

III.A.10.2.5.5. Courbes iso-réponse

La figure (III.29) montre les variations des facteurs sur la réponse et les minimaux locaux de chaque répartition

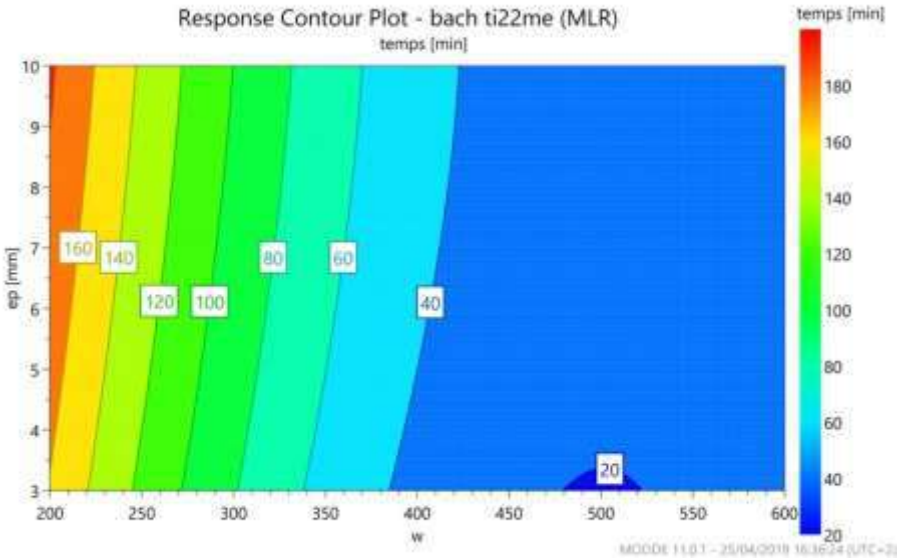


Figure III.A.29. Courbes iso-réponse.

Les résultats confirment l'importance de la puissance de micro onde par rapport aux autres facteurs, et mènent à dire que l'effet de l'épaisseur (épi) dans le cas du séchage par micro-onde est moins important.

Conclusion

La comparaison entre les deux types de séchage appliqués, conventionnel et micro-onde, a montré que l'utilisation de microonde réduit considérablement le temps de séchage. En effet, ce dernier est dans le cas de micro-onde à puissance 900W est diminué de 8 heurs et 20 minutes par rapport au séchage à l'étuve à 105°C.

Les résultats confirment aussi que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température et l'épaisseur appliquée. La puissance de micro onde très importante et influe largement sur la cinétique de séchage par rapport à l'épaisseur des tranches d'agrumes (orange et citron).

Chapitre III

Etude expérimental

Contribution B :

Modélisation mathématique et Modélisation par SVMR

III.B. Modélisation des cinétiques de séchage

III.B.1 Introduction

Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour décrire le processus de séchage. Ils peuvent être classés en modèles théoriques, modèles semi empiriques, modèles empiriques et modelé de l'intelligence artificielle (Parti 1990). Les modèles théoriques selon leur complexité, détaillent finement les mécanismes de transfert. Malheureusement, la difficulté d'obtention de certains paramètres limite parfois leur utilisation.

Les modèles semi-empiriques et empiriques, ne permettent pas de distinguer l'ensemble des mécanismes internes de transfert de l'eau. Cependant, à cause de leur aptitude à faire de bon ajustement, ils sont largement employés dans des travaux de séchage, particulièrement dans la description du comportement de l'eau dans le produit (Dadali, Elcin Demirhan, et al. 2007; Hii et al. 2009; Murthy et al. 2012).

❖ ***Teneur en eau réduite***

La teneur en eau des échantillons à tout instant *t* a été transformée en teneur en eau réduite (Darvishi et al. 2013). Cette dernière est calculée selon la formel (III.B.1).

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \qquad \text{(III.B.1)}$$

M, M_0, M_e sont les taux d'humidité du produit, respectivement à l'instant t , à l'équilibre et à l'instant initial (Charreau & Cavaille 1991).

La teneur en eau réduite a été simplifiée par la formel (III.B.2) parce que M_e est relativement négligeable comparativement à M et M_0 (Amadou 2007).

$$M_R = \frac{M}{M_0} \qquad \text{(III.B.2)}$$

❖ ***Analyse des transferts lors du séchage***

Après l'application de la méthode de plans d'expériences nous avons obtenu 18 cinétiques de séchage d'orange qui couvre la variation de la puissance et l'épaisseur, nous avons ajusté ces cinétiques représentés dans figures (III.B.1,…, III.B.6) sur les modèles proposés par les chercheurs.

III.B.3. Modélisation semi-empiriques et empirique

En général, le séchage en couche mince est utilisé pour sécher une couche des particules ou des tranches d'échantillon (Akpinar & Dincer 2005). Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse au cours du séchage. Les modèles peuvent être des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques.

Les modèles théoriques expliquent clairement les comportements du séchage du produit et peuvent être utilisés dans toutes les conditions du procédé, bien qu'ils comportent de nombreuses hypothèses provoquant des erreurs considérables. Les modèles théoriques les plus utilisés sont dérivés de la diffusion. De la même façon, les modèles semi-théoriques sont généralement issus de la deuxième loi de Fick et des modifications de ses formes simplifiées (d'autres modèles semi-théoriques sont dérivés de la loi de refroidissement de Newton). Ils sont plus simples et ont besoin de moins d'hypothèses en raison du recours à quelques résultats expérimentaux. D'autre part, ils ne sont valables que dans les conditions du procédé appliqué (Parry 1985).

Les modèles empiriques ont des caractéristiques similaires aux modèles semi empiriques. Ils dépendent fortement des conditions expérimentales et donnent des informations limitées sur les comportements de séchage du produit (Keey 1972). Parmi ceux-ci, les modèles les plus utilisés sont mentionné dans le tableau (III.B.3).

Le meilleur modèle a été choisi à l'aide de l'analyse de paramètres statistiques. Les paramètres sont présentés dans Tableau (III. B.2).

Tableau III. B. 2. Paramètres statistiques.

paramètres	Formule
Coefficient de corrélation	$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{exp,ave})(MR_{pre,i} - MR_{pre,ave})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp} - MR_{exp,ave})^2 \sum_{i=1}^{n}(MR_{pre} - MR_{pre,ave})^2}}$
Coefficient de détermination	$R^2 = 1 - \frac{SS\ résiduel}{SS\ Total\ corrigé}$
Racine d'erreur quadratique moyenne	$RMSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2\right\}^{\frac{1}{2}}$
Chi carré réduit	$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_{R\,exp,i} - M_{R\,pre,i})^2}{N-n}$
Ecart quadratique moyen	$RMSD = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}$
Erreur absolue moyenne	$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert MR_{exp,i} - MR_{pre,i}\rvert$
Erreur de biais moyenne	$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})$
Erreur quadratique moyenne	$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$
t – statistique	$t - stat = \left[\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}\right]^{\frac{1}{2}}$

Avec N nombre d'observations, n nombre de coefficients dans le modèle, $M_{R\ exp\ i}$ Teneur en eau réduite expérimentale pour la $i^{ème}$ observation et $M_{R\ pre\ i}$ Teneur en eau réduite prédite pour la $i^{ème}$ observation.

Tableau III. B. 3. Modèles proposés dans la littérature.

Nom de Modèle		Référence
MR1	Lewis	(V. et al 2007; Ghazanfari et al. 2006)
MR2	Page	(Kahveci & Cihan 2008; Doymaz & İsmail 2011)
MR3	Modifie Page I	(A. et al 2007)
MR4	Modifie Page II	(Vega et al. 2007; Lemus-Mondaca et al. 2009)
MR5	Modifie Page III	(Falade & Solademi 2010)
MR6	Modifie Page IV	(Babalis et al. 2006)
MR7	Modifie Page V	(Jazini & Hatamipour 2010)
MR8	Modifie Page VI	(Kurozawa et al. 2012)
MR9	Modifie Page VII	(Artnaseaw et al. 2010; Kaleta & Górnicki 2010)
MR10	Modifie Page IX	(PARDESHI et CHATTOPADHYAY 2010)
MR11	Otsura et al	(et al 2006)
MR12	Fick Simplifie	(OTSUKA, Kanzi, MURATA, Satoshi, et CHUMA 1975)
MR13	Henderson and Pabis	(GUNHAN, Tuncay, DEMIR, Vedat, HANCIOGLU, Ebru 2005)
MR14	Modifie Henderson and Pabis - I	(Koua et al. 2009; Shittu & Raji 2011)
MR15	Modifie Henderson and Pabis II	(Doymaz 2009; M. et al 2009)
MR16	Logaritmic	(Corzo et al. 2010)
MR17	TwoTerm	(Doymaz & İsmail 2010; Kayisoglu & Ertekin 2011)
MR18	Modifie TwoTerm - I	(Zenoozian et al. 2008; Sacilik & Unal 2005)
MR19	Modifie TwoTerm - II	(Demirhan & Özbek 2011)
MR20	Modifie TwoTerm- III	(Dadali, Elçin Demirhan, et al. 2007; Baini & Langrish 2007)

MR41	Wang et al Three Term	(Wang et al. 2004)
MR42	Demir et al	(et al 2010; Dadali, Elçin Demirhan, et al. 2007)
MR43	Haghi and Angiz – I	(Haghi, A.K., and Angiz 2007)
MR44	Haghi and Angiz – II	(Haghi, A.K., and Angiz 2007)

MR45	Haghi and Angiz – III	(Haghi, A.K., and Angiz 2007)
MR46	Haghi and Angiz – IV	(Haghi, A.K., and Angiz 2007)
MR47	Sripinyowanich and Noomhorm	(Sripinyowanich & Noomhorm 2011)
MR48	Noomhorm and Verma	(Noomhorm & Verma 1986; Kaleta & Górnicki 2010)
MR49	Hasibuan and Daud	(Hasibuan & Daud 2004; Daud et al. 2007)
MR50	SharefEldeen et al	(Sharaf-Eldeen et al. 1980; Wang et al. 2004)
MR51	Henderson and Henderson I	(Henderson, J.M., and Henderson 1968; Barrozo, M.A.S., Sartori, D.J.M., and Freire 2004)
MR52	Henderson and Henderson II	(Motta Lima & Massarani 1995; Henderson, J.M., and Henderson 1968)
MR53	Parabolic	(Doymaz 2011; Shittu & Raji 2011)
MR54	Geometric	(Celen et al. 2010; Hacıhafızoğlu et al. 2008)
MR55	Logistic	(C. et al 2007; Banout & Ehl 2010)
MR56	Power Law	(Vengaiah & Pandey 2007)
MR57	Regression – I	(Dupéré et al. 2007; Shi et al. 2008)
MR58	Chavez-Mendez et al	(Tunde-Akintunde 2011; Vengaiah & Pandey 2007)
MR59	Aghbashlo	(Shi et al. 2008)
MR60	Modifie Henderson and Perry	(Phoungchandang et al. 2008)
MR61	ThreeParameter	(Ademiluyi et al. 2008)
MR62	Asymptotic	(Phoungchandang & Kongpim 2012)
MR63	Alibas	(Alİbaş 2012)
MR64	Khazaei and Daneshmandi	(Khazaei & Daneshmandi 2007)

III. B. 3. 1. Méthodologie

Dans cette section, nous nous intéressons principalement à l'application des Algorithmes libellule pour obtenir les coefficients des modelés proposés dans la littérature pour la cinétique de séchage. Pour la détermination des coefficients, le logiciel MATLAB R2018a a été utilisé. Un organigramme décrivant le procédé d'optimisation utilisé pour déterminer les coefficients de chaque modèle est illustrée dans la figure III. B. 9.

III. B. 3. 2. Résultats de la modélisation

Dans cette partie, les cinétiques obtenus dans la phase expérimentale sont utilisées pour ajuster les modèles mathématiques. Pour évaluer la performance des différents modèles, les paramètres statistiques donnés dans le tableau III.B.1. Le meilleur modèle est correspond à

l'erreur RMSE la plus petite entre les 18 cinétiques. Les résultats obtenus sont analysés et servent à classifier les modèles par ordre décroissant de la précision, et il s'est avéré que le modèle proposé était le plus précis.

Les paramètres statistiques utilisés pour évaluer la performance des modèles semi-empiriques et empiriques qui décrivent la teneur en eau dans les tranches d'oranges au cours du séchage, sont résumés dans les tableaux III.B.4 et III.B.5 et sont présentés visuellement dans les figures III.B.10 et III.B.11,

La figure (III.B.1) représente les 31 meilleurs modèles optimisés par algorithme (DA) et la figure (III.B.2) représente un histogramme d'erreur des 10 meilleurs modèles retenus de la littérature en plus du modèle proposé dans ce travail, tandis que les autres modèles dont les erreurs sont élevées ne sont pas présentés dans l'histogramme.

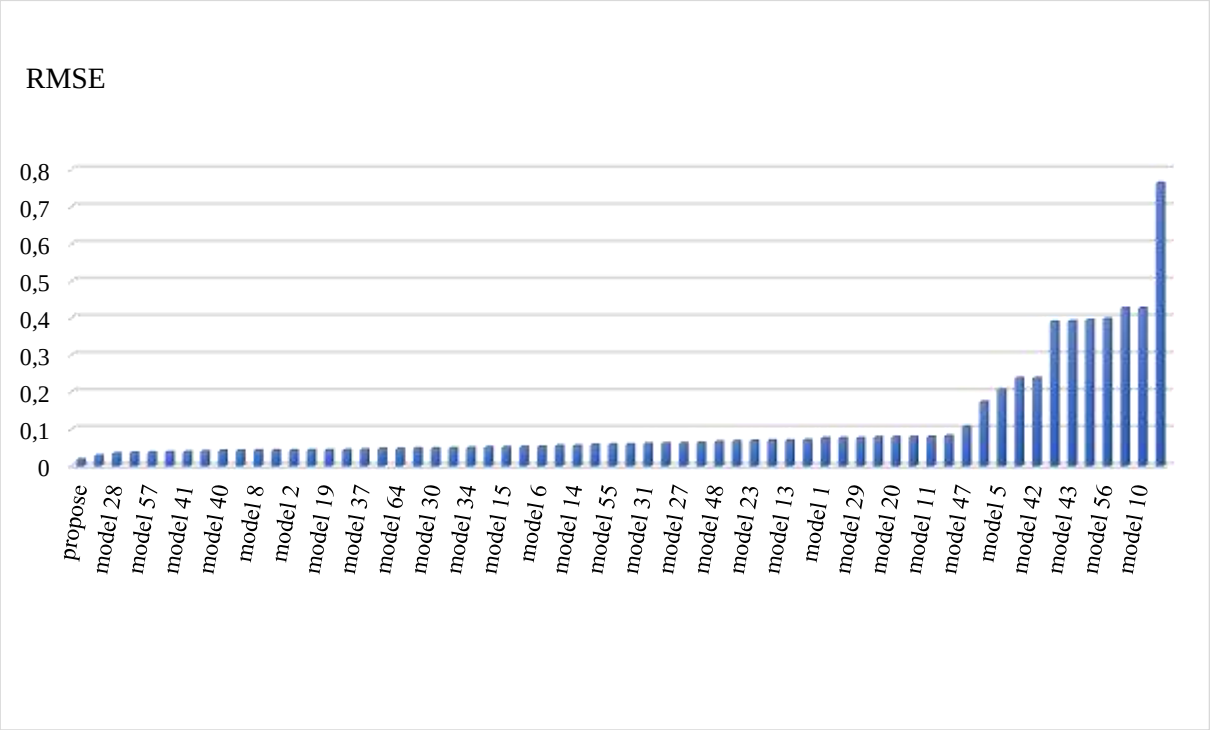


Figure III.B.1. Histogramme comparative d'erreur des 31 modèles de littérature avec le modèle proposé.

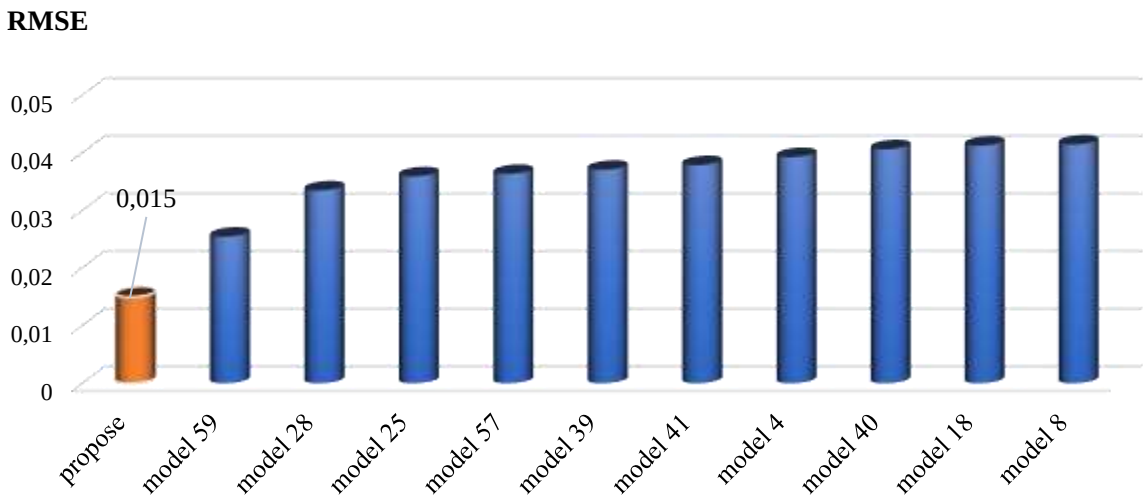


Figure III.B.2. Présentation graphique de variation de l'erreur des onze meilleurs modèles.

Tableau III.B.4 Résultats statistiques des meilleurs modèles dans la littérature et du modèle proposé.

Model	R	R2	RMSE	Chi II	RMSD	RES	MAE	MBE	MSE	T_STAT
MR 59	0.9923	0.9845	0.0255	0.0020	0.0023	0.7786	0.0261	0.0059	0.0020	6.5571
Propose	0.9976	0.9957	0,0149	0.0006	0.0012	0.2165	0.0143	0.0010	0.0006	0.6805

Tableau III.B.5. Résultats statistiques des 19 meilleurs modèles.

	100			200			300			400			500			600					
	3	6	10	3	6	10	3	6	10	3	6	10	3	6	10	3	6	10	Moyen	Min	Max
Propose	0,018	0,022	0,018	0,004	0,006	0,016	0,010	0,010	0,017	0,011	0,014	0,016	0,016	0,018	0,016	0,024	0,020	0,013	0,0150	0,004	0,024
Modèle59	0,024	0,025	0,022	0,011	0,017	0,031	0,019	0,017	0,025	0,022	0,026	0,018	0,034	0,028	0,026	0,052	0,043	0,015	0,0255	0,011	0,052
Modèle 28	0,041	0,048	0,028	0,033	0,031	0,039	0,020	0,037	0,034	0,040	0,059	0,037	0,028	0,023	0,018	0,042	0,033	0,013	0,0335	0,013	0,059
Modèle 25	0,041	0,042	0,030	0,048	0,028	0,044	0,034	0,035	0,033	0,047	0,035	0,046	0,028	0,044	0,020	0,044	0,034	0,016	0,0359	0,016	0,048
Modèle57	0,026	0,042	0,026	0,030	0,029	0,036	0,026	0,034	0,054	0,036	0,021	0,026	0,042	0,039	0,036	0,056	0,050	0,044	0,0363	0,021	0,056
Modèle 39	0,041	0,048	0,026	0,032	0,029	0,031	0,036	0,048	0,037	0,062	0,057	0,044	0,028	0,023	0,019	0,043	0,034	0,029	0,0371	0,019	0,062
Modèle 41	0,041	0,042	0,026	0,036	0,043	0,030	0,035	0,035	0,067	0,042	0,051	0,022	0,049	0,023	0,018	0,045	0,034	0,041	0,0379	0,018	0,067
Modèle 4	0,041	0,043	0,029	0,036	0,036	0,043	0,028	0,036	0,054	0,027	0,018	0,028	0,046	0,044	0,039	0,062	0,059	0,039	0,0393	0,018	0,062
Modèle 40	0,041	0,042	0,034	0,050	0,028	0,051	0,035	0,045	0,037	0,043	0,035	0,051	0,049	0,025	0,019	0,040	0,059	0,049	0,0406	0,019	0,059
Modèle 18	0,041	0,042	0,031	0,048	0,044	0,032	0,035	0,045	0,033	0,060	0,060	0,049	0,056	0,058	0,018	0,044	0,034	0,014	0,0412	0,014	0,060
Modèle 8	0,041	0,043	0,029	0,036	0,036	0,043	0,028	0,036	0,054	0,043	0,024	0,028	0,046	0,044	0,039	0,063	0,060	0,054	0,0415	0,024	0,063
Modèle 7	0,041	0,043	0,029	0,036	0,036	0,043	0,028	0,036	0,054	0,043	0,024	0,028	0,046	0,044	0,039	0,063	0,060	0,054	0,0415	0,024	0,063
Modèle 2	0,041	0,043	0,029	0,036	0,036	0,043	0,028	0,036	0,054	0,043	0,024	0,028	0,046	0,044	0,039	0,063	0,060	0,054	0,0415	0,024	0,063
Modèle 24	0,041	0,042	0,033	0,048	0,030	0,048	0,035	0,047	0,068	0,073	0,058	0,047	0,028	0,023	0,045	0,044	0,034	0,014	0,0422	0,014	0,073
Modèle 19	0,041	0,042	0,029	0,048	0,043	0,044	0,035	0,045	0,068	0,074	0,060	0,049	0,028	0,023	0,045	0,044	0,033	0,014	0,0424	0,014	0,074
Modèle 22	0,041	0,042	0,025	0,048	0,043	0,044	0,034	0,035	0,068	0,060	0,060	0,047	0,028	0,058	0,045	0,043	0,034	0,014	0,0427	0,014	0,068
Modèle 37	0,104	0,087	0,043	0,031	0,021	0,027	0,024	0,039	0,064	0,039	0,040	0,048	0,032	0,034	0,034	0,041	0,038	0,041	0,0437	0,021	0,087
Modèle 61	0,078	0,040	0,028	0,031	0,030	0,042	0,032	0,095	0,081	0,025	0,024	0,027	0,045	0,042	0,039	0,058	0,069	0,034	0,0457	0,024	0,095
Modèle 64	0,043	0,179	0,028	0,021	0,032	0,093	0,038	0,038	0,032	0,060	0,055	0,032	0,028	0,034	0,021	0,036	0,042	0,013	0,0458	0,013	0,179

III. B. 4. Modélisation par SVM

III. B. 4.2. Conception de la base de données

Choix des variables d'entrées et de sorties

Entrées (W, ep et t) tel que :

(W) Puissance variant entre (100, 200, 300, 400, 500, 600 et 900 W).

(ep) Epaisseur variant entre (3, 6,10 mm)

(t) Temps.

Sorties

Teneur en eau 'M_r' prenant des valeurs de (0 à 1).

Ce qui donne une matrice de 4 colonnes et 444 lignes.

III. B. 4.4. Mise en forme des données

Dans cette étape les données sont subdivisées en deux ensembles :

- Un ensemble pour l'apprentissage (75 % de la base).
- Un ensemble pour la phase de validation (25 % de la base).

III. B. 4.5. Optimisation de SVMR

Dans cette partie nous avons optimisé le SVMR par la méthode de libellule (dragonfly). Dans ce programme hybride appelé (DA-SVM), nous avons fixé les itérations à 30 et le nombre d'agents à 10 pour la recherche des paramètres.

Le programme contrôle les paramètres d'hyper plan (C, ε , n & σ) dans certains domaines voire C $\in$ [1e-3,1e3], $\sigma \in$[1e-3,1e3], $\varepsilon \in$[0,1], Ordre de polynôme « n » [2,5] et des fonctions de noyau 'Gaussien', 'linéaire', et 'polynomial'.

III. B. 4.6. Interprétation des résultats de modélisation par SVM

Pour évaluer la capacité prédictive de model DA-SVM, celui-ci doit être testé pour des données qui ont été exclues de la base d'apprentissage. Par conséquent le vecteur de régression linéaire des sorties calculées par le modèle SVMR optimal et les sorties cibles (expérimentales) avec le tracé de cette régression ont été utilisés comme critère d'évaluation de la capacité prédictive du model. Ceux-ci sont obtenus facilement à l'aide de la fonction ***postreg*** de MATLAB®.

A) Résultats avec noyau Polynomial

La figure III.B.12 montre la courbe de régression linéaire de la teneur en eau réduite M_R calculée par le DA-SVM optimisé avec la teneur en eau expérimentale

pour les deux phases: d'apprentissage et de validation, en utilisant la fonction de noyau Polynomiale avec un vecteur de régression [α (pente), β (ordonnée à l'origine), R (coefficient de corrélation)] = [0.95, 0.015, 0.974], et le tableau (III.B.5) récapitule les paramètres du modèle.

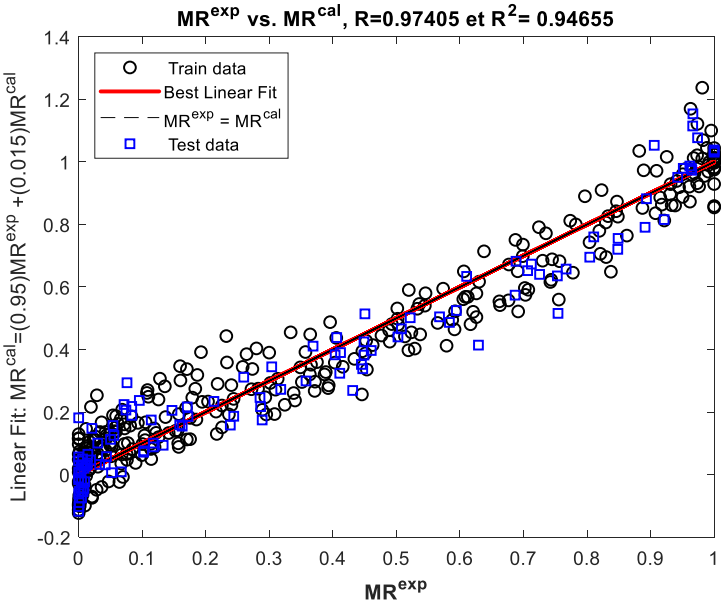


Figure III.B.3. Régression linéaire entre la M_R expérimentale et M_R calculée par le model SVM utilisant la fonction de noyau polynomiale.

Table III.B.5 résume les paramètres du modèle.

C	*Ordre de polynôme*	*Epsilon*	*Fonction*	*Quantité de vecteurs de support*	*RMSE apprentissage*	*RMSE test*	*RMSE ALL*
1	*3.4347*	*0.0067*	*Polynomial*	*333*	*0.0802*	*0.0819*	*0.0806*

III. B. 4.7. Comparaison entre les modèles semi-empiriques et le modèle DA-SVM

Les résultats illustrés dans le tableau (III.B.6) représentent une comparaison entre les RMSE obtenues par les meilleurs modèles de littérature, le modèle proposé et le modèle DA-SVM optimal.

Tableau III.B.6. RMSE moyen de quelques modèles étudiés dans ce travail.

Modèle 28	Modèle 59	Modèle proposée	Modèle DA-SVM
0,0335	0,0255	0,0150	0,0244

La figure III.B.14. Montre que le modèle proposé a présenté les meilleures aptitudes à prédire la cinétique de séchage de tranches d'orange.

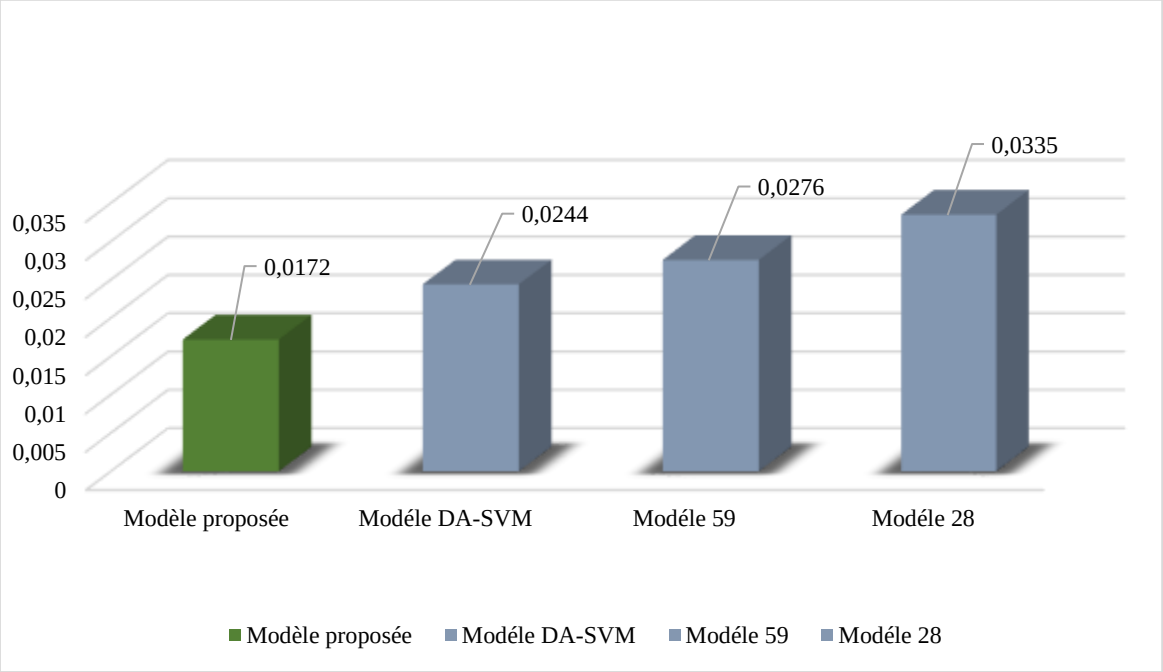


Figure III.B.4 Comparaison des erreurs de modèles

III. B.5. Conclusion

L'objectif de cette étude est de modéliser la cinétique de séchage par microonde de tranches d'orange. Soixante-quatre modèles semi-empiriques de la littérature et un autre proposé dans cette étude exprimant la teneur en eau réduite (MR) en fonction de temps de séchage ont été testés sur nos résultats expérimentaux (cinétiques de séchage) afin de trouver le modèle le plus approprié pour décrire la cinétique de séchage de tranches d'orange. Les résultats acquis ont été comparés avec la modélisation par DA-SVM qui regroupe toutes les cinétiques étudiées pour prédire la teneur en eau réduite MR.

Le modèle proposé a été choisi comme le modèle le plus approprié à décrire la cinétique de séchage de l'orange. Il a présenté respectivement un R^2 égale 0.9957 et un RMSE égale 0.015 pour les dix-huit cinétiques étudiées.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude et la modélisation de la cinétique de séchage de tranches d'agrumes (orange et citron) par deux méthodes (étuve et micro-onde). Pour cette fin, la teneur en eau réduite est considérée comme réponse ou sortie du modèle de cinétique de séchage, tandis qu'un ensemble de paramètres ayant potentiellement un effet considérable sur la sortie est choisis comme entrée. Ces paramètres sont l'épaisseur des tranches de fruits, la puissance de micro-onde, la température de l'étuve. En outre la réponse considérée pour designer la bonne méthode de séchage est le temps de séchage en plus de la teneur en eau réduite.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, il s'est avéré que le séchage par micro-onde est plus avantageux que le séchage conventionnel par étuve. En effet, l'utilisation de microonde réduit considérablement le temps de séchage, a savoir dans le cas de micro-onde à puissance 900W, le temps de séchage est diminué de 8 heurs et 20 minutes par rapport au séchage à l'étuve à 105°C.

L'effet des différents paramètres est étudié à l'aide d'expériences désignées par les plan des expériences. Les résultats confirment aussi que le temps de séchage est inversement proportionnel à la température et l'épaisseur appliquée. La puissance de micro onde très importante et influe largement sur la cinétique de séchage par rapport à l'épaisseur des tranches d'agrumes (orange et citron).

Une deuxième contribution dans le présent mémoire vise la modélisation empirique de la cinétique de séchage par micro-onde et comprend une comparaison entre le modèle proposé et soixante quatre modèles de la littérature. Tout les modèles considères dans cette partie expriment la teneur en eau réduite (MR) en fonction du temps de séchage et sont testés sur la base de données expérimentale résultante de la première partie du travail (cinétiques de séchage) et la comparaison sert à trouver le modèle le plus approprié pour décrire la cinétique de séchage de tranches d'orange. Les résultats acquis sont comparés avec la modélisation par DA-SVM qui regroupe toutes les cinétiques étudiées pour prédire la teneur en eau réduite MR.

Le modèle empirique proposé dans ce travail est repéré comme le modèle le plus approprié pour décrire la cinétique de séchage de tranches d'orange. Ce modèle présenté un coefficient de détermination R^2 égale à 0.9957 et une racine d'erreur quadratique moyenne RMSE égale à 0.015 pour les dix-huit cinétiques étudiées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I

Abada, S., 2009. Séchage des poudres pharmaceutique. these de magister.

Arlabosse, P., 2008. Séchage industriel. Tech. l'ingénieur.

Atritor, 2017. Produits et Industries [WWW Document]. URL http://www.atritor.com/fr/products/ast-dryer (accessed 2.1.17).

AVA, 2016. directindustry [WWW Document]. URL http://www.directindustry.fr/prod/ava-huep-gmbh-u-co-kg/product-83123-959203.html (accessed 2.1.17).

Azprocede [WWW Document], 2007. URL http://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage_fluidisation.html (accessed 1.31.17).

Baillon, B., 1996. Séchage sous vide micro-ondes combinés de granulés pharmaceutiques. these Dr.

Bantle, M., Käfer, T., Eikevik, T.M., 2013. Model and process simulation of microwave assisted convective drying of clipfish. Appl. Therm. Eng. 59, 675–682.

Benkhelfellah, S.E. mokretar, Miri, R., Belhamel, M., 2005. Séchoirs solaires. Etudes comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèle de types direct et indirect.

Bennamoun, L., Belhamri, A., 2007. Contribution à l'étude de faisabilité de séchoirs solaires pour les produits agricoles Revue des Energies Renouvelables. CER.

Bimbenet, J.., 1984. Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cah. du génie Ind. Aliment.

Bonazzi, C., Bimbenet, J.-J., 2003. Séchage des produits alimentaires. Principes. Tech. l'ingénieur 1–14.

Buffler, C.R., 1993. Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist.

Busin, L., Mortazavi, F., Bimbenet, J.., 1995. Étude expérimentale du séchage par atomisation de solutions sucrées. Ind. Aliment. Agric. 112.

Cavaillé, R., Charreau, A., 1995. Séchage: théorie et calculs. Tech. l'ingénieur 1–23.

Charpentier, J.C., 1996. génie des procédés. Tech. de'Ingénieur.

Charreau, A., Cavaille, R., 1991. Séchage théorie et pratique. Tech. de'Ingénieur.

Claude, J., 1993. Contribution à l'étude du séchage en discontinue d'acide adipique en lit fluidisé. Thèse Dr.

Copson, D.A., 1975. Microwave Heating, AVI Publication Comp. Inc. Westport, Connect.

Degremont [WWW Document], 2017. URL http://www.degremont.fr/fr/savoir-faire/eaux-municipales/traitement-des-boues/sechage-mixte-a-recuperation-d-energie-innodry-2e/

(accessed 2.3.17).

Djerroud, D., 2010. Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation. Dr. Diss. 1–181.

Energie [WWW Document], 2017. URL http://www.energieplus-lesite.be/index.php (accessed 1.31.17).

Friedman, S.J., Marshall, W.R., 1949. STUDIES IN ROTARY DRYING. 2. HEAT AND MASS TRANSFER. Chem. Eng. Prog. 45, 573–588.

Gevaudan, A., 1989. Etude du séchage par contact de milieux granulaires agités, Application à l'opération de cuisson-séchage de manioc.

Jannot, Y., 2008. Isothermes de sorption : modèles et détermnation. Solutions 1–16.

Jeantet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G., 2006. Sciences des aliments. 1 Stabilisation biologique et physicochimique., 1st ed. Paris.

Karaouani, I., 2013. Est-ce qu'un sécheur avec chaleur de compression est adéquat pour votre système? [WWW Document]. Mag. MCI. URL http://magazinemci.com/2013/08/26/est-ce-quun-secheur-avec-chaleur-de-compression-est-adequat-pour-votre-systeme/ (accessed 1.31.17).

Koller, E., 2009. Aide-mémoire Génie chimique, 3rd ed. Paris.

Li, Z., Raghavan, G.S. V, Orsat, V., 2010. Temperature and power control in microwave drying. J. Food Eng. 97, 478–483.

Marcel Loncin, 1961. Livres sur Google Play Les opérations unitaires du génie chimique.

Maskan, M., 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. J. Food Eng. 48, 177–182.

Mathavi, V., Sujatha, G., Ramya, S.B., Devi, B.K., 2013. New trends in food processing. Int. J. Adv. Eng. Technol. 5, 176.

McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., 1985. Unit operation of chemical engineering. Paris.

Medibalt [WWW Document], 2017. URL http://www.medibalt.info/en/products/details/15 (accessed 2.1.17).

Mennouche, D., 2006. Valorisation des prodruit agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire. Thèse de Magistère.

Mujumdar, A.., 1987. Handbook of Industrial Drying.

Puiggali, J., Nadeau, J., 1995. Séchage, des processus physiques aux processus industriels Nadeau.

Ranjbaran, M., Zare, D., 2013. Simulation of energetic-and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. Energy 59, 484–493.

Rankelli, A., Lieberman, H., Schiffman, R., 1996. Drying, the theory and practice of industrial pharmacy. Philadelphia.

Saravacos, G.D., 1995. Mass transfer properties of foods. In Engineering properties of foods.

Scaman, C.H., Durance, T.D., 2005. Combined microwave vacuum drying. Emerging technologies for food processing (pp. 507–530).

Seed Processing [WWW Document], 2017. URL http://seedprocessing.nl/fr/17/123/s%25C3%25A9choirs_de_semences_.html (accessed 2.1.17).

Seghier, A., Rouas, S., 2016. Étude du retrait au cours du séchage des fruits Soutenu. these de Master.

Singh, R.P., Heldman, D.R., 2001. Introduction to food engineering. Gulf Professional Publishing.

Sosa-Morales, M.E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A., García, H.S., 2010. Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications. LWT-Food Sci. Technol. 43, 1169–1179.

Trichaiyaporn, S., 1991. Contribution à l'étude du séchage en discontinu de sucre cristalisé en lit fluidisé. these Dr.

Yılmaz, I., Arıcı, M., Gümüş, T., 2005. Changes of microbiological quality in meatballs after heat treatment. Eur. Food Res. Technol. 221, 281–283.

Verdier N-A, Sadat A-W, Clément D-A, Emmanuel N-A et Georges N-A. (2016). Impact of Solar and Microwave Oven Drying on A Few Chemical Parameters of Market Value Quality of Fermented Forastero (Theobroma Cacao L.). Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 12(4): 402-406.

Chapitre II

Boot, J. C. G. (1964). Quadratic programming: algorithms, anomalies, applications. *Quadratic Programming: Algorithms, Anomalies, Applications.*

DJEFFAL, A. (2012). Utilisation des méthodes Support Vector Machine (SVM) dans l'analyse des bases de données. Université Mohamed Khider-Biskra.

Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikström, C., & Wold, S. (2000). Design of experiments. *Principles and Applications*, 172–174.

Gendre, Savary, & Soulier. (2009). Les plans d'expériences, 1–14.

Goupy, & Creighton. (2006). *Introduction aux plans d'experiences*. (Donud, Ed.) (3ème). Paris.

Rabier. (2007). Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement

dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire, 239 pages.

Schölkopf, B., Smola, A. J., & Bach, F. (2002). *Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond*. MIT press.

Smola, A. J. (1996). Regression estimation with support vector learning machines. Master's thesis, Technische Universität München.

Umetrics. (2014). *User guide to Modde. User Guide to Modde* (Vol. 11). Sweden, Stortorget 21.

Chapitre III

Akpinar, E.K., 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of food engineering*, 73(1), pp.75–84.

Akpinar, E.K. & Dincer, I., 2005. Moisture transfer models for slabs drying. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(1), pp.80–93. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193304002064 [Accessed April 16, 2017].

Akpınar, S. & Bayhan, G.M., 2011. A hybrid genetic algorithm for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations and zoning constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(3), pp.449–457.

Amadou, H., 2007. *Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines*. Strasbourg 1.

Arslan, D. & Özcan, M.M., 2012. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content, and color characteristics of savory leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), pp.983–991.

Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S. & Benjapiyaporn, C., 2010. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2–3), pp.105–114.

Babalis, S.J. et al., 2006. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (Ficus carica). *Journal of Food Engineering*, 75(2), pp.205–214.

Baini, R. & Langrish, T.A.G., 2007. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79(1), pp.330–343.

Banout, J. & Ehl, P., 2010. Using a Double-pass solar drier for drying of bamboo shoots. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 111(2), pp.119–127.

Barrozo, M.A.S., Sartori, D.J.M., and Freire, J.T., 2004. A study of the statistical discrimination of the drying kinetics equations. *Food and Bioproducts Processing*, 82 : 219-2.

Celen, Y.T., Hedner, J. & Carlson, J., 2010. Impact of gender on incident diabetes mellitus in obstructive sleep apnea: a 16-year follow-up. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 6(03), pp.244–250.

Références bibliographiques

Charreau, A. & Cavaille, R., 1991. Séchage théorie et pratique. *Technique de'Ingénieur*.

Chen, J. et al., 2001. A stabilized conforming nodal integration for Galerkin mesh-free methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 50(2), pp.435–466.

Corzo, O., Bracho, N. & Alvarez, C., 2010. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages. *Journal of food processing and preservation*, 34(6), pp.993–1008.

Dadali, G., Demirhan, E. & Özbek, B., 2007. Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying technology*, 25(10), pp.1713–1723.

Dadali, G., Demirhan, E. & Özbek, B., 2007. Microwave heat treatment of spinach: Drying kinetics and effective moisture diffusivity. *Drying Technology*, 25(10), pp.1703–1712.

Darvishi, H. et al., 2013. Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), pp.121–127. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X12000343 [Accessed April 17, 2017].

Daud, Y., Lucas, M. & Huang, Z., 2007. Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1–3), pp.179–190.

Demirhan, E. & Özbek, B., 2010. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of purslane undergoing microwave heat treatment. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27(5), pp.1377–1383.

Demirhan, E. & Özbek, B., 2011. Thin-layer drying characteristics and modeling of celery leaves undergoing microwave treatment. *Chemical Engineering Communications*, 198(7), pp.957–975.

Doymaz, I., 2008. Drying of leek slices using heated air. *Journal of food process engineering*, 31(5), pp.721–737.

Doymaz, I., 2009. Mathematical modelling of thin-layer drying of kiwifruit slices. *Journal of Food processing and preservation*, 33, pp.145–160.

Doymaz, İ., 2011. Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. *Heat and Mass Transfer*, 47(3), pp.277–285.

Doymaz, İ. & İsmail, O., 2010. Drying and rehydration behaviors of green bell peppers. *Food Science and Biotechnology*, 19(6), pp.1449–1455.

Doymaz, İ. & İsmail, O., 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and bioproducts processing*, 89(1), pp.31–38.

Dupéré, V. et al., 2007. Méthodes d'analyse du changement fondées sur les trajectoires de développement individuelle: Modèles de régression mixtes paramétriques et non paramétriques [1]. *Bulletin of Sociological Methodology/Bulletin de Méthodologie Sociologique*, 95(1), pp.26–57.

Erbay, Z. & Icier, F., 2009a. Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer. *Drying Technology*, 27(3), pp.416–427.

Références bibliographiques

Erbay, Z. & Icier, F., 2009b. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of food engineering*, 91(4), pp.533–541.

et al, A., 2007. Thin-layer drying kinetics of sesame hulls under forced convection and open sun drying. *Journal of food process engineering*, 30(3), pp.324–337.

et al, C., 2007. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of food engineering*, 79(1), pp.293–298.

et al, D., 2010. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. *International journal of food science & technology*, 45(9), pp.1956–1962.

et al, K., 2006. Duration of hypotension before initiation of effective antimicrobial therapy is the critical determinant of survival in human septic shock. *Critical care medicine*, 34(6), pp.1589–1596.

et al, M., 2009. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. *Applied Thermal Engineering*, 29(14–15), pp.2849–2854.

et al, P., 2009. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology*, 27(2), pp.288–295.

et al, V., 2007. Studies on thin layer drying of bagasse. *International Journal of Energy Research*, 31(4), pp.422–437.

Falade, K.O. & Solademi, O.J., 2010. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International journal of food science & technology*, 45(2), pp.278–288.

Ghazanfari, A. et al., 2006. Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. *Drying Technology*, 24(12), pp.1637–1642.

GUNHAN, Tuncay, DEMIR, Vedat, HANCIOGLU, Ebru, et a, 2005. Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46, n.

Hacıhafızoğlu, O., Cihan, A. & Kahveci, K., 2008. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *food and bioproducts processing*, 86(4), pp.268–275.

Haghi, A.K., and Angiz, F.Z., 2007. Heat and mass transfer in thermal drying of wool. *a theoretical approach. The Proceedings of the 5th Asia-Pasific Drying Conference*, 1 : 443-44.

Hasibuan, R. & Daud, W.R.W., 2004. Through drying of oil palm empty fruit bunches (EFB) fiber using superheated steam. *Drying 2004*, 100, pp.2027–2034.

Henderson, J.M., and Henderson, S.M., 1968. A computational procedure for deep-bed drying analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 13 : 87–95.

Henriques, F., Guiné, R.P.F. & Barroca, M.J., 2012. Influence of drying treatment on physical properties of pumpkin. *Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam*, 7(SPECIAL ISSUE-7th), pp.53–58.

Hii, C.L., Law, C.L. & Cloke, M., 2009. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90(2), pp.191–198. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877408003105 [Accessed April 11, 2017].

Références bibliographiques

Jazini, M.H. & Hatamipour, M.S., 2010. A new physical pretreatment of plum for drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2–3), pp.133–137.

Jena, S. & Das, H., 2012. Moisture sorption studies on vacuum dried coconut presscake. *Journal of food science and technology*, 49(5), pp.638–642.

Kadam, D.M. & Dhingra, D., 2011. MASS TRANSFER KINETICS OF BANANA SLICES DURING OSMO-CONVECTIVE DRYING. *Journal of Food Process Engineering*, 34(2), pp.511–532.

Kahveci, K. & Cihan, A., 2008. *Drying of food materials: transport phenomena*, Nova Science Publishers.

Kaleta, A. & Górnicki, K., 2010. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. *International journal of food science & technology*, 45(5), pp.891–898.

Kayisoglu, S. & Ertekin, C., 2011. Vacuum drying kinetics of barbunya bean (Phaseolus vulgaris L. elipticus Mart.). *The Philippine Agricultural Scientist*, 94(3).

Keey, R.B., 1972. Chapitr12 – Engineering. In *Drying*. pp. 303–339. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080169033500225 [Accessed April 16, 2017].

Koua, K.B. et al., 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy*, 34(10), pp.1594–1602.

Kumar, N., Sarkar, B.C. & Sharma, H.K., 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of food science and technology*, 49(1), pp.33–41.

Kurozawa, L.E., Hubinger, M.D. & Park, K.J., 2012. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108(1), pp.43–50.

Lemus-Mondaca, R. et al., 2009. Dehydration characteristics of papaya (Carica Pubenscens): determination of equilibrium moisture content and diffusion coefficient. *Journal of Food Process Engineering*, 32(5), pp.645–663.

Miranda, M. et al., 2010. Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (Chenopodium quinoa Willd.). *Industrial Crops and Products*, 32(3), pp.258–263.

Motta Lima, O.C. & Massarani, G., 1995. Analyse of the drying equations. *ENEMP*, 23, pp.431–440.

Mundada, M., Hathan, B.S. & Maske, S., 2010. Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering*, 107(4), pp.307–316.

Murthy, K., Pandurangapp, T. & Manohar, B., 2012. Microwave drying of mango ginger (Curcuma amada Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(6), pp.1229–1236.

Noomhorm, A. & Verma, L.R., 1986. Deep-bed rice drying simulation using two generalized single-layer models. *Transactions of the ASAE*, 29(5), pp.1456–1461.

Références bibliographiques

OTSUKA, Kanzi, MURATA, Satoshi, et CHUMA, Y., 1975. An empirical equation for thin layer drying of rough rice with heated ai. *JOURNAL of the JAPANESE SOCIETY of AGRICULTURAL MACHINERY*, 37, n, p. r., ,.

Özdemir, M. & Onur Devres, Y., 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), pp.225–233. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877499001260 [Accessed April 16, 2017].

PARDESHI et CHATTOPADHYAY, P.K., 2010. Hot air puffing kinetics for soy-fortified wheat-based ready-to-eat (RTE) snacks. . *Food and bioprocess technology*,, 3, no.

Parry, J.L., 1985. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(1), pp.1–29. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021863485901167 [Accessed April 16, 2017].

Parti, M., 1990. A theoretical model for thin-layer grain drying. *Drying Technology*. Available at: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939008959866 [Accessed May 6, 2017].

Parti, M., 1993. Selection of Mathematical Models for Drying Grain in Thin-Layers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 54(4), pp.339–352. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021863483710267 [Accessed April 16, 2017].

Phoungchandang, S., Srinukroh, W. & Leenanon, B., 2008. Kaffir lime leaf (Citrus hystric DC.) drying using tray and heat pump dehumidified drying. *Drying Technology*, 26(12), pp.1602–1609.

Sacilik, K. & Unal, G., 2005. Dehydration characteristics of Kastamonu garlic slices. *Biosystems engineering*, 92(2), pp.207–215.

Sharaf-Eldeen, Y.I., Blaisdell, J.L. & Hamdy, M.Y., 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5(4), pp.1261–1265.

Shi, Y. et al., 2008. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic fibroblasts by Oct4 and Klf4 with small-molecule compounds. *Cell stem cell*, 3(5), pp.568–574.

Shittu, T.A. & Raji, A.O., 2011. Thin layer drying of African Breadfruit (Treculia africana) seeds: modeling and rehydration capacity. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), pp.224–231.

Sobukola, O.P., Dairo, O.U. & Odunewu, A.V., 2008. Convective hot air drying of blanched yam slices. *International journal of food science & technology*, 43(7), pp.1233–1238.

Sripinyowanich, J. & Noomhorm, A., 2011. A new model and quality of unfrozen and frozen cooked rice dried in a microwave vibro-fluidized bed dryer. *Drying technology*, 29(7), pp.735–748.

Thompson, T.L., Peart, R.M. & Foster, G.H., 1968. Matllematical Simulation of Corn Drying A New Model. *Transaction of the ASAE*, 11(4), pp.582–586.

Tirawanichakul, Y. & Tirawanichakul, S., 2008. Mathematical model of fixed-bed drying and

strategies for crumb rubber producing STR20. *Drying Technology*, 26(11), pp.1388–1395.

Tunde-Akintunde, T.Y., 2011. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable energy*, 36(8), pp.2139–2145.

Vega, A. et al., 2007. Hot-air drying characteristics of Aloe vera (Aloe barbadensis Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 40(10), pp.1698–1707.

Vengaiah, P.C. & Pandey, J.P., 2007. Dehydration kinetics of sweet pepper (Capsicum annum L.). *Journal of Food Engineering*, 81(2), pp.282–286.

Verma, L.R. et al., 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), pp.296–301.

Wang, Z. et al., 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4), pp.600–612.

Yi, X.-K. et al., 2012. Thin-layer drying characteristics and modeling of Chinese jujubes. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.

Zenoozian, M.S. et al., 2008. Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. *Journal of Food processing and Preservation*, 32(1), pp.88–102.