

DOC/531.6-14/02

+

Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen
Faculté des Sciences. Département de Physique
Et
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
Ecole Doctorale M.E.G.A
(I.N.S.A. de Lyon)

Conformément à la convention internationale de Cotutelle de
thèse du 26/10/2004

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TLEMCCEN

Et

DOCTEUR DE L'I.N.S.A. DE LYON

Spécialité : PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX

Présentée et soutenue publiquement
par

Boumediene TOUATI

Sur le thème :

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU SECHAGE
SOLAIRE DES FEUILLES DE LA MENTHE VERTE
(Mentha viridis)

Soutenue le 12/11/2008

Devant le jury de thèse :

Président	M ^f N. CHABANE-SARI	Professeur à l'URMER de Tlemcen, Algérie
Directeur de thèse	M ^f B. BENYOUCEF	Professeur à l'URMER de Tlemcen, Algérie
Co-Directeur de thèse	M ^f J. VIRGONE	M. C., HDR à l'ENPE de Lyon1, France
Direction scientifique	M ^f B. LIPS	M. C. au CETHIL de Lyon, France
Rapporteur	M ^{me} A. CHAKER	Professeur à l'Université. de. Constantine, Algérie
Rapporteur	M ^f A. BELGHIT	Professeur à l'université de la Rochelle, France

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse de cotutelle a été réalisé au centre de thermique de Lyon (CETHIL), INSA de Lyon, en collaboration avec l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables de Tlemcen (URMER), Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen. La partie expérimentale de ce sujet de recherche a été réalisée au Laboratoire d'Énergétique Solaire et des Plantes Aromatiques et Médicinales (LESPAM) de l'École Normale Supérieure de Marrakech.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le Professeur Boufeldja TABTI, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, pour les efforts qu'il déploie afin de développer la recherche au sein de la Faculté.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Michelle SEIGNOL, Directeur de l'école Doctorale MEGA, d'avoir accepté de m'inscrire en thèse de cotutelle, pour les moyens et les aides qui m'ont permis de mener ces recherches jusqu'à leur terme.

Je tiens à remercier le Professeur Mohammed KOUHILA, Directeur du Laboratoire d'Énergétique Solaire et Plantes Aromatiques et Médicinale (LESPAM) et D. Escudié, Directrice du centre de thermique de Lyon (CETHIL) qui m'ont accueilli dans leurs établissements et qui ont mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à terme ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Monsieur Boumediene BENYOUCEF, Professeur à la Faculté des Sciences de Tlemcen et Directeur de l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URERM) de Tlemcen, a dirigé mes travaux avec générosité et assistance tout le long de ce travail. Je tiens à lui exprimer mes vifs remerciements pour l'aide scientifique incessante et l'entière confiance qu'il m'a toujours témoignée tout au long de ce travail.

Monsieur Joseph VIRGONE, Maître de conférence à l'université Lyon1 a accepté de diriger cette thèse en y apportant sa rigueur scientifique, son sens critique et qui a bien voulu m'accueillir au sein de son équipe de recherche, qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Monsieur Bernard LIPS, Maître de conférence au CETHIL de l'INSA de Lyon a dirigé scientifiquement ce travail avec une attention inlassable et une disponibilité remarquable. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour le soutien et l'entière confiance qu'il m'a toujours témoignés tout au long de ces années. L'aboutissement de ce travail lui doit beaucoup pour l'amitié et la bonne humeur si précieuses les jours de doute et de découragement.

Je désire exprimer mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur, NesrEddine CHABANE SARI, Professeur à de l'Unité de Recherche Matériaux et des Energies Renouvelables et de Tlemcen (URERM), pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance de ce travail

Que Madame Abla CHAKER, Professeur à l'Université de Constantine, trouve ici mon remerciement chaleureux pour l'intérêt qu'elle a accordée à ce travail en acceptant de participer au jury d'examen de cette thèse.

C'est avec plaisir que je remercie Monsieur Abelhamid BELGHIT, Professeur à l'université de la Rochelle pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail en acceptant de participer au jury pour rapporter ce travail.

Je suis particulièrement redevable à Monsieur Abdelkrim JAMALI, Professeur assistant à l'E.N.S. de Marrakech, et Madame Leila AIT MOHAMMED, Docteur en Chimie Organique qui m'ont profité de leur temps précieux et leurs grandes qualités humaines pour aplanir les difficultés que j'ai pues rencontrées et m'ont témoigné toute leur confiance pour la réalisation de ce travail.

Il est aussi important de remercier très sincèrement ma chère épouse Messaouda et nous enfants Issam Eddine Allal, Manar et Malak Houda dont le soutien indéfectible ma été d'un grand réconfort durant toutes ces années passées près ou très loin d'eux.

Ce travail a été finalisé au Centre de Thermique de Lyon (CETHIL) dans le cadre d'une bourse Algérienne (BA) de dix huit mois, je tiens à remercier notre tutelle et très sincèrement toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

- *A la mémoire de mes très chers parents.*
- *A la mémoire de ma très chère tante Zohra.*
- *A ma très chère épouse Messaouda et mes chers enfants Issam Eddine Allal, Manar et Malak Houda.*
- *A mes frères Jamel, Ahmed, leurs épouses et enfants.*
- *A ma sœur Mounira son époux et ces enfants.*
- *A toute ma famille.*
- *A mes beaux parents Hadj et Hadja.*
- *A tous mes ami(e)s en particulier, mes amis frères Mohammed Sadok et Mohamed laïd Yaïchi.*
- *A tous ceux qui me sont chers*

RESUME

Les plantes médicinales et aromatiques et en particulier les feuilles de la menthe verte ont beaucoup d'importance pour la pharmacopée, la parfumerie, la confiserie et la liquoristerie. Ce travail entre dans le cadre de la valorisation de cette plante produite en grande quantité dans le sud et le sud-ouest algérien. Il s'agit d'étudier le séchage de cette plante et de développer l'utilisation de l'énergie pour sécher la *Mentha viridis*.

Afin de développer un code de calcul permettant de simuler le séchage solaire en convection forcée de cette plante, une détermination expérimentale des isothermes de sorption a été menée à l'aide de la méthode des solutions de sels saturés. Les courbes de sorption ainsi obtenues sont ensuite approchées par des modèles empiriques et semi-empiriques utilisables dans un modèle numérique d'un séchoir.

Une autre étude expérimentale est consacrée à la détermination des cinétiques de séchage dans des conditions contrôlables ainsi que dans un séchoir solaire. Les courbes de perte de masse et l'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant sont étudiées dans le but de déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS), et par conséquent la corrélation empirique exprimant la vitesse de séchage de la menthe verte étudiée.

Par la suite les deux corrélations ainsi obtenues sont introduites dans un programme écrit en Fortran afin de valider les résultats expérimentaux de la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps pour les modes de séchage et d'étudier l'influence de la température, du débit, de l'hygrométrie de l'air asséchant et de la masse initiale des feuilles de menthe.

Afin de dimensionner notre séchoir une étude paramétrique basée sur la technique des plans d'expérience est menée.

Le modèle développé dans ce travail permettra de dimensionner un séchoir et d'étudier son fonctionnement dans le cas d'utilisation avec un capteur solaire afin de définir les conditions optimales de séchage.

Mots clefs : Menthe verte – Isothermes de sorption – Cinétiques de Séchage convectif – Séchoir solaire – Expérimentation – Modélisation – plan d'expérience.

ملخص الرسالة

تكتسي الأعشاب الطبية و العطرية، لاسيما أوراق النعناع أهمية كبرى في الطب التقليدي (طب الأعشاب) وصناعة العطور والحلويات والمشروبات. ويندرج هذا البحث في إطار تامين هذه العشبة التي يتم إنتاجها بكميات كبيرة في الجنوب والجنوب الغربي الجزائري، يتعلق الأمر إذا بعملية تجفيف هذا النوع من النعناع وبتطوير استعمال الطاقة الشمسية في هذه العملية.

ومن أجل تطوير رمز حسابي يُمكن من محاكاة التجفيف الشمسي بالحمل الحراري القسري لهذه النبتة، تم إيجاد تحديد تجريبي لمنحنيات الامتصاص التّحارريّة، بواسطة تقنية إذابة الأملاح المشبعة ، ويتم بعد ذلك مقارنة هذه المنحنيات الناتجة بنماذج امبريقية، أو شبه امبريقية قابلة للاستعمال في نموذج رقمي لمُجففة. وتناول البحث دراسة تجريبية أخرى يتعلّق بقياس حركات التجفيف في ظروف متحكم فيها وكذا داخل مجففة شمسية.

وتمت دراسة منحنيات فقدان الكتلة، وتأثير درجة الحرارة وسرعة الهواء المجفف بهدف تحديد المنحنى المميز لعملية التجفيف، وبالتالي المعادلة الرياضية المعبرة عن سرعة تجفيف النعناع الأخضر موضوع البحث. بعدئذ تم إدخال المعادلتين المحصل عليهما في برنامج معلوماتي قصد إثبات النتائج التجريبية لنسبة الرطوبة وسرعة التجفيف بدلالة الزمن أثناء عمليات التجفيف وكذا دراسة العوامل المؤثرة على التجفيف ونخص بالذكر :

درجة الحرارة، سبب الهواء، درجة رطوبة الهواء وكذا الكتلة الابتدائية لأوراق النعناع. تم إنجاز دراسة براميتريّة تعتمد على تقنية مخططات التجارب وذلك من أجل تحديد أبعاد المجففة.

يُمكن هذا النموذج الذي تم تطويره في هذا البحث من دراسة أبعاد المجففة وكذا اشتغالها في حالة استعمال لاقط شمسي من أجل تعيين الظروف المثالية للتجفيف.

كلمات أساسية : النعناع الأخضر، منحنيات المج و الامتصاص، حركات التجفيف بواسطة

الحمل الحراري القسري، مجففة شمسية، التجريب، النمذجة، مخطط التجربة.

ABSTRACT

Medicinal and aromatic plants and particularly green mint leaves have a great importance for chemistry perfuming, confisery and liquoristry. The present work deals with the vaporisation of this plant produced in great quantities in the south and south west of Algeria. It is a study of the drying of this plant and to develop the energy use to dry the *Mentha viridis*.

In order to develop a calculating code that permits to simulate solar drying in a forced convection of this plant, an experimental determination of sorption isotherms has been led with the help of the solutions method of state salts. Sorption curves thus obtained are then approached by empiric and semi empiric models used in a numerical model of drying.

Another experimental study is devoted to the drying kinetic determination in the controlled conditions and in a solar drying. The mass loss curves and the influence of the temperature and seed dried air are studied to determine drying characteristic curve (D.C.C.), and therefore the empiric correlation expressing the speed of drying of the studied green mint.

After that the two obtained correlations are introduced in a program written in FORTRAN so as to validate the experimental results of moisture content and the drying speed in terms of time for drying modes and to study the temperature, the debit, the hygrometry drying air influence and of the initial mass of the mint leaves.

In order to dimension our drying, a parametric study based on the experience plans technique is led.

The model developed in this work will permit to dimension a drier and to study its functioning in case it is used with a solar collector in order to define the optimal drying conditions.

Keywords : Green mint – Sorption Isotherms – Convective drying Kinetics – Solar drying – Experimentation – Modelisation – Experiment plan.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

SOMMAIRE

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LE SECHAGE SOLAIRE

1.1-INTRODUCTION.....	01
1.2-SECHAGE DES PRODUITS AGRICOLES	03
1.2.1-Séchage par convection (entraînement)	03
1.2.2-Activité de l'eau et isothermes de sorption.....	04
1.2.2.1-Activité de l'eau dans le produit	04
1.2.2.2-Equilibre air-produit	05
1.2.3-Période de séchage	06
1.2.3.1-Phase 0 : période de mise en température	07
1.2.3.2-Phase 1 : période à allure ou vitesse de séchage constante	07
1.2.3.3-Période de ralentissement: (Phase 2).....	09
1.2.4-Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	10
1.2.4.1-Influence de la température de l'air	10
1.2.4.2-Influence de la vitesse de l'air.....	10
1.2.4.3-Influence de l'humidité de l'air	10
1.2.5-Qualité des produits séchés	10
1.2.5.1-Modification biochimique	10
1.2.5.2-Pertes d'arôme	11
1.2.5.3-Pertes de la couleur du produit	11
1.2.5.4-Modifications physiques et mécaniques des produits séchés.....	11
1.3-DEVELOPPEMENT DE LA MODELISATION MATHEMATIQUE DES TRANSFERTS LORS DU SECHAGE	12
1.4-CLASSIFICATION DES MODELES DE SECHAGE	14

1.4.1-Les modèles empiriques	14
1.4.2-Les modèles diffusifs	14
1.4.3-Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.....	14
1.4.3.1-Modèles issus de la thermodynamique des phénomènes irréversibles (TPI)	15
1.4.3.2-Modèle de Luikov.....	15
1.4.3.3-Modèle de Philip et De Varies.....	16
1.4.3.4-Modèle de Whitaker	17
1.4.3.5-Le concept de la courbe caractéristique de séchage	18
1.5 SECHOIRS SOLAIRES	20
1.5.1-Classification des systèmes de séchage solaire	22
1.6-LES PRODUITS EN FEUILLES	23
1.7-CONCLUSION	24
1.8-REFERCEES BIBLIOGRAPHIQUES	25
 CHAPITRE II - PARTIE 1°: DETERMINATION EXPERIMENTALE DES ISOTHERMES DE SORPTION.	
2.1.1-INTRODUCTION	30
2.1.2-CONCEPTS FONDAMENTAUX	30
2.1.2.1-Activité de l'eau dans un produit	30
2.1.2.2-Teneur en eau	32
2.1.2.3-Isothermes de sorption	32
2.1.2.3.1-Définition.....	32
2.1.2.3.2-Forme générale des isothermes.....	33
2.1.2.3.3-Chaleur isostérique de sorption	34
2.1.3-DÉTERMINATION EXPERIMENTALE DES ISOTHERMES DE SORPTION	35
2.1.3.1. Matériel et mode opératoire.....	35
2.1.3.2-Résultats expérimentaux et modélisation.....	37
2.1.3.2.1-Isothermes de sorption du <i>Mentha viridis</i>	37

2.1.4-MODELISATION DES COURBES DE SORPTION	40
2.1.4.1-Modèles de description des isothermes de sorption	40
2.1.4.2-Résultats de la modélisation.....	41
2.1.5-DÉTERMINATION DE LA CHALEUR ISOSTERIQUE DE SORPTION	45
2.1.6-CONCLUSION	48
2.1.7-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
 CHAPITRE II - PARTIE 2 : CINETIQUES DE SECHAGE ET COURBE CARACTERISTIQUE DE SECHAGE.	
2.2.1-INTRODUCTION	52
2.2.2-MATERIEL ET METHODE	52
2.2.2.1-Description et fonctionnement du système de séchage.....	52
2.2.2.2-Protocole expérimental.....	54
2.2.2.3-Grandeurs mesurées.....	54
2.2.2.3.2-Mesure de l'humidité de l'air	55
2.2.2.3.3-Mesure de la vitesse de l'air asséchant	55
2.2.2.3.4-Mesure des masses humide et sèche du produit	55
2.2.3-MODELISATION DES CINETIQUES DE SECHAGE	55
2.2.3.1-Courbes de séchage	55
2.2.3.2-Modèle de séchage en couche mince	56
2.2.3.3-Paramètres statistiques utilisés	57
2.2.4-MODÈLE DE COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE	58
2.2.5-RÉSULTATS ET DISCUSSION	60
2.2.5.1. Cinétiques de séchage de la menthe verte (<i>Mentha viridis</i>)	60
2.2.5.1.1. <i>Reproductibilité des expériences</i>	61
2.2.5.1.2- <i>Courbes de séchage</i>	62
2.2.5.1.3- <i>Influence de la température et du débit d'air sur la vitesse de séchage du</i> <i>Mentha viridis</i>	63

2.2.5.1.4-Courbe caractéristique de séchage du <i>Mentha viridis</i>	64
2.2.5.1.5. Lissage des courbes de séchage du <i>Mentha viridis</i>	65
2.2.6-CONCLUSION	68
2.2.7-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	69
 CHAPITRE III : MODELISATION DU SECHOIR SOLAIRE INDIRECT	
3.1-MODELISATION DU SECHAGE DE LA MENTHE	73
3.2-HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	73
3.3-EQUATIONS DE BILAN	74
3.3.1-Bilan thermique	74
3.3.2-Bilan massique de l'eau	77
3.4-RESOLUTION DES EQUATIONS DE TRANSFERT	78
3.5-ORGANIGRAMME DU PROGRAMME « SECHAGE »	79
3.6-RESULTATS ET DISCUSSIONS	81
3.6.1-Objectifs de la simulation.....	81
3.6.2-Comparaison des résultats du modèle numérique et des résultats expérimentaux	81
3.6.3- Etude de l'influence des paramètres aérothermiques et la masse initiales du produit à sécher sur la durée du séchage.	84
3.6.3.1- Influence de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit	84
3.6.3.2- Influence du débit d'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit	88
3.6.3.3- Influence de l'hygrométrie de l'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit	90
3.6.3.4- Influence de la masse initiale des feuilles de menthe sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit	90
3.6.3.5- Influence de l'utilisation d'une source d'énergie auxiliaire sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit	92
3.7-CONCLUSION	93
3.8-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	94

CHAPITRE IV : LES PLANS D'EXPERIENCES - DIMENSIONNEMENT DU SECHOIR SOLAIRE

4.1-INTRODUCTION	96
4.2-UTILISATION DES PLANS D'EXPERIENCES POUR L'ETUDE DU SECHOIR...	98
4.2.1-Expériences numériques et résultats	98
4.2.2-Etude de séchoir avec des conditions d'entrée de l'air constantes.....	99
4.2.2.1-Choix des paramètres et des plages de variations	99
4.2.2-Etude de séchoir avec des conditions d'entrée de l'air variables.....	106
4.2.1.2-Choix des paramètres et des plages de variations	106
4.3-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113
CONCLUSION GENERALE	114

ANNEXES

ANNEXE A2.1: DETERMINATION EXPERIMENTALE DES ISOTHERMES DE SORPTION	117
A2.1.1- Performance des modèles sélectionnés pour les isothermes du sorption du Mentha viridis.....	117
A2.1.2- Les isothermes de désorption et d'adsorption du Mentha viridis mesurées et calculées pour les six modèles	119
ANNEXE A3.1: CALCUL DE LA TEMPERATURE HUMIDE DE L'AIR DE SECHAGE	123
ANNEXE A3.2 LE LISTING DU PROGRAMME SECHAGE	124

NOMENCLATURE

- A_w : Activité de l'eau dans le produit [-].
- a_m : L diffusivité massique [m^2/s].
- a_q : La diffusivité thermique [m^2/s].
- C : Chaleur spécifique [$J/kg \text{ } ^\circ C$].
- C_0 : Constante de l'équation 2.2.10 [-].
- $C_{p_{pr}}$: Capacité calorifique massique du produit [$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$].
- C_{p_a} : Chaleur massique de l'air de séchage [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].
- C : Concentration volumique de l'eau [$kg \text{ eau}/m^3$].
- d_f : Degré de liberté de la régression du modèle [-].
- D : Coefficient de diffusion de l'eau dans le produit [m^2/s].
- Dd_{claie} : Différence du temps de séchage entre la claie dix (10) et la claie une (1) [heure].
- Dd_{Xpr} : Différence du temps de séchage entre deux teneurs en eau finale des feuilles de menthe [heure].
- D_m : Débit massique de l'air de séchage [$kg.s^{-1}$].
- D_e : Diffusivité de l'eau dans le produit à sécher [m^2/s].
- D_M : Coefficient de diffusion massique isotherme [m^2/s].
- D_T : Coefficient de diffusion massique non isotherme [m^2/s].
- D_{MV} : Coefficient de diffusion isotherme de la vapeur [m^2/s].
- D_{TV} : Coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur [m^2/s].
- D_v : Débit volumique de l'air de séchage [m^3/s].
- E : Energie nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans les feuilles de menthe de la dixième claie [kWh/kg_{ms}].
- H_1 : Enthalpie de condensation de la vapeur d'eau pure [$kJ.mol^{-1}$].
- H_m : Enthalpie intégrale de sorption des premières molécules d'adsorbat sur tous les sites primaires [kJ/mol].
- H_n : Enthalpie intégrale de sorption des couches d'eau supplémentaires [$kJ.mol^{-1}$].
- h_0 : Coefficient de transfert de chaleur air-produit [$W.m^{-2}.K^{-1}$].
- $h_{a,pr}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et le produit [$W.m^{-2}.K^{-1}$].

- $h_{a,p}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air de séchage et la paroi interne [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$].
- h_{vfpr} : Coefficient d'échange par convection entre l'air et le produit [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].
- H_r : Humidité relative [%].
- H_rE : Humidité relative d'équilibre [%].
- K : Conductivité hydraulique du milieu [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$].
- K_0 : Constante de l'équation 2.2.11 [-].
- K_m : Coefficient global externe de transfert de matière [s/m].
- $L_v(T_h)$: Chaleur latente de vaporisation du produit à la température humide de l'air de séchage [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{eau}}$].
- L_{vap} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{eau}}$].
- L_v : Chaleur latente d'évaporation de l'eau [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{eau}}$].
- M_p : Masse du produit [kg].
- M_s : Masse sèche [kg].
- M_h : Masse humide [kg].
- \dot{m}_a : Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$].
- \dot{m}_e : Débit d'eau évaporée [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$].
- m_{prs} : Masse du produit sec [kg].
- m_s : Masse anhydre de l'échantillon de produit [kg].
- m_{pr} : Masse du produit à sécher [kg].
- N : le nombre de points expérimentaux [-].
- P : Pression atmosphérique [Pa].
- P_{ev} : Puissance d'évaporation de l'eau contenue dans le produit [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{eau}}\cdot\text{s}^{-1}$].
- P_{vp} : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit [Pa].
- P_{vs} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé [Pa].
- P_{vsat} : Pression de la vapeur saturante [Pa].
- $P_{\text{sat}}(T_{pr})$: Pression de vapeur d'eau saturante à la température (T_{pr}) [Pa].
- $P_v(T_{fs})$: Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air de température locale T_{fs} . [Pa].
- Φ_m : Flux de matière [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$].
- X : Teneur en eau du produit
- Q_{st} : Chaleur isostérique [kJ/mol].

- R : Constante des gaz parfaits [J /mol.K].
- r : Chaleur spécifique d'évaporation [J/kg].
- S_{cap} : Surface du capteur solaire à air [m²].
- S_{enc} : Surface de l'enceinte de séchage [m²].
- S_{pr} : Surface d'échange du produit [m²].
- S_{fpr} : Surface d'échange entre l'air et le produit [m²].
- S_v : Surface entre deux claies [m²].
- S_0 : Surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant initiale [m²].
- t : Le temps [s].
- T : La température [°C].
- T_s : Température de séchage [K]
- T_p : Température de la paroi interne de l'enceinte de séchage [K].
- T_a^* : Température d'entrée de l'air de séchage [K].
- T_a : Température de l'air [K].
- T_{pr} : Température des feuilles de la menthe verte, (K)
- ΔT : Ecart psychrométrique défini par les conditions de l'air de séchage [].
- Δt : Pas de temps [s].
- X : Teneur en eau initiale du produit [kg eau/kg ms].
- X_0 : Teneur en eau initiale [% MS].
- X_1, X_2, X_3 et X_4 : Paramètres d'entrée du plan d'expériences [-].
- X^* : Teneur en eau normée ou réduite []
- X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre thermodynamique [].
- X_{cri} : Teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).
- X_{in} : Teneur en eau moyenne du produit [kg eau/kg ms].
- Y : Paramètres de sorties du plan d'expérience [-].
- W_a : Teneur en eau de l'air de séchage [kg eau.kg as⁻¹].
- $-(dX/dt)_t$: Vitesse de séchage à l'instant t [% MS. min].
- $-(dX/dt)_I$: Vitesse de séchage de la phase I [% MS. min].
- $-(dX/dt)_0$: Vitesse initiale de séchage [% MS. min].

AUTRES SYMBOLES

α et β sont deux constantes d'ajustement (elles sont fonction du produit).

ρC : Capacité calorifique équivalente [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$].

ρ_0 : Masse volumique de la phase solide [kg/m^3].

ρ_e : Masse volumique de la phase liquide [kg/m^3].

λ^* : Conductivité thermique apparente [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

ε : taux de changement de phase.

δ : coefficient du gradient thermique basé sur la différence de teneur en eau [$1/^\circ\text{C}$].

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à cet handicap : culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits.

Les régions du sud algérien commencent à connaître un développement agricole plus ou moins rapide. Une grande partie de la production agricole de ces régions (tomate, dattes, henné, menthe...) se prête parfaitement à une conservation par séchage pour assurer une continuité dans leurs disponibilités et permettre leur transport à moindre coût.

La menthe verte (*Mentha viridis*) est une plante riche en substances très recherchées appelées « principes actifs » : huiles essentielles, alcaloïdes, tanins, etc.... Cette richesse et cette diversification dans la composition moléculaire de la menthe en font d'elle une plante aromatique et médicinale par excellence. De par ses propriétés toniques, stimulantes digestives et analgésiques, cette plante est très utilisée dans la fabrication pharmaceutique. Sa flaveur a permis à cette plante d'entrer dans les domaines de la parfumerie, confiserie et liquoristerie.

La déshydratation par séchage de la menthe est une méthode traditionnelle mais très répandue pour sa conservation en vue d'obtenir un nouveau produit qui, par la suite, sera utilisé en parfumerie, confiserie, fabrication pharmaceutique,...

Notre travail concerne ce produit et se compose de quatre chapitres :

- Le premier est une étude bibliographique sur les recherches effectuées dans le domaine de séchage, en particulier le séchage solaire. Une première partie traite de la théorie du séchage en présentant les différentes lois fondamentales, les phénomènes physiques internes et externes au produit solide. La deuxième partie présente l'état des connaissances concernant le séchage des produits agroalimentaires et l'utilisation des approches simplifiées et scientifiquement argumenté.

- Le deuxième chapitre présente les résultats des travaux expérimentaux de séchage effectués en laboratoire d'énergie solaire est des plantes aromatiques et médicinales (L.E.S.P.A.M) de l'école normale supérieure des enseignants de Marrakech Maroc et sur site réel avec le séchoir « **SECHPOLY** ». Il décrit les lois expérimentales de séchage du produit agroalimentaire, qui sont utilisées lors de la modélisation du séchoir. Un modèle numérique est utilisé et intègre les différentes corrélations mises au point pour la reconstitution théorique des courbes. Il présente les isothermes de sorption et les cinétiques de séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) et leurs modélisations pour différentes conditions de séchage.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation numérique permettant de simuler le fonctionnement du séchoir solaire polyvalent (**SECHPOLY**). Les résultats obtenus par le modèle sont comparés aux résultats expérimentaux.
- Le quatrième chapitre énonce une étude paramétrique basée sur l'utilisation de la technique des plans d'expérience, afin de dimensionner le séchoir (capteur solaire et enceinte de séchage).

Ce travail est le fruit de mon séjour scientifique dans le cadre d'une bourse Algérienne au sein du Centre de Thermique de Lyon (CETHIL) de l'Institut Nationale des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.

La conclusion dégage les points forts de notre étude théorique et expérimentale du séchage des feuilles de menthe dans un séchoir solaire indirect et énonce des perspectives de recherche et développement.

Chapitre I

ETAT DE L'ART SUR LE SECHAGE SOLAIRE

1.1-INTRODUCTION

Sécher un produit, quelle que soit sa nature, consiste à extraire de l'eau par vaporisation. Ce procédé est utilisé dans un large domaine d'application. Outre le séchage de produits alimentaires on peut citer des études sur le séchage d'autres produits, tels que le séchage de laine (**A. Hachimi**, & al., 1998 [1]), les sècheurs à rouleaux qui traitent le papier (**S. A. Reardon**, & al., 1998 [2]) et le pilotage de séchoirs à bois à haute température (**M. Martin**, & al., 1995 [3]). Une application au séchage d'un empilement de planchettes de bois, a permis (**P. Sebastian** & al., 1993a [4]) l'introduction du concept d'unités de transfert thermique et massique (outils rapides de simulation de séchoirs) et aussi les réseaux de modules d'unités de transferts (séchoir multi-tapis) (**P. Sebastian** & al., 1993b [5]).

Le séchage des produits alimentaires a fait l'objet de très nombreuses recherches sur divers produits. Citons, sans être exhaustif le maïs et le hareng (**A. Ahmed-Zaid**, 1999 [6]), la tomate (**M. N. A. Hawlader**, & al., 1991 [7]), les carottes (**O. Techasena**, & al., 1994 [8]), l'oignon (**V. K. Sharma**, & al., 1995 [9]), grains de colza (**P. G. Patil**, & al., 1989, [10]), les noix (**E. Lavalie/Prelois**, 1993 [11]), la pomme (**B. Zeghmati**, 1981 [12]), le riz (**M. A. Du Peuty-Charbonnier**, 1995 [13]), la pulpe de betterave et manioc (**M. A. Salgado Cervantes**, 1988 [14]), manioc, gingembre, gombo et piment rouge (**C. Ahouannou**, 2001 [15]), la pomme de terre (**S. Youcef-Ali**, 2001 [16]), et beaucoup d'autres produits.

1.2-SECHAGE DES PRODUITS AGRICOLES

Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agricoles. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entraînement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.

1.2.1-Séchage par convection (entraînement)

Si on place un corps humide dans une enceinte où règne un flux gazeux chaud et sec, des différences de température et de pression partielle d'eau seront constatées entre le corps et le gaz aboutissant ainsi aux phénomènes suivants :

- un transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet de l'existence d'un gradient de température,

- un transfert de matière (eau) s'effectuant du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Le séchage est dit isenthalpique si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par le flux de gaz chaud.

Dans la plupart des cas, le gaz utilisé est l'air dont les propriétés thermophysiques lui permettent d'être à la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée. L'enceinte où est placée le corps humide à sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

La vitesse avec laquelle des quantités d'eau de produit sont évaporées est appelée vitesse de séchage. Cette dernière est intimement liée au mode d'apport de l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation de l'eau. Dans le séchage par entraînement, la convection est le mode de transfert prépondérant. D'autres modes de transfert thermique peuvent cependant s'y ajouter. La conduction par les claies supportant le produit et le rayonnement par les parois du séchoir représentent les autres modes d'apport de cette chaleur latente de vaporisation.

1.2.2-Activité de l'eau et isothermes de sorption

1.2.2.1-Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur liée à l'humidité du produit.

G. Lewis & M. Randall, 1923 [17], **G. Scott**, 1957 [18], **M. Loncin**, 1961 [19], ont défini l'activité de l'eau A_w dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs}).

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (1.1)$$

avec :

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

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

Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport l'est beaucoup moins. Dans le même ordre d'idées, ils justifient que l'humidité relative (Hr)

d'une atmosphère (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) est donnée par l'expression :

$$\text{Hr}(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \times 100 \quad (1.2)$$

L'activité de l'eau dans le produit est donc directement liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{\text{HrE}(\%)}{100} \quad (1.3)$$

1.2.2.2-Equilibre air-produit

Cet équilibre ou plus exactement la valeur de l'humidité d'équilibre diffère d'un produit à l'autre (**GERT** et **GER**, 1986 [20]). En pratique l'humidité d'équilibre est déterminée par les isothermes de sorption du produit (**A. Belghith**, 1999 [21]) et (**M. Kouhila**, 1999 [22]). Ces courbes (isothermes de sorption) sont déterminées expérimentalement (voir chapitre 2 la première partie).

1.2.3-Période de séchage

La vaporisation de l'eau s'effectue en surface du produit. Le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit conditionne fortement la vitesse de séchage et explique la forme des courbes d'évolution en fonction du temps.

De fait, pour comprendre les phénomènes de migration de l'eau dans les produits humides, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solides, vapeur et liquide), qui tiennent tour à tour un rôle prépondérant.

Sur la figure 1.1, on peut distinguer plusieurs phases dans le phénomène de séchage. La courbe (a) présente l'évolution de la teneur en eau (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse sec) d'un produit soumis à un séchage convectif. On y distingue trois phases, également visibles sur la courbe (b) donnant la vitesse de séchage en fonction du

temps t (O. Kricher & K. Kroll, 1963 [23]) et la courbe (c) illustrant l'évolution de la température du produit en fonction du temps.

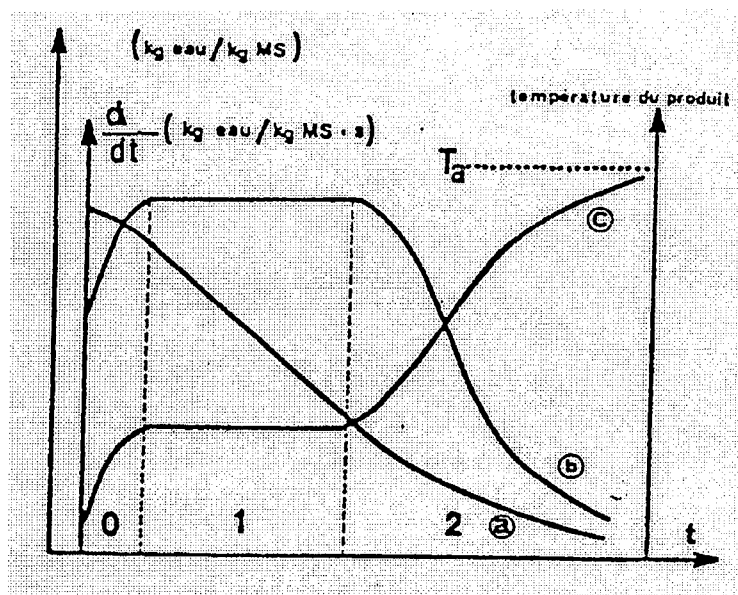


Figure 1.1 : Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (a), de la vitesse de séchage (b) et de la température du produit (c).

Ces trois phases sont:

Phase 0 : Période de mise en température

Phase 1 : Période à allure constante

Phase 2 : Période de ralentissement

1.2.3.1-Phase 0 : période de mise en température

Quand un produit à une température de surface T_S est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation.

L'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur. Si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement du produit.

La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante ; ce qui explique le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase.

1.2.3.2-Phase 1 : période à allure ou vitesse de séchage constante

Cette phase n'existe que si une pellicule d'eau libre existe en surface du produit. L'activité de l'eau à la surface du produit (a_{ws}) est alors égale à 1 et le séchage consiste en une évaporation isenthalpique de l'eau. La température de surface du produit correspond à la température humide T_h de l'air asséchant. C'est la température à laquelle le flux de chaleur amené par l'air est égal au flux thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation.

La nature du produit n'intervient pas mais sa forme (texture, porosité,...) influe sur le débit d'eau évaporée \dot{m}_e , défini par **O. Kricher & K. Kroll, 1963 [23]** :

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dT} = K_m (P_{sat}(T_{pr}) - P_v(T_{fs})) \quad (1.4)$$

Où :

$P_{sat}(T_{pr})$ est la pression de vapeur d'eau saturante à la température (T_{pr}) à la surface du produit pendant la phase à vitesse constante ou pression saturante à la température humide de l'air en Pascal,

$P_v(T_{fs})$ est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air de température locale T_{fs} , en Pascal,

K_m est le coefficient global externe de transfert de matière exprimé en s/m.

En considérant que le transfert de matière représenté par l'évaporation de l'eau s'accompagne d'un transfert thermique dirigé en sens inverse, la vitesse d'évaporation peut également s'exprimer sous une autre forme ;

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dT} = \frac{h_{vfpr} S_{fpr} (T_{fs} - T_{pr})}{L_v} \quad (1.5)$$

Où $h_{v\text{fpr}}$ et S_{fpr} sont respectivement le coefficient d'échange par convection entre l'air et le produit (en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) et la surface d'échange entre l'air et le produit (en m^2).

- Cette phase d'évaporation est observable tant que la vitesse de transport de l'eau liquide dans les pores du produit vers sa surface est un phénomène rapide devant la vitesse globale d'évaporation. La durée de cette phase diminue lorsque le taux d'humidité de l'air de séchage diminue,
- la vitesse de l'air de séchage augmente, entraînant une augmentation des coefficients de transfert de matière et de chaleur,
- la surface d'échange air-produit augmente (par exemple en divisant le produit à traiter,
- la température de séchage augmente.

Dans les faits, il s'agit d'une phase qui n'est pas toujours identifiable, même pour les produits végétaux qui ont une humidité absolue initiale importante. Ceci s'explique par l'absence fréquente d'une pellicule d'eau libre. Même pour un produit très riche en eau, les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure (S. Youcef-Ali, 2001 [16]).

1.2.3.3-Période de ralentissement: (Phase 2)

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage.

Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Plusieurs phénomènes et propriétés sont à prendre en compte (M. El Hisse, 1987 [24]) :

- **disparition de l'eau libre en surface de produit** : ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectue consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.
- **l'épaisseur du produit** : si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.
- **la diffusivité (D) de l'eau dans le produit** : elle varie avec la teneur du produit en eau. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- **la résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.
- **le croutage** : certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (phase 1) et cristallisent à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

Cette phase dépend essentiellement des propriétés du produit et de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

La théorie la plus simple dans cette phase est celle de la diffusion qui suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du produit est gouverné par la seconde loi de Fick qui établit une relation linéaire entre le flux de matière Φ_m (kg/m²s) et le gradient de concentration volumique de l'eau C (kg eau/m³), au sein d'un volume de produit :

$$\overline{\Phi_m} = -D_e \overline{\text{grad}C} \quad (1.6)$$

D_e est la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher (en m²/s).

1.2.4-Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

1.2.4.1-Influence de la température de l'air

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

1.2.4.2-Influence de la vitesse de l'air

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

1.2.4.3-Influence de l'humidité de l'air

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

1.2.5-Qualité des produits séchés

1.2.5.1-Modification biochimique

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique.

Ces modifications, généralement considérées comme indésirables sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes (**M. Daguene**t, 1985 [25]) :

- réaction de **MILLARD** : brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides,
- rancissement : oxydations des matières grasses,
- destruction de vitamines : notamment destruction de l' α et du β - carotènes,
- dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant,
- réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable : oxydation des polyphénols qui entraîne par exemple un brunissement des produits séchés.

1.2.5.2-Pertes d'arôme

Le séchage est un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas il s'agit des arômes

contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation. par exemple pour un produit comme la menthe, **J. P. Bouverat-Bernier, & al.**, 1990 [26] ont montré que lors du séchage à température constante inférieure ou égale à 55°C, les pertes en essences (arômes) sont de l'ordre de 5% (**B.-B. Odile**, 1991 [27]).

1.2.5.3-Pertes de la couleur du produit

L'étude de noircissement des feuilles de certaines plantes pendant le séchage a révélé que la couleur verte de ces feuilles est maintenue à condition que le séchage s'effectue à une température inférieure ou égale à 55°C (**B.-B. Odile**, 1991 [27]).

1.2.5.4-Modifications physiques et mécaniques des produits séchés

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- la migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être en général être consommé réhydraté,
- la fusion et migration des matières grasses,
- la modifications de la forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

1.3-DEVELOPPEMENT DE LA MODELISATION MATHEMATIQUE DES TRANSFERTS LORS DU SECHAGE

La modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux a été largement discutée dans la littérature. Les premiers travaux, datent de 1921 avec les publications de **W. K. Lewis** en 1921 [28], traitant aussi bien les échanges thermiques et massiques lors de l'évaporation que de la signification du mécanisme de transfert de l'eau à l'intérieur du produit. Il décrit le séchage comme étant la conjugaison de deux processus, l'évaporation de l'humidité à la surface du matériau poreux et la diffusion de l'humidité de l'intérieur du solide vers la surface.

Puis **T. K. Sherwood [29]** a développé de 1929-1932 l'idée de **Lewis** et donne une explication globale de l'ensemble des phénomènes observés lors du séchage d'un produit. Il divise le séchage en deux phases successives, une première période à allure constante et une deuxième période de ralentissement de l'allure de séchage. En 1935, un spécialiste du textile, **E. A. Fisher [30]**, propose trois relations pour décrire les phases successives du séchage de la laine.

La première phase est à vitesse constante, les deux phases suivantes sont à décroissance linéaire, la vitesse s'annulant à l'humidité d'équilibre.

Par la suite, on assiste à la naissance des deux grandes écoles qui ont permis d'apporter une meilleure compréhension des différents phénomènes mis en jeu dans le séchage des produits.

La première école est née en 1962 sous le nom de **Krisher [23]**, qui adopte la description des processus de séchage en trois phases détaillées précédemment au paragraphe 1.2.4 (figure 1.1). Il a aussi déterminé les isothermes de sorption (propriétés d'équilibres) et la conductivité thermique équivalente pour plusieurs produits.

En 1966, **A.V. Luikov [31]**, s'intéresse aux transferts au sein du produit en se basant sur une description fine et les équations des transferts couplés de chaleur et de masse dans un milieu poreux

Les importants travaux de recherche de ces deux grandes écoles sur le transport d'eau et le transfert de chaleur sont regroupés dans deux ouvrages qui, aujourd'hui encore, constituent la base des connaissances sur le séchage.

Par la suite, d'autres travaux ont vu le jour pour permettre de lever la complexité de la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage des produits tels que les polymères, le bois, les sols et les produits agro-alimentaires (**M. Dagnenet, 1985 [25]**, **S. Whitaker, [32, 33 et 34]**, **J. M. Hernandez, [35]** et **A. Hamed [36]**).

Par ailleurs, plusieurs travaux plus récentes ont été publiés par divers scientifiques (**J. Khemiri, & al., [37]**, **G. M. Rios, & al., [38]**, **D. A. De Varies, [39]**, **K. Ichimiya & al., A. Touhami, 1990, [40]**, **D. Nguyen Haa & al., [41]**). Ces travaux ont montré que la

représentation des systèmes d'équations par des modèles mathématiques est difficile à cause de la complexité de ces équations. En effet, ces modèles font souvent intervenir des coefficients qui ne sont pas connus et qui nécessitent le recours à des mesures expérimentales souvent délicats. Par ailleurs, ces modèles compliqués exigent une solution numérique des équations différentielles non linéaires qui n'est pas possible sans des calculateurs de grandes capacités.

D'autres modèles plus simples à mettre en œuvre grâce à des hypothèses simplificatrices ont été utilisés par d'autres auteurs. Ces modèles ne permettent pas malheureusement d'éclaircir les phénomènes de transfert à l'intérieur des produits à sécher **A. Hamed [36]**.

Néanmoins, certains travaux utilisant ces modèles simplifiés ont abouti à des résultats satisfaisants et acceptables.

1.4-CLASSIFICATION DES MODELES DE SECHAGE

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

1.4.1-Les modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit ainsi aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au delà des limites de l'expérience (**M. Kouhila, & al., [42]**).

1.4.2-Les modèles diffusifs

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D.\nabla X) \quad (1.7)$$

avec :

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

X : Teneur en eau du produit

t : le temps.

A. B. Neuman, 1931 [43] & **T. K. Sherwood** [29] ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation (1.2) devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \quad (1.8)$$

1.4.3-Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage.

Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de **Luikov, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker** ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse. Les plus connus de ces modèles sont les suivants:

1.4.3.1-Modèles issus de la thermodynamique des phénomènes irréversibles (TPI)

La thermodynamique des phénomènes irréversibles (TPI) a été exploitée dans le domaine du séchage en vue d'apporter des explications aux phénomènes physiques mal pris en compte par les autres théories. En partant de l'étude de la source d'entropie, la TPI permet d'écrire des équations constitutives mettant en jeu divers phénomènes physiques élémentaires. La démarche se base sur le fait qu'un certain nombre de flux se produisent à partir des forces qui peuvent se développer dans un système thermodynamique quelconque (**Fortes & Okos**, 1976 [44]). La TPI a beaucoup inspiré les travaux de **Luikov** qui font référence dans ce domaine.

1.4.3.2-Modèle de Luikov

Les travaux de **Luikov** dans le séchage pour une pression de la phase gazeuse uniforme et des températures comprises entre 0 et 100°C, ont abouti à un système d'équations

différentielles, qui régit le transport de chaleur et de masse. Les équations différentielles constituant ce système sont les suivantes:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[a_m \overline{\text{grad} X} + \delta \overline{\text{grad} T} \right] \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} a_q (\overline{\text{grad} T}) + \frac{\varepsilon \cdot r}{C} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (1.10)$$

avec :

a_m : la diffusivité massique,

a_q : la diffusivité thermique,

C : chaleur spécifique,

r : chaleur spécifique d'évaporation,

T : la température,

t : le temps,

ε : taux de changement de phase,

δ : coefficient du gradient thermique basé sur la différence de teneur en eau.

L'utilisation du système d'équations différentielles de **Luikov** a prouvé son efficacité pour l'analyse de la distribution de la température et de l'humidité à l'intérieur des produits poreux durant le séchage **B. Zéghmati**, 1988 [12], **H. Amir**, & al., 1987, [45], **A. Hamed**, 1985 [36].

La contribution la plus importante de ce modèle est la mise en évidence de l'influence de la température et de la pression interne sur la migration de la vapeur d'eau. Toutefois, l'inconvénient de ce modèle est que le taux de changement de phase ε présent dans l'équation de transfert de chaleur (1.10) n'est pas issu d'une loi physique et sa détermination empirique est délicate.

1.4.3.3-Modèle de Philip et De Variés

En procédant à une analyse du comportement hydrique et thermique des matériaux **Philip et De Variés** ont élaboré un autre modèle basé aussi sur le couplage des transferts thermique et massique et qui tient compte de l'effet de la pesanteur g . Le système d'équations décrivant ce modèle et le suivant :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[D_M \overline{\text{grad}X} + D_T \overline{\text{grad}T} - \frac{\rho_e}{\rho_0} K \right] \quad (1.11)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda^* \overline{\text{grad}T}) + \rho_e L_V (D_{MV} \overline{\text{grad}X} + D_{TV} \overline{\text{grad}T}) \quad (1.12)$$

avec :

- D_M : coefficient de diffusion massique isotherme,
- D_T : coefficient de diffusion massique non isotherme,
- D_{MV} : coefficient de diffusion isotherme de la vapeur,
- D_{TV} : coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur,
- K : conductivité hydraulique du milieu,
- ρC : capacité calorifique équivalente,
- ρ_0 : masse volumique de la phase solide,
- ρ_e : masse volumique de la phase liquide,
- λ^* : conductivité thermique apparente.

De fait, ce modèle est adapté pour le séchage des sols et des matériaux de construction pour lesquels la migration de l'eau par gravité joue un rôle non négligeable **A. Bennis** 1997 [46], **D. A. De Varies**, [40], et **H. Ben Aissia**, & al. 1993 [47].

1.4.3.4-Modèle de Whitaker

Ce modèle appelé aussi modèle de la prise de la moyenne a été développé par **Whitaker** dont la contribution dans la théorie du séchage est très fructueuse [32, 33 et 34]. Ce modèle tient compte de la morphologie du milieu poreux, constitué d'une matrice solide inerte comportant des capillaires et des pores, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse (mélange de vapeur d'eau et d'air). La modélisation de tels milieux n'est utilisable qu'à l'échelle macroscopique, après avoir effectué un changement d'échelle. Le passage des équations de l'échelle de pores (du milieu réel discontinu) aux équations macroscopiques (à un milieu continu fictif dans lequel les équations de la mécanique classique sont applicables) s'effectue par la technique de la prise de la moyenne. Une valeur moyenne de chaque grandeur physique prise sur un volume élémentaire représentatif (VER) figure (1.2), est affectée à un point.

Le concept de volume élémentaire représentatif se traduit par une grandeur physique Φ_i associée à la phase i présente dans le milieu poreux [46]. On définit $\langle \Phi_i \rangle$ par :

$$\langle \Phi_i \rangle = \frac{1}{V} \int_V \Phi_i dV \quad (1.13)$$

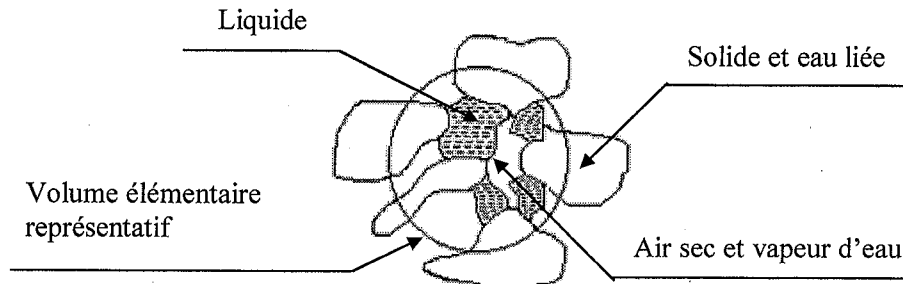


Figure 1.2 : Schéma du milieu poreux et de volume élémentaire représentatif

1.4.3.5-Le concept de la courbe caractéristique de séchage

Le concept de la courbe caractéristique de séchage, noté **C.C.S.**, est mis au point par **Van Meel**, en 1957.

L'objectif consiste à modéliser la vitesse de séchage (voir chapitre 2 partie 2) : il s'agit en quelque sorte d'examiner si, en dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (c'est-à-dire dans les pores du milieu), il est possible d'obtenir au niveau macroscopique une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux (**C. Moyne**, 1985 [48], **C. Moyne, & J. R. Puiggali**, 1991 [49], **Adnan Midilli, & Haydar Kucuk**, 2003, [50] et un même modèle de comportement du produit étudié, quelles que soient les conditions de l'expérience.

La démarche consiste à "normer" les teneurs en eau moyennes et les vitesses de séchage pour obtenir une courbe unique pour un produit donné, de dimensions déterminées et indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse, température, et hygrométrie de l'air de séchage) (**I. Doymaz**, 2007, [51], et **L. Ait Mohammed**, 2006, [52]).

Cette notion de courbe caractéristique de séchage a été reprise notamment par **J. Van Brakel**, en 1980 [53].

L'application du concept de la courbe caractéristique de séchage impose d'utiliser certaines correlations de la forme :

- La teneur en eau normée ou réduite X^* exprimée par :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (1.14)$$

avec :

X : la teneur en eau moyenne du produit

X_{eq} : la teneur en eau d'équilibre thermodynamique déterminée par les isothermes de sorption

X_{cr} : la teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).

La teneur en eau à l'équilibre correspond à la valeur limite obtenue au bout d'un temps infini pour un produit soumis à des conditions données de température et d'hygrométrie.

- La vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ est normée ou réduite par la vitesse de la première phase $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0 = cste$, qui peut soit être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe expérimentale $-\frac{dX}{dt} = f(X)$. Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0} = f(X^*) \quad (1.15)$$

La vitesse de séchage initiale est calculée théoriquement à partir de l'équation :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0 = \frac{h_0 S_0 \Delta T}{m_s L_v (T_h)} \quad (1.16)$$

avec :

h_0 : le coefficient de transfert de chaleur air-produit,

S_0 : la surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant initiale,

$\Delta T = (T_s - T_h)$: l'écart psychrométrique défini par les conditions de l'air de séchage,

m_s : la masse anhydre de l'échantillon de produit,

$L_v(T_h)$: la chaleur latente de vaporisation du produit à la température humide de l'air de séchage.

Dans un domaine raisonnable de conditions expérimentales (température, vitesse, humidité du fluide séchant, nature et épaisseur du produit à sécher), l'expression mathématique arbitrairement imposé à la fonction est :

$$f(X^*) = X^{*n}$$

$$\text{ou } f(X^*) = aX^{*n} + bX^{*(n-1)} + \dots + cX^*$$

Elle est sensiblement unique et doit vérifier les propriétés suivantes **M. Kouhila**, 2001, [54], **C. Ahouannou**, 2000, [15] :

$$\begin{cases} X^* = 0 \Rightarrow f(X^*) = 0 \\ 0 < X^* < 1 \Rightarrow 0 < f(X^*) < 1 \\ X^* \geq 1 \Rightarrow f(X^*) = 1 \end{cases} \quad (1.17)$$

Ainsi, la détermination de la courbe caractéristique de séchage revient à tracer la fonction $f(X^*)$ pour les différentes cinétiques expérimentales de séchage. Ce tracé exige la connaissance des paramètres tels que : " X_{eq} ", " X_{cr} " et " $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$ ".

Notons que cette méthode est une approche semi-empirique fondée sur une analyse simplifiée du procédé. Elle n'interprète pas les différents mécanismes par des équations phénoménologiques, mais s'appuie sur les résultats expérimentaux en les présentant sous une forme facilement exploitable.

Fornell et al., 1980 [55] ont proposé une autre corrélation, basée également sur le concept de la C.C.S. La démarche consiste à « normer » la vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en la divisant par le terme $(T_s - T_h).(V_a)^{0,5}$ où T_s et T_h sont respectivement les températures sèche et humide de l'air de séchage et V_a sa vitesse. La C.C.S est alors obtenue en traçant la courbe :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{(T_s - T_h).(V_a)^{0,5}} = f(X^*) \quad (1.18)$$

Le terme $(T_s - T_h) \cdot (V_a)^{0,5}$ représente l'influence des propriétés de l'air sur l'allure du séchage.

1.5 SECHOIRS SOLAIRES

Les produits agroalimentaires sont en général séchés en étant disposés en couches minces sur des claies perforées fixées ou placées sur des chariots qui se déplacent. Selon les produits, d'autres méthodes sont utilisées. On peut ainsi les immerger dans du sable et on peut citer l'exemple du séchage en lit fluidisé à flottation du maïs **M. Mourad**, 1992 [56].

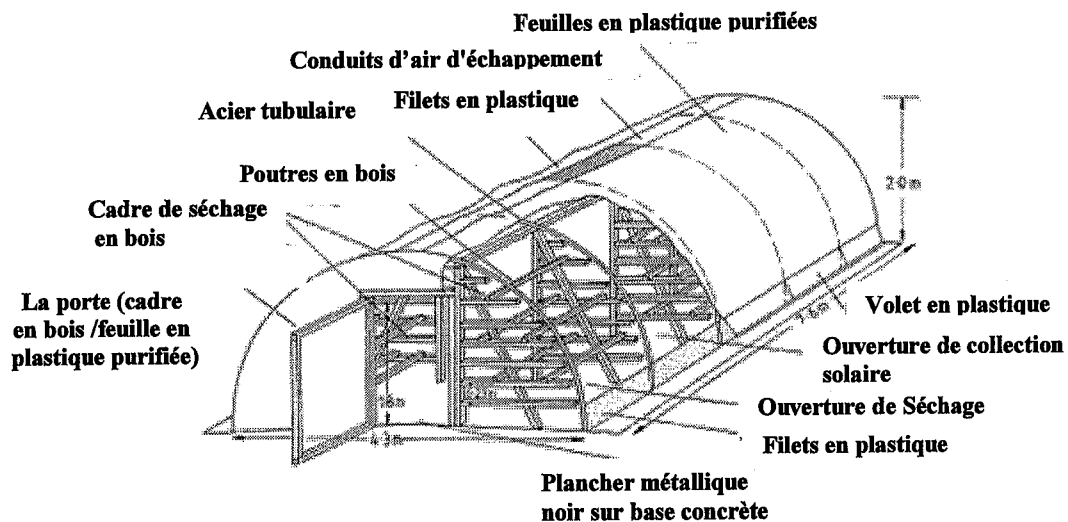


Figure 1.3 : Séchoir solaire en dôme à circulation naturelle.

La source d'énergie utilisée est encore trop souvent la combustion du bois ou d'hydrocarbure ou l'énergie électrique.

L'utilisation de l'énergie solaire, utilisé traditionnellement de tous temps pour divers produits, revient à l'ordre du jour. Citons l'utilisation des toitures solaires (figure 1.3) (**O.V. Ekechukwu, & B. Norton [57a, b et c]**) et le couplage capteur armoire de séchage. Dans ce deuxième procédé, l'air peut être aspiré par un ventilateur (convection forcée) (**A. Jamali**, 2006 [58]) ou se déplacer par gravitation (convection naturelle) (**L. M. Diamante, & P. A. Munro**, 1991, [59]).

Dans de nombreux cas, il est cependant important de maintenir une température de l'air asséchant stable et assez élevée. Il est dans ce cas nécessaire d'utiliser un chauffage d'appoint par une autre source d'énergie (résistances électriques (M. Kouhila, 2001 [54], M. Sembiring, 1990 [60]), combustion de biomasse (C. Ahouannou, 2000 [15]) et du bois (A. Kanmogne, 2002 [61]). D'autres installations utilisent un procédé de stockage de la chaleur dans des galets (figure 1.4) pour s'en servir durant les périodes à faible intensité d'ensoleillement [57a].

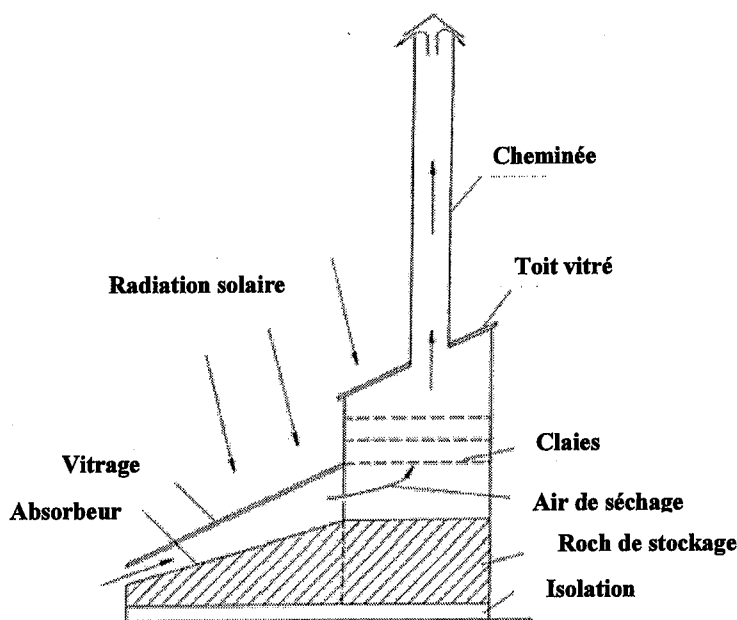


Figure 1.4 : Séchoir solaire avec système de stockage thermique.

1.5.1-Classification des systèmes de séchage solaire

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés d'après leurs modes de chauffage et la manière dans laquelle l'énergie solaire est utilisée.

D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs, à savoir :

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

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

- les séchoirs solaires de type direct,

- les séchoirs solaires de type indirect,
- les séchoirs solaires de mode mixte.

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans la figure 1.5.

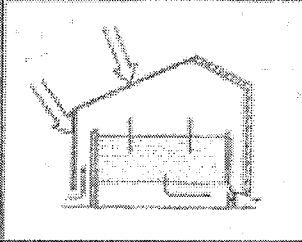
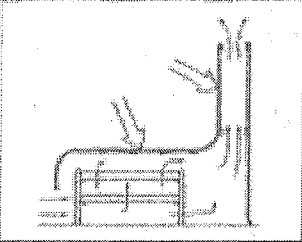
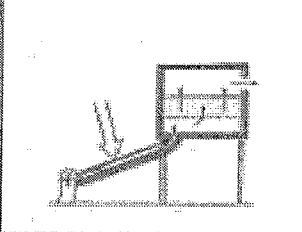
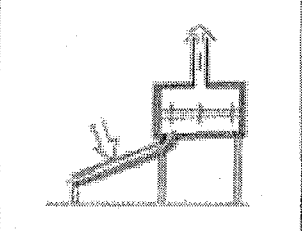
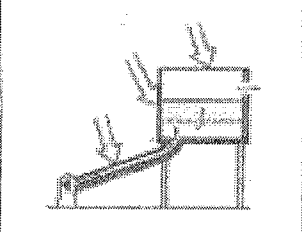
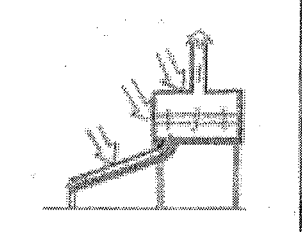
	Les séchoirs actifs	Les séchoirs passifs
Type direct		
Type indirect		
Type mixte		

Figure 1.5 : Représentation typique des séchoirs solaires

1.6-LES PRODUITS EN FEUILLES

Dans beaucoup de cas, le produit à sécher est uniquement composé de feuilles. Le henné, la verveine et la menthe sont tous des exemples de produits en feuilles. Nous avons choisi la menthe comme exemple dans notre étude.

Appréciée en parfumerie, confiserie, liquoristerie et médecine, la menthe (*Mentha viridis*) occupe toujours une grande place dans le marché des huiles essentielles et de l'herboristerie (herbes déshydratées). Les fortes teneurs en menthone, menthol et leurs dérivés, confèrent à l'essence de menthe des propriétés stimulantes fortes intéressantes (fraîcheur,...)

B. B. Odile,
[27]

La déshydratation de la menthe est une méthode courante et traditionnelle qui facilite sa conservation pour sa commercialisation sous forme d'herbes déshydratées et d'huiles essentielles. Autrement dit, cette déshydratation permet la création d'un nouveau produit.

1.7-CONCLUSION

L'étude et la modélisation du séchage peuvent être effectuées selon plusieurs démarches.

Une première démarche repose sur les modèles purement mathématiques. C'est le cas du modèle complet qui n'est pas applicable à de tels produits du fait de leur complexité. Elle se prête difficilement à l'étude du séchage des produits agro-alimentaires car le modèle de diffusion pure couramment utilisé n'est pas représentatif des phénomènes physiques.

A l'opposé de ces modèles mathématiques du séchage, la méthode de la courbe caractéristique de séchage (C.C.S) qui exploite les résultats expérimentaux, permet d'étudier le comportement du produit dans le séchoir. Elle évite une analyse théorique des mécanismes internes au produit. C'est ce concept que nous avons retenu pour l'exploitation de nos résultats expérimentaux sur le séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*).

1.8-REFERCEES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Hachimi, & al., 1998**, Theoretical and experimental study of solar dryer, Renewable Energy 13, pp. 439-451,
- [2] **S. A. Reardon, & al., 1998**, Friction, heat and mass transfer for paper drying, Int. J. Heat Mass transfer 41, pp. 1313-1325,
- [3] **M. Martin, & al., 1995**, La perte de température à travers la charge : intérêt pour le pilotage d'un séchoir à bois à haute température, Int. J. Heat Mass transfer 38, pp. 1075-1088,
- [4] **P. Sebastian & al., 1993a**, Les nombres d'Unités de transfert, Thermique, Massique, outils rapides de simulation de séchoirs, Int. J. Heat Mass transfer 36, pp. 1773-1782,
- [5] **P. Sebastian & al., 1993b**, Les réseaux de modules d'unités de transferts, Thermique, Massique, outils pertinents de séchoirs, Int. J. Heat Mass transfer 36, pp. 1763-1772,
- [6] **A. Ahmed-Zaid, 1999**, Optimisation des capteurs solaires plans à air, application au séchage de produits agricoles et de la pêche, thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,
- [7] **M. N. A. Hawlader, & al., 1991**, Drying Characteristics of Tomatoes, J. Food. Eng. 14, pp. 259-268,
- [8] **O. Techasena, & al., 1994**, Simulation of Deep Bed Drying of Carrots, J. Food. 16, pp. 267-281,
- [9] **V. K. Sharma, & al., 1995**, Experimental Investigation of Different Solar Dryers Suitable for Fruit and Vegetable Drying, Renewable Energy 6, pp. 413-424,
- [10] **P. G. Patil, & al., 1989**, Simulation of Solar Air Drying of Rapeseed, Solar Energy 43, pp. 305-320,
- [11] **E. Lavialle/Prelois, 1993**, Du séchage d'une noix aux procédures de gestion d'un séchoir : Analyse en terme de qualité et d'énergie, thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1,
- [12] **B. Zeghmati, 1981**, Modélisation informatique d'un séchoir à effet de serre pour fruits et légumes, thèse doctorat, Université de perpignan,
- [13] **M. A. Du Peuty-Charbonnier, 1995**, Etude des transferts de chaleur et de masse en milieu granulaire : Application au séchage du Riz Paddy, thèse doctorat, Université de Poitiers,
- [14] **M. A. Salgado Cervantes, 1988**, Etude expérimentale et modélisation du séchage à l'air chaud de la pulpe de betterave et du manioc, thèse de doctorat, INP Toulouse,

- [15] **C. Ahouannou, 2001**, Etude du Séchage de Produits Agroalimentaires Tropicaux : Cas du manioc, du gingembre, du gombo et du piment, thèse de doctorat, Université Nationale de Benin,
- [16] **A. Youcef-Ali, 2001**, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre,
- [17] **G. Lewis & M. Randall, 1923**, Thermodynamics, New-York, Addition-Wesley Publishing Company,
- [18] **W. Scott, 1957**, Water relations of foods spoilage microorganisms, Advances in Food Research, 7, pp. 83-127,
- [19] **M. Loncin, 1961**, Les opérations unitaires du génie chimique, Edition Dunod, Paris, France,
- [20] **GERT et GERES, 1986**, Le séchage solaire des produits alimentaires, édition le Point sur, dossier n°8, p. 7-82
- [21] **A. Belghith, & al., 1999**, Experimental study of drying kinetics of sage in a drying tunnel working in forced convection, Rev. Energ. Ren. 2, pp. 17-26,
- [22] **M. Kouhila, & al., 1999**, Approche expérimentale des courbes de sorption de la menthe en vue d'un séchage par énergie solaire, Rev. Energ. Ren. 2, pp. 61-68,
- [23] **O. Kricher & K. Kroll, 1963**, Technique de séchage, 2^e édition de « Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag (1956) » Traduite par CETIAT, Orsay,
- [24] **M. El Hisse, 1987**, Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan 125p,
- [25] **M. Daguinet, 1985**, Le séchage solaire théorie et pratique, UNESCO, Paris,
- [26] **J. P. Bouverat-Bernier, & al., 1990**, Optimisation des conditions de séchage de la feuilles de menthe poivrée, Herba Gallica, 1, pp. 83-95,
- [27] **B.-B. Odile, 1991**, Etude des effets d'un traitement thermique sur la qualité (flaveur) de quelques plantes aromatiques : Basilic, *Ocimum Basilicum L.* ; Menthe, *Menthe Piperita* ; Persil, *Petroselinum Sativum Hoffm* ; Estragon, *Artemesia Dracunculus L.*, Thèse de Doctorat, Université de Paris VII,
- [28] **W. K. Lewis, 1921**, The rate of drying of solid, Ind. Eng. Chem. 13, 5, pp. 427-432,
- [29] **T. K. Sherwood, 1929**, The drying of solid, Ind. Eng. Chem. 21, 1, pp. 12-16,
- [30] **E. A. Fischer, 1935**, Some fundamental principles of drying, J. Soc. Chem. Ind., 54 London, pp. 343-348,

- [31] **A.V. Luikov**,
• 1964, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Advance in Heat Transfer 1, New York,
• 1966, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, Oxford,
- [32] **S. Whitaker**, 1977, Simultaneous Heat , Mass, and Momentum Transfer in Porous Media : A theory of drying, in Advances in Heat Transfer 13, academic, New York, pp. 119-203,
- [33] **S. Whitaker**, Heat and Mass transfer in granular porous media, in Advances in drying 1, Ed A. S. Mujumdar, Hemisphere Publ. Corp. Washington pp. 23-59.
- [34] **S. Whitaker & W. T-H Chou**, 1983, Drying granular porous media: theory and experiment, Drying technology, pp. 3-33,
- [35] **J. M. Hernandez**, 1991, Séchage du chaîne : caractérisation, procédés convectif et sous vide, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux,
- [36] **A. Hamed**, 1985, Séchage d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite « Application au séchage solaire du bois », Thèse de Doctorat, Université de Perpignan,
- [37] **J. Khemiri**, & al., 1993, Modélisation des transferts couplés en milieu poreux : Application au séchage en vapeur d'eau surchauffée d'un lit granulaire, JITH pp. 152-160,
- [38] **G. M. Rios**, & al., 1987, Transferts simultanés de matière et de chaleur entre un lit fluidisé hétérogène et des corps immergés en libre flottation, Entropie 136, pp. 41-45,
- [39] **D. A. De Varies**, 1987, The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited, J. Heat and Mass transfer 30, 7 pp. 1343-1350,
- [40] **A. Touhami**, 1990, Etude de séchage d'un cylindre annulaire poreux humide sous l'action d'un courant d'air forcé dans le conduit central : Couplage entre les équations de Luikov et celles de la couche limite, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan,
- [41] **D. Nguyen Haa** & al., 1997, Transient thermal convection in a spherical enclosure containing a fluid core and a porous shell, Int. J. Heat Mass Transfer 40, 2 pp. 379-392,
- [42] **M. Kouhila**, & al., 1998, Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire, Rev. Energ. Ren. Physique énergétique, pp. 1-5,
- [43] **A. B. Newman**, 1931, The drying of porous solids diffusion calculation, Trans. Amer. Inst. Chem. Engng. 27, pp. 310-333,

- [44] **Fortes & Okos, 1976**, A non equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media, First Int. Symp. Science Press Princeton, pp. 100-109,
- [45] **H. Amir, & al., 1987**, Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite, Int. J. Heat Mass Transfer 30, 6, pp. 1149-1158,
- [46] **A. Bennis, 1997**, Transferts de chaleur et de masse lors du séchage du liège par convection forcée, Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad de Marrakech,
- [47] **H. Ben Aissia, & al., 1993**, Etude numérique des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage convectif des matériaux de construction, JITH, pp. 512-518,
- [48] **C. Moyne, 1985**, Etablissement des courbes de séchage – Courbes Caractéristiques et exploitation, Compte rendu des premières journées scientifiques de l'association Française de séchage dans l'Industrie et l'agriculture (A. F. S. I.A.),
- [49] **C. Moyne, & J. R. Puiggali, 1991**, Le séchage : bilan et perspective, Rev. Gén. Therm. Fr. n°-356-357, août-septembre,
- [50] **Adnan Midilli, & Haydar Kucuk, 2003**, Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, Energy Conversion and Management 44, pp. 1111–1122
- [51] **I. Doymaz, 2007**, The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, J. Food. Engng.79, pp. 243-248,
- [52] **L. Ait Mohammed, & al., 2005**, Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection, Energy Conversion and Management 46, pp. 1473-1483,
- [53] **J. Van Brakel, 1980**, Mass transfer in convective drying, Advance in drying 1, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 217-268,
- [54] **M. Kouhila, 2001**, Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (Menthe, Verveine, Saugue et Eucalyptus) de la région de Marrakech, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Morocco, p. 170,
- [55] **Fornell & al., 1980**, Experimental study and modelization for air drying of vegetables products, Leb. Wiss. Und Technol. 14, pp. 96-100,
- [56] **M. Mourad, 1992**, Contribution à l'étude des cinétiques de déshydratation et d'évolution de la qualité commerciale du Maïs au cours du séchage en lit fluidisé à flottation, thèse de doctorat, INP Toulouse,

- [57] **O.V. Ekechukwu, & B. Norton,**
- **1999a**, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, *Energy Conversion & Management* 40, pp. 615-655,
 - **1999b**, Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications, *Energy Conversion & Management* 40, pp.657-667,
 - **O.V. Ekechukwu, 1999c**, Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory, *Energy Conversion & Management* 40, pp. 593-613,
- [58] **A. Jamali, & al., 2006**, Single layer drying behaviour of chenopodium ambrosioides leaves in a convective solar dryer and mathematical modelling, *solar energy* (accepted).
- [59] **L. M. Diamante, & P. A. Munro, 1991**, Mathematical modeling of the thin layer Solar Drying of sweet slices, *Solar Energy*, 51, pp. 271-276,
- [60] **M. Sembiring, 1990**, Contribution à l'étude des performances technico-économiques d'un séchoir pour fruits et légumes à chauffage partiellement solaire, thèse doctorat, Université de Poitiers,
- [61] **A. Kanmogne, 2002**, Contribution à l'Etude du Séchage du Cacao au Cameroun : Conception, réalisation et modlisation d'un séchoir adapté aux conditions locales, thèse doctorat, Université de Yaoundé,

Chapitre III

Partie 1 : Détermination expérimentale des
Isothermes de sorption.

2.1.1-INTRODUCTION

L'isotherme de sorption indique la teneur en eau en fonction de l'humidité à une température constante donnée. Toute modification de la qualité ou de la composition du matériau entraîne une modification de ses isothermes de sorption. De par la complexité des phénomènes de sorption, les isothermes de sorption ne peuvent pas être prédites par la théorie mais doivent être établies expérimentalement pour chaque produit.

Les courbes d'isothermes de sorption donnent des informations sur la répartition et l'intensité des liaisons des molécules d'eau ainsi que leur disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimiques et biologiques.

La connaissance de ces courbes est indispensable pour étudier le séchage des produits.

L'objectif de ce chapitre est la détermination expérimentale des isothermes de sorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) pour différentes températures. Les courbes de sorption expérimentales obtenues sont comparées à huit modèles différents en vue de dégager l'équation la plus adéquate.

2.1.2-CONCEPTS FONDAMENTAUX

2.1.2.1-Activité de l'eau dans un produit

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau A_w est identique à l'humidité relative d'équilibre ($A_w = HRE$). Elle est définie comme suit :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (2.1.1)$$

avec :

P_{vp} : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air,

P_{vs} : pression partielle de vapeur saturante,

HR : humidité relative de l'air.

L'activité de l'eau (A_w) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique.

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique.

La figure 2.1.1 illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des denrées alimentaires (M. Belahmidi, & al., 1993 [1], J. J. Bimbenet, & al., 1984 [2], T. P. Labuza, 1968 [3]). Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit :

Pour $A_w < 0,9$, la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ;

Pour $A_w < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives ;

Pour $A_w < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée ;

Pour $0,8 < A_w < 0,7$, les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_w comprises entre 0,25 et 0,35.

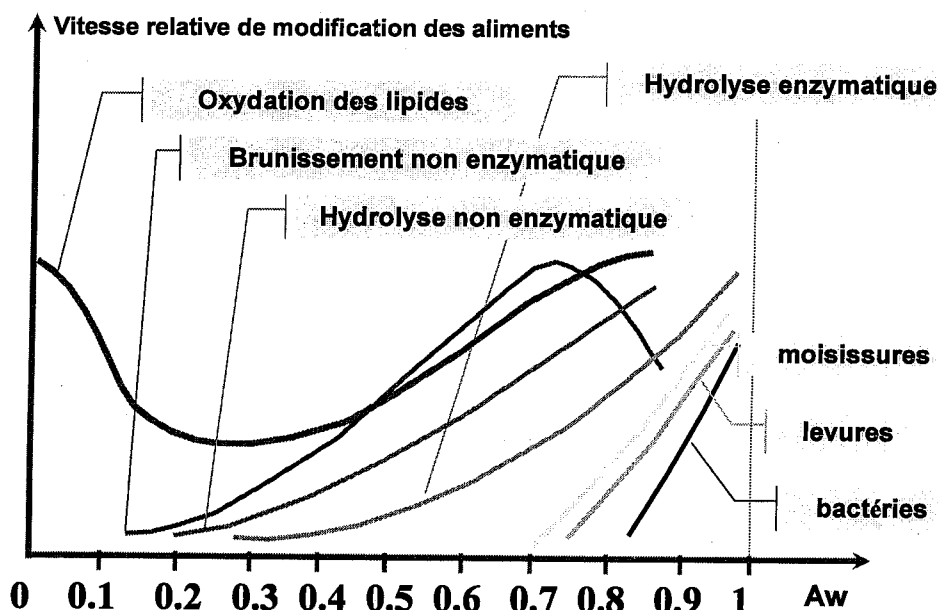


Figure 2.1.1 : Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Labuza, 1968).

2.1.2.2-Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau hygroscopique où l'humidité absolue est définie par la masse de quantité d'eau contenue dans un produit, exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids.

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (2.1.2)$$

avec :

X_{eq} : teneur en eau d'équilibre,

M_s : masse sèche,

M_h : masse humide.

2.1.2.3-Isothermes de sorption

2.1.2.3.1-Définition

L'activité de l'eau A_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température.

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau A_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HRE est appelée :

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

La figure 2.1.2 montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $A_w = 1$ à $A_w = 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis.

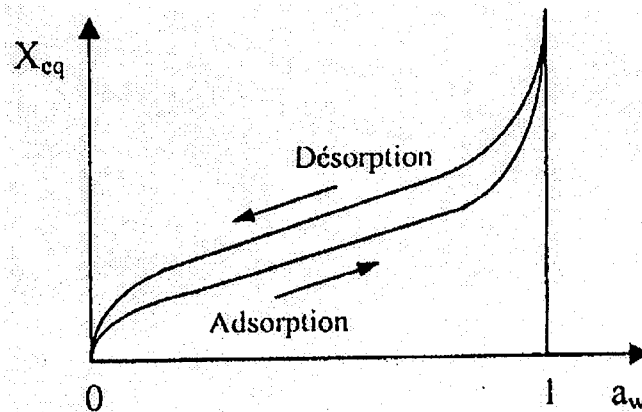


Figure 2.1.2 : Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis

2.1.2.3.2-Forme générale des isothermes

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (figure 2.1.3). Chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

- **Zone 1 :** Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit.

Elle est caractéristique de l'action des forces de Van Der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les surfaces des pores du produit.

L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.

- **Zone 2 :** Adsorption des molécules sur la monocouche initiale.

L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

- **Zone 3 :** Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau microcapillaire constitue une phase continue.

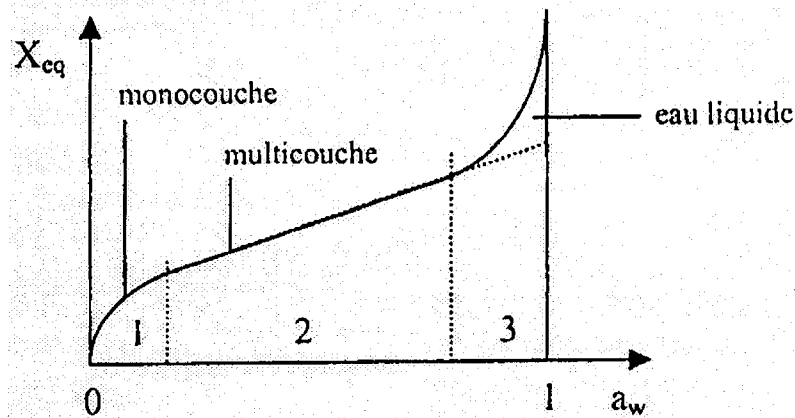


Figure 2.1.3 : Forme générale des isothermes

2.1.2.3.3-Chaleur isostérique de sorption

Le principe de Vant Hoff Le Chatelier prédit qu'à teneur en eau constante, la pression de vapeur saturante diminue avec l'augmentation de la température. Il est donc possible de calculer la chaleur isostérique Q_{st} qui représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat et donc la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure nécessaire pour déshydrater le produit. Q_{st} peut être calculée en utilisant les courbes de sorption obtenues à différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron (**Iglesias & Chirife, 1976a [4]; 1982 [5]**) :

$$\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial(T)} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \quad (2.1.3)$$

En intégrant l'équation (2.1.3) on obtient :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right)\frac{1}{T} + K \quad (2.1.4)$$

La valeur de Q_{st} (kJ/mol) augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation augmente (**C. T. Kiranoudis & al., 1993 [6]**).

2.1.3-DÉTERMINATION EXPERIMENTALE DES ISOTHERMES DE SORPTION

2.1.3.1. Matériel et mode opératoire

La détermination des isothermes d'adsorption-désorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) a été effectuée avec la méthode gravimétrique statique. Cette méthode assure la régularisation de l'humidité par contact avec des solutions salines aqueuses au-dessus desquelles la pression de vapeur d'eau, à température donnée, est parfaitement connue. Les solutions salines saturées utilisées sont : KOH, (MgCl₂, 6H₂O), K₂CO₃, NaNO₃, KCl et (BaCl₂, 2H₂O). Ces solutions permettent d'obtenir des humidités relatives variant de 0,05 à 0,9 (H. Bizot & J. L. Multon, 1978 [7]) (Tableau 2.1.1).

Les figures 2.1.4 et 2.1.5 présentent le schéma du dispositif expérimental utilisé. Il se compose d'une étuve remplie de six bocaux contenant chacun une solution saline différente.

Les expériences d'adsorption et de désorption menées ont été réalisées à trois températures différentes : 30, 40 et 50°C et à six valeurs d'humidité relative.

Les échantillons frais destinés au processus de désorption du *Mentha viridis* sont découpés en petits morceaux environ de mêmes masses.

Pour obtenir l'isotherme d'adsorption, les échantillons sont préalablement séchés dans une étuve réglée à une température de 105°C.

Puis les échantillons sont introduits dans les bocaux et pesés tous les deux jours jusqu'à ce que la variation de masse entre deux mesures successives devient inférieure à 1%. L'équilibre thermodynamique est alors considéré comme atteint. Dès que les masses humides d'équilibre sont déterminées, les échantillons sont introduits dans une étuve à 105°C pendant 24 heures afin de vérifier leurs masses sèches.

Après avoir obtenu les masses humides et sèches de toutes les prises d'essais, les teneurs en eau d'équilibre sont calculées à l'aide de la relation (2.1.2).

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

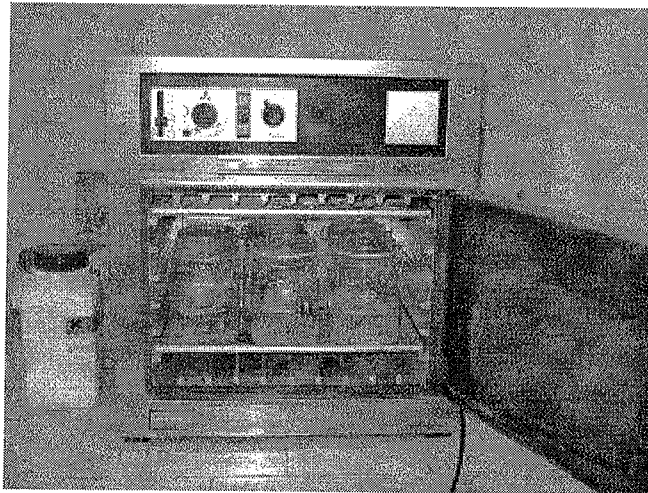


Figure 2.1.4 : Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption

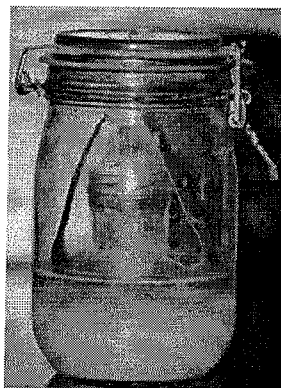


Figure 2.1.5 : Unité du dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption.

Tableau 2.1.1: Valeurs standard des activités de l'eau A_w des six sels saturés utilisés pour la détermination des courbes de sorption.

Solutions salines	Activité de l'eau A_w		
	30 °C	40 °C	50 °C
KOH	0,0738	0,0626	0,0572
MgCl ₂ , 6H ₂ O	0,3238	0,3159	0,3054
K ₂ CO ₃	0,4317	0,4230	0,4091
NaNO ₃	0,7275	0,7100	0,6904
KCl	0,8362	0,8232	0,8120
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0,8980	0,8910	0,8823

2.1.3.2-Résultats expérimentaux et modélisation

2.1.3.2.1-Isothermes de sorption du *Mentha viridis*

L'équilibre hygroscopique de *Mentha viridis* est atteint au bout de dix jours pour la désorption et huit jours pour l'adsorption.

Les figures 2.1.6, 2.1.7 et 2.1.8 montrent respectivement les résultats expérimentaux obtenus pour l'adsorption et pour la désorption du *Mentha viridis* pour les températures 30, 40 et 50°C. La courbe d'absorption ne se superpose pas avec la courbe de désorption, mettant en évidence un phénomène d'hystérésis. L'isotherme de l'humidification (adsorption) est inférieure à celle de la déshydratation (désorption).

Différentes hypothèses sont émises dans la littérature pour expliquer ce phénomène d'hystérésis (S. S. Aregba, 2001 [8], C. Ertekin & M. Sultanoglu, 2001 [9], M.D. Hossain & al., 2001 [10], et M. Kouhila, & al., 2001 [11]). Selon R. Al hodali 1997 [12], l'hystérésis de corps susceptibles de gonfler est due au fait que les déformations de ces corps lors de leur gonflement et de leur déshydratation ne se déroulent pas de manière élastique. En effet, même en diminuant ou en éliminant les forces de déformation en action, l'état de déformation de ces corps se maintient partiellement. Il en résulte des tensions diminuées, une pression de gonflement réduite et une capacité de sorption plus importante lors de la désorption. Lors d'une déshydratation importante ou totale, des modifications structurelles irréversibles peuvent apparaître.

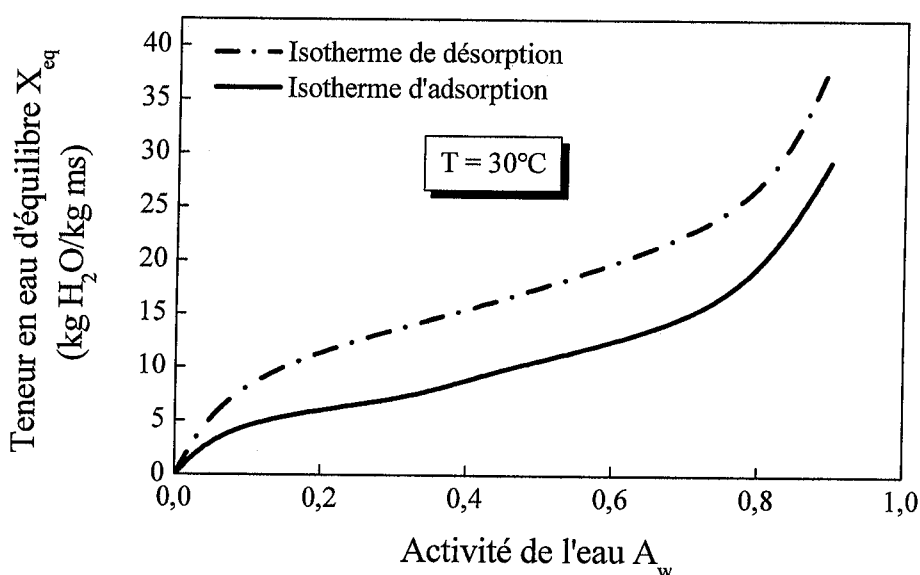


Figure 2.1.6 : Isothermes de désorption et d'adsorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) montrant l'effet d'hystérésis pour ($T = 30^{\circ}\text{C}$).

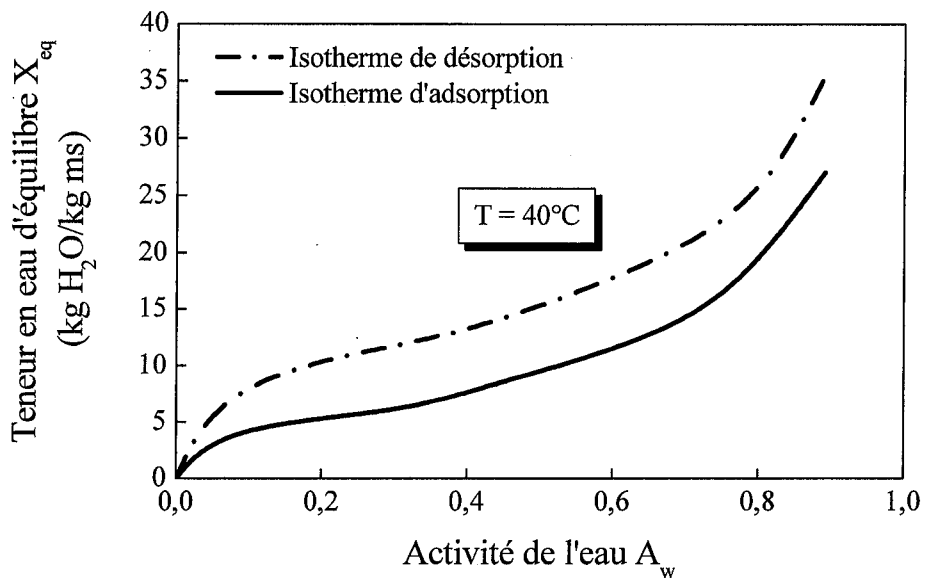


Figure 2.1.7 : Isothermes de désorption et d’adsorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) montrant l’effet d’hystérésis pour ($T = 40^{\circ}\text{C}$).

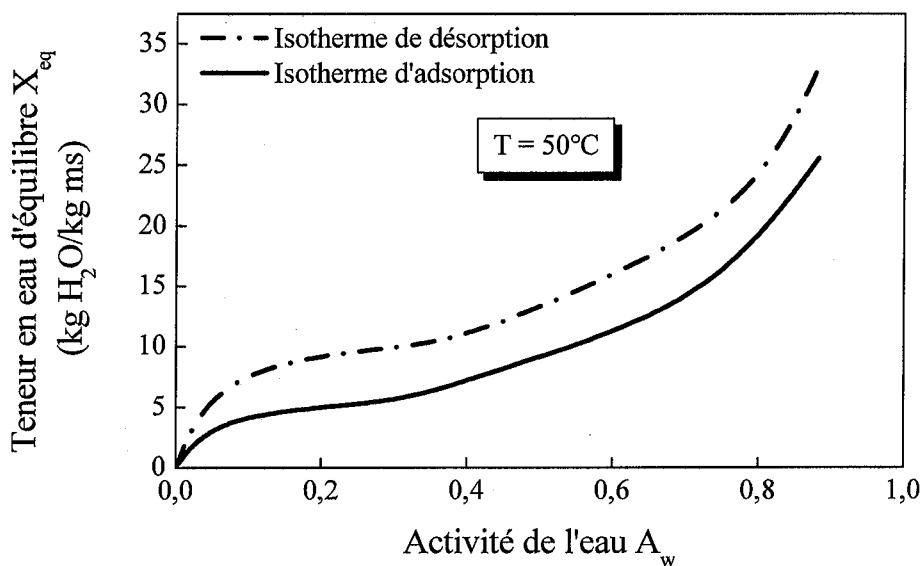


Figure 2.1.8 : Isothermes de désorption et d’adsorption de la menthe verte (*mentha viridis*) montrant l’effet d’hystérésis pour ($T = 50^{\circ}\text{C}$).

Les figures 2.1.9 et 2.1.10 représentent la variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'activité de l'eau du milieu pour les trois températures étudiées 30, 40 et 50°C. Ces figures montrent que pour une activité de l'eau A_w du milieu constante la teneur en eau d'équilibre X_{eq} augmente inversement avec la température (T. P. Labuza, & al., 1985 [13], Z. Irzyniec & J. Klimczak, 2003 [14]).

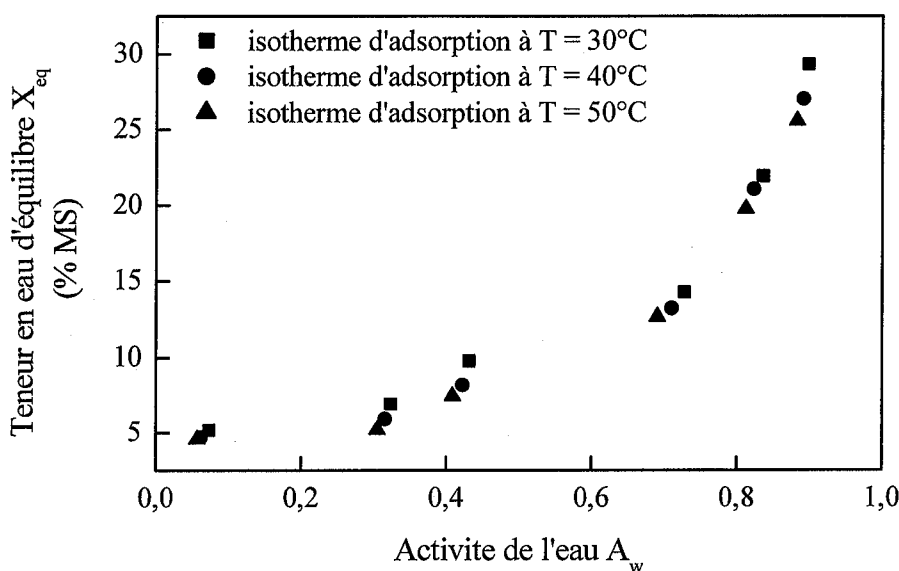


Figure 2.1.9 : Influence de la température sur les isothermes d'adsorption du *Mentha viridis*.

Les courbes d'isothermes de sorption présentent une forme sigmoïdale. Ces résultats obtenus sont similaires avec d'autres résultats rapportés dans la littérature (N. D. Menkov, & al., 1999 [15], J. Stencl, 1999 [16], M. Kouhila & al., 2001 [17], M. Kouhila & al., 2002 [18], S. Lahsasni & al., 2002 [19], K. J. Park, & al., 2002 [20], S. Lahsasni & al., 2003 [21], L. Ait Mohammed, & al., 2005a et 2005b [22] et A. Jamali, & al., 2006 [23]).

Pour des températures élevées l'état d'excitation des molécules est plus élevé, entraînant une diminution des forces d'attraction des molécules d'eau entre elle. Pour des températures constantes, l'activité de l'eau A_w augmente avec la teneur en eau d'équilibre X_{eq} .

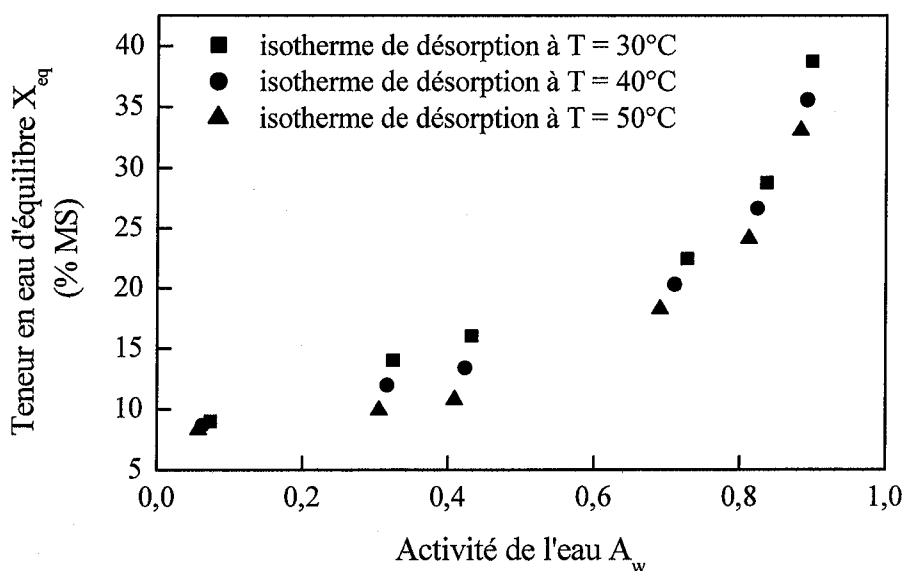


Figure 2.1.10 : Influence de la température sur les isothermes de désorption du *Mentha viridis*.

2.1.4-MODELISATION DES COURBES DE SORPTION

2.1.4.1-Modèles de description des isothermes de sorption

Plusieurs modèles mathématiques, relations empiriques reposant sur des bases plus ou moins physiques, décrivent la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Nous avons étudié huit modèles différents trouvés dans la littérature : Henderson modifié, Chung-Pfost modifié, Oswin modifié, Halsey modifié, GAB, Peleg, Langmuir, et BET modifié. Le but est de déterminer le ou les modèles les plus adéquats pour la description des isothermes de sorption de notre produit.

Tableau 2.1.2 : Modèles de description des isothermes de sorption sélectionnés.

Auteurs	Equation du modèle	Références	Domaine de validité de courbe
Henderson modifié	$1 - A_w = \exp \left[-K \cdot (T + n) \cdot X_{eq}^C \right]$	Thompson & al., 1986 [24]	Complète
Chung-Pfost modifié	$A_w = \exp \left[\frac{-A}{T+B} \exp(-C \cdot X_{eq}) \right]$	Pfost & al., 1976 [25]	Complète

Oswin modifié	$X_{eq} = (A + BT) \left[\frac{A_w}{1 - A_w} \right]^C$	Oswin, 1946 [26]	Complète
Halsey modifié	$A_w = \exp \left[\frac{-\exp(A + BT)}{X_{eq}^C} \right]$	Iglesias & Chirife, 1976b [4]	Complète
GAB	$X_{eq} = \frac{A.B.C.A_w}{[1 - B.A_w][1 - B.A_w + B.C.A_w]}$	Van den Berg, 1984, [27]	Complète
Peleg	$X_{eq} = A.A_w^{k_1} + B.A_w^{k_2}$	Peleg, 1993 [28]	Complète
Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{[A + B.A_w^{C-1}]}$	Langmuir I., 1916, [29]	Complète
BET modifié	$X_{eq} = \frac{(A + BT)C.A_w}{[1 - A_w][1 - A_w + C.A_w]}$	Iglesias & Chirife, 1976c [4]; Iglesias, & Chirife, 1982, [30]	Zone 1

Les modèles sont comparés en se basant sur le coefficient de corrélation (r) donné par le logiciel Curve Expert 1.3, l'erreur moyenne relative (EMR), l'erreur standard de la teneur en eau du produit (EST) et le résidu de sorption e_i .

Le meilleur modèle sera celui présentant la plus grande valeur de (r), les plus petites valeurs de (EMR), de (EST) et de e_i . Ces valeurs sont calculées comme suit :

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eq,i,exp} - X_{eq,i,pre}}{X_{eq,i,exp}} \right| \tag{2.1.5}$$

$$EST = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq,i,exp} - X_{eq,i,pre})^2}{d_f}} \tag{2.1.6}$$

$$e_i = X_{i,exp} - X_{i,pre} \tag{2.1.7}$$

avec :

$X_{eq,i,exp}$: la $i^{ème}$ teneur en eau d'équilibre expérimentale,

$X_{eq,i,pre}$: la $i^{ème}$ teneur en eau d'équilibre prédite,

N : le nombre de points expérimentaux

d_f : le degré de liberté de la régression du modèle.

2.1.4.2-Résultats de la modélisation

D'après le tableau 2.1.3, (**annexe A2.1.1**) le modèle de GAB est le meilleur modèle pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption et d'adsorption du *Mentha viridis* avec des valeurs de r de 0,9976 et 0,9964, un EMR de 7.5412 et 4.8800 %, et un EST de 2.0754 et 1,0172 pour la désorption et l'adsorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 0,05 et 0,9.

Pour des humidités relatives comprises entre 0,05 et 0,50, le modèle de BET modifié décrit bien également ces isothermes de sorption pour la *Mentha viridis* avec des valeurs de r égal à l'unité et un (EMR) le plus faible et un (EST) presque nul.

Les isothermes de désorption et d'adsorption du *Mentha viridis* mesurées et calculées pour les huit modèles et pour une température de 30 °C sont présentées respectivement dans les figures de 2.1.11 à 2.1.12. Ces isothermes sont en accord avec l'analyse des valeurs r , EMR et EST. Le reste des figures de A2.1.1 à A2.1.4 des isothermes de désorption et d'adsorption pour les températures 40 et 50 °C sont présentés dans l'**annexe A2.1.2**

Ces figures montrent aussi que les modèles de GAB et de BET modifié décrivent bien l'ensemble des isothermes de désorption et d'adsorption du *Mentha viridis* pour les activités de l'eau A_w 0,05-0,90 et 0,05-0,5 respectivement.

Les paramètres h_1 et h_2 représentent les valeurs moyennes de la chaleur de désorption ou d'adsorption de l'eau dans la *Mentha viridis*. Les valeurs positives de h_2 sont dues à l'interaction exothermique de la vapeur d'eau avec les sites primaires de désorption ou d'adsorption dans la *Mentha viridis*. Les valeurs négatives de h_1 correspondent à la chaleur de désorption ou d'adsorption de la multicouche.

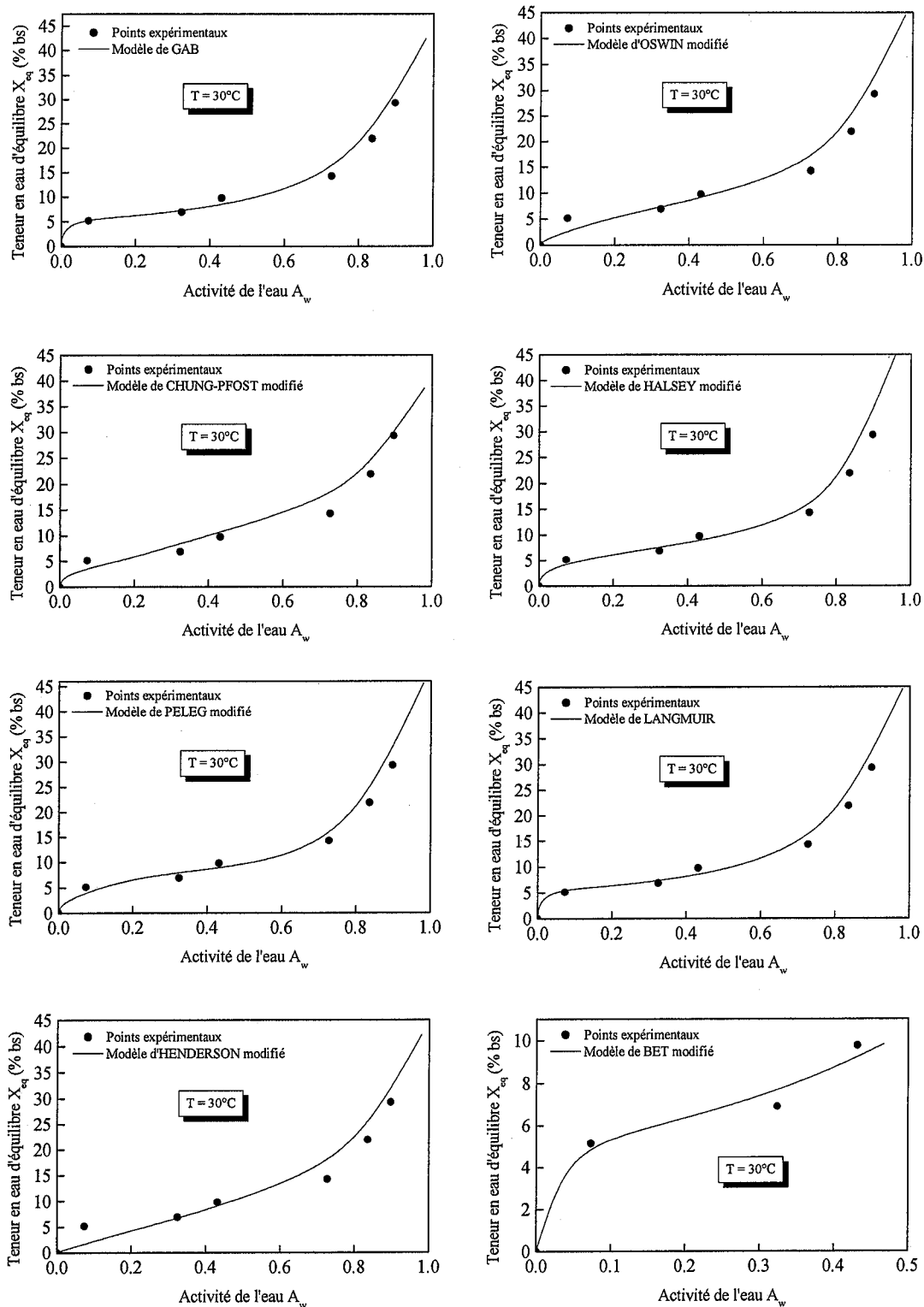


Figure 2.1.11 : Isothermes d’adsorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 30^\circ\text{C}$)

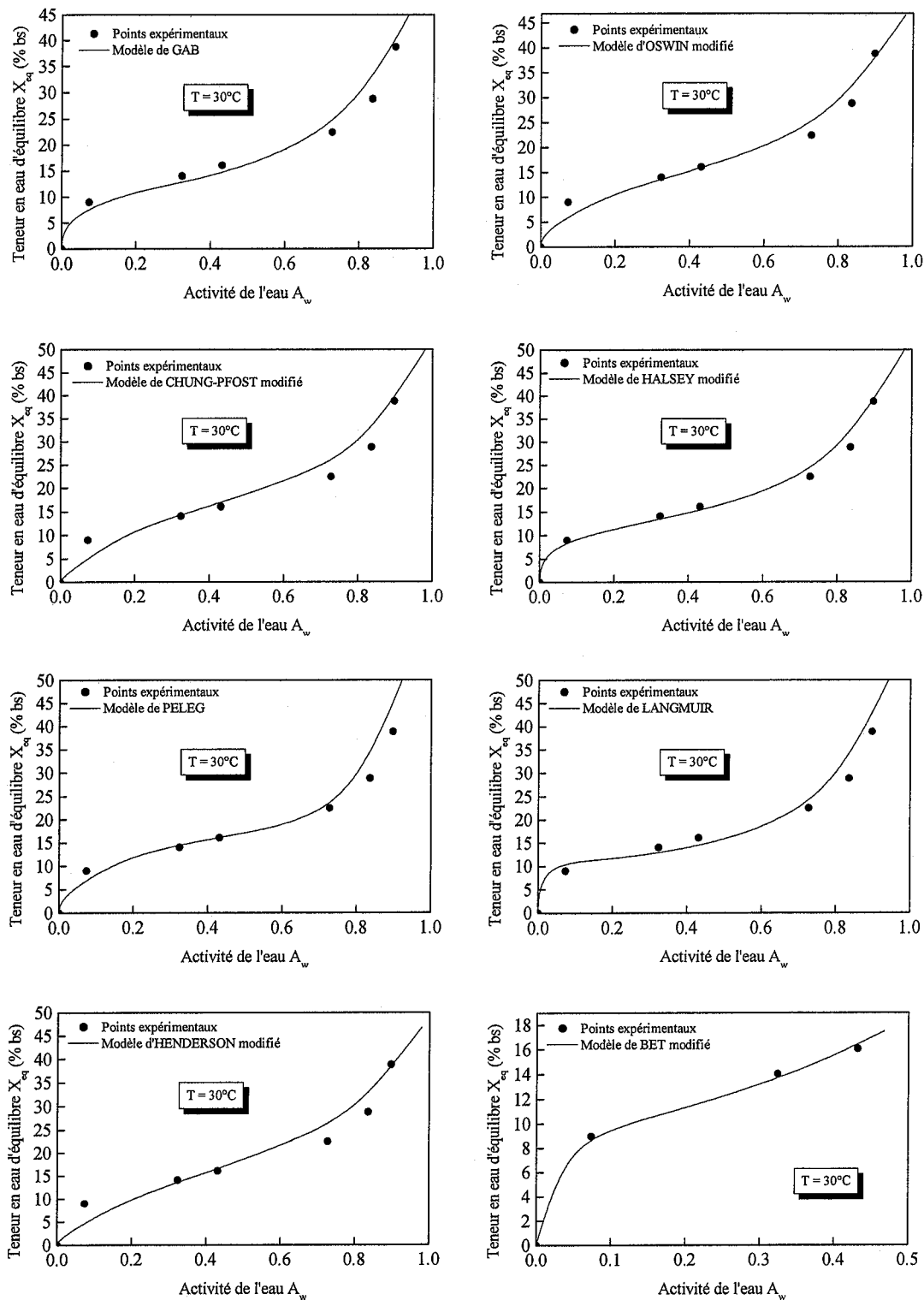


Figure 2.1.12 : Isothermes de désorption de la menthe verte (*Mentha viridis*)

lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 30^\circ\text{C}$)

2.1.5-DÉTERMINATION DE LA CHALEUR ISOSTERIQUE DE SORPTION

D'une manière générale, la vaporisation d'une molécule d'eau nécessite une chaleur égale à la somme de la chaleur latente (L_{vap}) et de la chaleur isostérique de sorption (Q_{st}).

Les chaleurs isostériques sont calculées à partir des isostères de sorption, c'est à dire la courbe donnant $\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ à une teneur en eau constante selon l'équation (2.1.4).

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right)\frac{1}{T} + K$$

Cette chaleur isostérique pour le cas de menthe verte (*Mentha viridis*) est calculée à partir des isostères de désorption et d'adsorption (figures 2.1.13 et 2.1.14)

De la pente des isostères et pour chaque teneur en eau X , on peut déduire la chaleur isostérique correspondante et tracer la courbe $Q_{st} = f(X_{eq})$. Les chaleurs isostériques nettes du *Mentha viridis* sont représentées respectivement dans les figures 2.1.15 et 2.1.16.

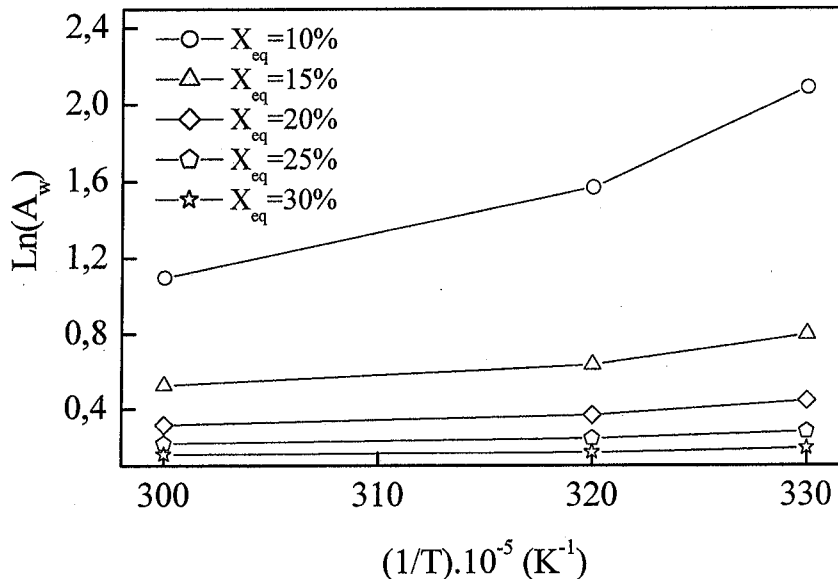


Figure 2.1.13 : Isostères de désorption pour la Mentha viridis

Ces courbes montrent que la chaleur isostérique est plus importante pour les faibles valeurs de la teneur en eau, ce qui illustre la forte liaison de l'eau avec le substrat, et elle devient négligeable devant la chaleur latente pour les humidités élevées.

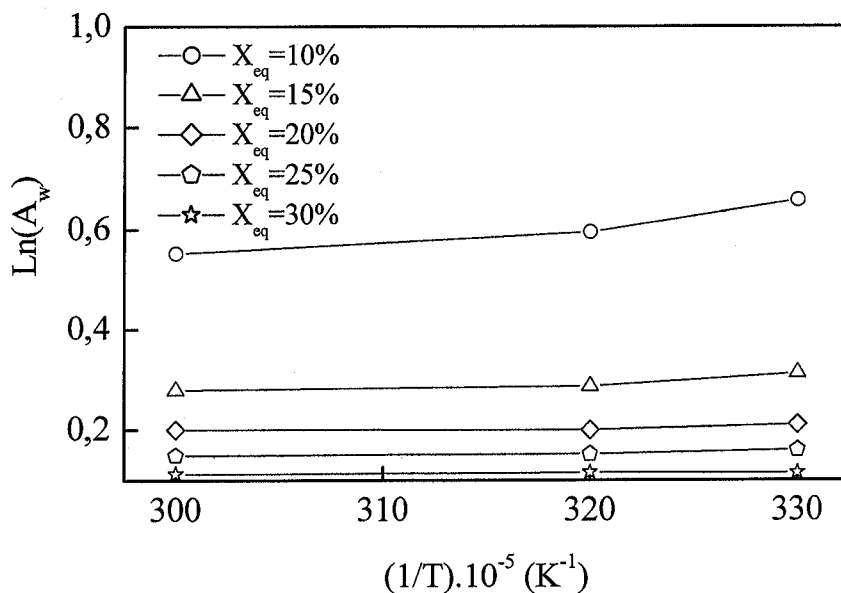


Figure 2.1.14 : Isostères d’adsorption pour la *Mentha viridis*

Selon **E. Tsami** 1991 [31], la diminution rapide de la chaleur isostérique pour les faibles teneurs en eau du produit est due à l’existence des sites polaires de grande activité dans le produit qui sont couverts de molécules d’eau formant la monocouche moléculaire.

D’autres auteurs (**K. Boki & al.**, 1990 [32], **M. C. Salgado & al.**, 1994 [33]) ont expliqué ce phénomène par le fait que dans un domaine très restreint d’humidité, quand la teneur en eau augmente, certains produits se gonflent et favorisent l’ouverture de nouveaux sites d’adsorption de fortes liaisons, ce qui augmente la chaleur isostérique.

Les chaleurs isostériques nettes de désorption et d’adsorption de l’eau du *Mentha viridis* ont été corrélées avec la teneur en eau d’équilibre du produit par les relations empiriques suivantes :

Corrélation empirique de la chaleur isostérique nette de sorption du *Mentha viridis* :

$$Q_{st} (\text{désorption}) = 199,7955 - 25,1683X_{eq} + 1,0678X_{eq}^2 - 0,015X_{eq}^3 \quad (2.1.8)$$

$$r = 0,9947$$

$$Q_{st}(\text{adsorption}) = 18,9545 - 2,2430X_{eq} + 0,0894X_{eq}^2 - 0,0012X_{eq}^3 \quad (2.1.9)$$

$$r = 0,9996$$

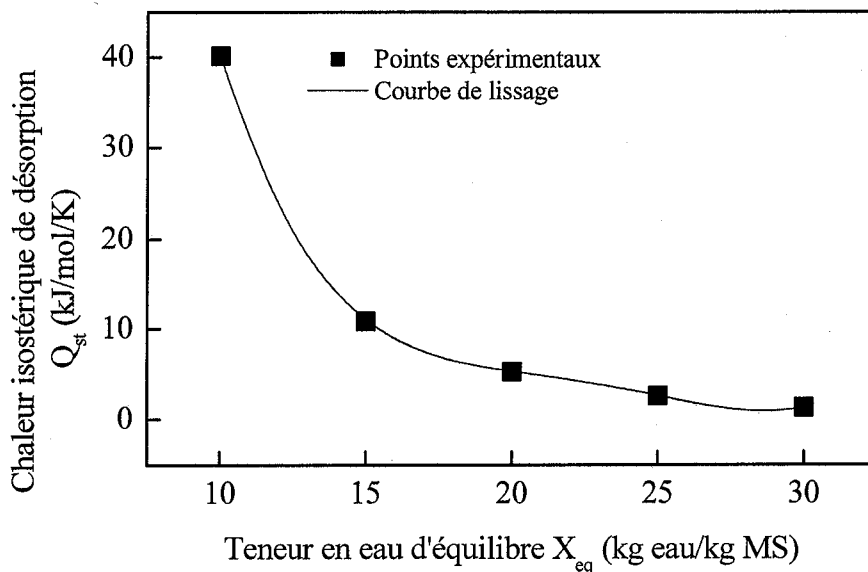


Figure 2.1.15 : Chaleur isostérique de désorption du Mentha viridis.

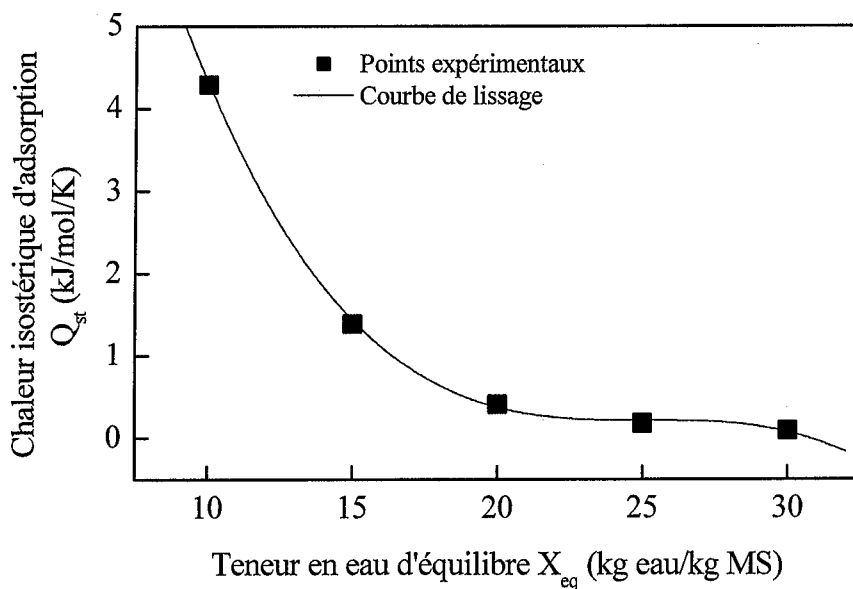


Figure 2.1.16 : Chaleur isostérique d'adsorption du Mentha viridis.

2.1.6-CONCLUSION

Les isothermes de sorption, appelées souvent courbes de sorption, traduisent l'hygroscopicité des produits déterminés par les relations physiques et physico-chimiques existant entre l'eau et les autres constituants. Les courbes de sorption expérimentales de la menthe verte (*Mentha viridis*) ont été déterminées par la méthode gravimétrique statique pour trois températures (30, 40 et 50°C).

Elles ont permis de déterminer les seuils de température maximale et les teneurs en eau finales qui servent à optimiser les conditions de séchage du *Mentha viridis* de manière à assurer sa stabilité physico-chimique et microbiologique durant le stockage.

Les résultats expérimentaux montrent que les isothermes d'adsorption et de désorption du *Mentha viridis* présentent toutes le phénomène d'hystérésis et qu'elles ont une allure sigmoïdale qui caractérise tous les produits végétaux (Multon, 1980). Ces courbes de sorption sont ajustées par huit modèles statistiques. L'analyse des paramètres statistiques r , EMR, EST et leurs résidus e_i montre que les modèles de GAB et de BET sont les meilleurs qui décrivent l'ensemble des isothermes de sorption du *Mentha viridis*.

La détermination des coefficients de GAB, pour la *Mentha viridis*, nous a permis de déterminer les chaleurs isostériques nettes de désorption et d'adsorption qui décrivent l'interaction eau - produit de la multicouche. Les chaleurs isostériques nettes de ce produit ainsi déterminées sont exprimées et corrélées avec satisfaction en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

L'étude thermodynamiques ou la détermination des courbes de sorption constitue une étape préliminaire pour étudier la cinétique de séchage en couche mince d'un produit.

2.1.7-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **M. Belahmidi, & al., 1993**,. Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires, Application aux peaux d'orange et à la pulpe de betterave, Revue Générale de Thermique, vol. 380, pp. 444-453.
- [2] **J. J. Bimbenet, 1978**, Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires, 4^{ème} Cahier du Génie Industriel Alimentaire, SEPAIC, Paris.
- [3] **T. P. Labuza, & al., 1968**, Sorption phenomena in foods, Food Technology, vol. 22, pp. 263-272.
- [4] **H. A. Iglesias, & J. Chirife,**
1976a, Isosteric heats of water vapour sorption on dehydrated foods. Part II: hysteresis and heat of sorption comparison with BET theory, Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, vol. 9, pp. 123-127.
1976b, On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products, Journal of agricultural and Food Chemistry, vol. 24, pp. 24-77.
1976c, BET monolayer in dehydrated foods and food components. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, vol. 9, pp. 107-113.
- [5] **H. A. Iglesias, & J. Chirife, 1982**, Water sorption parameters for food and food components, Handbook of food isotherms, Academic Press, New York.
- [6] **C. T. Kiranoudis & al., 1993**, Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, Journal of Food Engineering, vol. 20, pp. 55-74.
- [7] **H. Bizot & J. L. Multon, 1978**, Méthode de référence pour la mesure de l'activité de l'eau dans les produits alimentaires, Annales de Technologie agricole, vol. 27, p. 441.
- [8] **S. S. Aregba, 2001**, Effect of temperature on the moisture sorption isothermes of a biscuit containing processed mango (*Mangifera indica*) Kernel Flour, Journal of Food Engineering, vol. 48 pp. 121-125.
- [9] **C. Ertekin & M. Sultanoglu, 2001**, Moisture sorption isotherm characteristics of pepers, Journal of Food Engineering, vol. 47, pp. 225-231.
- [10] **M. D. Hossain & al., 2001**, Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple, Journal of Food Engineering, vol. 48, pp. 103-107.
- [11] **M. Kouhila, & al., 2001**, Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte. Revue Française Entropie, vol. 233, pp. 20-31.

- [12] **R. Al hodali 1997**, Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit using solar energy and adsorption process, Thèse de Ph.D, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 309 p.
- [13] **T. P. Labuza, & al., 1985**, Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrates food, *Journal of Food Sciences*, vol. 50, pp. 385-391.
- [14] **Z. Irzyniec & J. Klimczak, 2003**, Effect of temperature on sorption isotherms of Brussels sprout. *Nahrung/Food*, vol. 47, n°1, pp. 24-27.
- [15] **N. D. Menkov, & al., 1999**, Applying the linear equation of correlation of Brunauer-Emmet-Teller (BET)-monolayer moisture content with temperature, *Nahrung*, vol. 43, pp. 118-121.
- [16] **J. Stencl, 1999**, Water activity of skimmed milk powder in the temperature range of 20-45°C, *Acta Veterinaria Bruno*, vol. 68, pp. 209-215.
- [17] **M. Kouhila & al., 2001**, Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*), *Journal of Food Engineering*, vol. 47, pp. 281-287.
- [18] **M. Kouhila & al., 2002**, Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus globulus, *Drying Technology*, vol. 20, pp. 2027-2039.
- [19] **S. Lahsasni & al., 2002**, Experimental study and modelling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Engineering*, vol. 55, pp. 201-207.
- [20] **K. J. Park, & al., 2002**, Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa L.*), *Journal of Food Engineering*, vol. 51 pp. 193-199.
- [21] **S. Lahsasni & al., 2003**, Moisture adsorption-desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures, *Energy Conversion & management*, vol. 44 pp. 923-936.
- [22] **L. Ait Mohammed, & al., 2005a**, Equilibrium moisture content and heat of sorption of *Gelidium sesquipedale*, *Journal of Stored Products Research*, vol. 41, pp. 199-209.
- 2005b**, Moisture sorption isotherms and heat of sorption of bitter orange leaves (*Citrus aurantium*). *Journal of Food Engineering*, vol. 67, pp. 491-498.
- [23] **A. Jamali, & al., 2006**, Moisture adsorption-desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures, *Journal of Food Engineering*, vol., 77, pp. 71-78.

- [24] **T. L. Thompson, & al., 1986**, Mathematical simulation of corn drying a new model, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 11, pp. 582-586.
- [25] **Pfost & al., 1976**, Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains, American Society of Agricultural Engineers, Paper n° 76-3520, St. Josef, MI.
- [26] **C. R. Oswin, 1946**, The kinetics of package life. III. Isotherm, Journal of Society of Chemical industry, vol. 65, pp. 419-421.
- [27] **C. Van den Berg, 1984**, Description of water activity of food engineering purposes by means of the GAB model of sorption, in : McKenna, B.M. (Ed), Engineering and Foods, New York : Elsevier, p. 119.
- [28] **Peleg, 1993**, Assessment of semi-empirical four parameter general model for sigmoid sorption isotherms, Journal of Food Processing Engineering, vol. 16(1) pp. 21-37.
- [29] **I. Langmuir, 1916**, Journal of American Chemical Society, vol. 46, pp. 1361-1362.
- [30] **H. A. Iglesias, & J. Chirife, 1982**, Water sorption parameters for food and food components, Handbook of food isotherms, Academic Press, New York.
- [31] **E. Tsami, 1991**, Net isosteric heat of sorption in dried fruits, Journal of Food Engineering, vol. 14, pp. 327-335.
- [32] **K. Boki & al., 1990**, Moisture sorption characteristics of kudzu starch and sweet potato starch, Journal of Food Science, vol. 55, n° 1, pp. 232-235.
- [33] **M. C. Salgado & al., 1994**, Modelling of water activity and enthalpy of water sorption in cassava chips, Drying Technology, vol. 12, pp. 1743-1752.

Chapitre III

Partie 2 : Cinétiques de séchage et courbe
caractéristique de séchage.

2.2.1-INTRODUCTION

Le séchage consiste à diminuer l'activité de l'eau des produits séchés jusqu'à une valeur assurant leur conservation. Le processus doit respecter certains critères de qualité liés au produit tout en garantissant, pour la chaîne de production, une cadence et un coût raisonnable.

De nombreux modèles mathématiques empiriques ont été élaborés pour rendre compte de la cinétique de séchage en couche mince des produits végétaux et cela pour divers produits tels que le poivre vert, l'haricot et la courge verte (**O. Yaldiz**, & al., 2001 [1]), les abricots (**T. I Togrul**, **D. Pehlivan**, 2002 [2], **R. Al Hodali**, 1997 [3]), l'Eucalyptus globulus (**M. Kouhila** & al., 2002 [4]), la menthe, la verveine, et la sauge (**M. Kouhila**, 2001 [5]), pistache (**A. Midilli**, & **H. Kucuk**, 2003a [6], **A Midilli**, 2001 [7]), fruit du cactus (**S Lahsasni**, & al., 2004a [8]), carotte, feuilles de menthe, les tranches du potiron et tomate (**I. Doymaz**, 2004 [9], **I. Doymaz**, 2006 [10] et **I. Doymaz**, 2007a et 2007b [11]), les feuilles de Citrus aurantium (**L. Ait Mohamed**, & al., 2005 [12]) et des tartes d'olives (**N. A. Akgun**, & **I. Doymaz**, 2005 [13]).

Dans ce chapitre, nous allons décrire le dispositif de séchage existant au laboratoire (LESPAM) de l'école normale supérieur (ENS) de Marrakech, utilisé pour étudier la cinétique de séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). L'étude de l'influence des différents paramètres tels que la température et le débit d'air sur le processus du séchage a pour but de déterminer les courbes caractéristiques de séchage et à établir une loi de séchage caractéristique de chaque produit.

2.2.2-MATERIEL ET METHODE

2.2.2.1-Description et fonctionnement du système de séchage

Le système étudié est un séchoir convectif indirect couplé à un capteur solaire fonctionnant en convection forcée (figure 1). Il s'agit d'un système sans stockage avec recyclage total ou partiel d'air (**M. Kouhila**, 2001 [5]), dont les éléments constitutifs sont :

- Un capteur solaire à simple circulation et à simple vitrage, de 2,5 m² de surface, incliné de 31° par rapport au plan horizontal et orienté plein sud. Le capteur présente une surface de 2,5 m² (2,5 m de longueur et 1 m de largeur). La couverture est en verre ordinaire. L'absorbeur du capteur solaire est en tôle de fer galvanisé noirci de 0,5 mm

d'épaisseur à surface non sélective. L'isolant thermique arrière est en mousse de polyuréthane d'épaisseur 0,05 m prise en sandwich entre deux tôles d'acier. La distance absorbeur isolant est de 0,025 m et la distance absorbeur vitre est de 0,02 m.

- Une conduite d'aspiration aéraulique constituée d'un tunnel de section parallélépipédique. Un double T (constitué de deux T emboîtés) permet la recirculation totale ou partielle de l'air sortant de la chambre de séchage après la traversée de toutes les claies. Le double T comporte un registre (vanne) papillon pour régler le débit d'air.
- Une chambre de séchage ayant pour dimensions 1,40 m de hauteur, 0,90 m de profondeur et 0,50 m de largeur. Elle est constituée de dix claies.
- Un ventilateur centrifuge ($0,0889 \text{ m}^3/\text{s}$; 80 mm CE, 220V), autorise une vitesse théorique de 1,7 m/s, avec en amont un étranglement qui permet de varier le débit d'air de $0,0296$ à $0,0889 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce ventilateur a une puissance de 0,1 kW.
- Un thermorégulateur de gamme 0-99 °C et de précision 0,1 °C relié à une sonde de platine PT100 agissant sur le chauffage d'appoint électrique permet de fixer la température de consigne à l'entrée de la chambre de séchage.
- Des résistances électriques de puissance 4 kW jouant le rôle de source auxiliaire d'énergie.

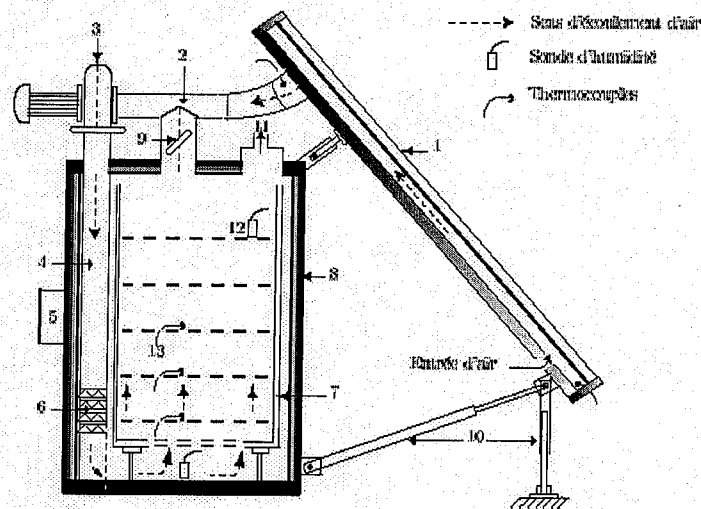


Figure 2.2.1 : Coupe schématique du séchoir solaire indirect

- (1) capteur solaire, (2) conduite de ventilation, (3) ventilateur, (4) conduit d'aspiration d'air chaud, (5) boîte de commande, (6) appoint électrique, (7) chariot mobile, (8) chambre de séchage, (9) recyclage réglable, (10) pieds de réglage, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité, (13) thermocouples.

2.2.2.2-Protocole expérimental

Afin de déterminer les courbes caractéristiques de séchage, nous utilisons le séchoir en fixant les conditions d'entrée de l'air.

Les feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) à sécher sont dégarnies des tiges. Les échantillons sont pesés puis uniformément et régulièrement répartis sur les deux premières claies de la chambre de séchage.

Afin d'assurer une meilleure stabilité des conditions de séchage et une homogénéisation de la température à l'intérieur du séchoir, l'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction des claies chargées dans la chambre de séchage. Les pesées des claies sont effectuées à l'extérieur du séchoir. L'intervalle du temps de pesée des claies est de 10 min au début de l'expérience et atteint 60 min à la fin. La durée de pesée est de l'ordre de 60 à 90 s et elle est déduite du temps total de séchage du produit.

La mesure à l'instant t nous donne la masse humide du produit $M_h(t)$. L'expérience de séchage est arrêtée lorsque trois mesures successives de la masse de la claie affichent une différence n'excédant pas 0,01 g.

2.2.2.3-Grandeurs mesurées

2.2.2.3.1-Mesure des températures

La mesure de la température à l'entrée de l'enceinte de séchage est effectuée à l'aide d'un thermorégulateur de précision $\pm 1,5^\circ\text{C}$ relié à une sonde de platine.

2.2.2.3.2-Mesure de l'humidité de l'air

L'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'une sonde à affichage numérique de marque Humicolor de précision $\pm 2\%$.

2.2.2.3.3-Mesure de la vitesse de l'air asséchant

La vitesse de l'écoulement de l'air est mesurée au moyen d'un vélocimètre lié à un tube de Pitot de 2 mm de diamètre placé à la sortie du conduit d'aspiration aéraulique juste au-dessous de la première claie du séchoir. La précision des mesures est de l'ordre de $\pm 0,2$ m/s.

2.2.2.3.4-Mesure des masses humide et sèche du produit

Les masses humides du produit, sont effectuées au moyen d'une balance électronique à affichage numérique, de précision de $\pm 0,001$ g. Cette méthode de mesure permet de suivre la diminution du poids du produit au cours du séchage.

Afin de déterminer la masse sèche du produit M_s , les échantillons séchés en soufflerie sont ensuite placés dans une étuve régulée à 105 °C durant 6 à 7 heures. Le produit est pesé toutes les heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale.

2.2.3-MODELISATION DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

2.2.3.1-Courbes de séchage

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

La courbe obtenue expérimentalement s'obtient en suivant l'évolution de la masse humide du produit M_h en cours de séchage par pesées successives jusqu'à atteindre la teneur en eau finale \bar{X}_{fin} :

$$\bar{X}(t) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (2.2.1)$$

Pour obtenir la masse sèche M_s du produit, le produit est placé, à la fin de chaque essai, dans une étuve portée à 105 °C.

Cette courbe contient l'ensemble des informations expérimentales. (**M. Belahmidi**, & al., 1993 [14] et **B. C. Boutaleb**, 1997 [15]).

Pour chaque produit, il est possible de définir une valeur optimale de \bar{X}_{fin} pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et organoleptiques (forme, texture, odeur et huiles essentielles) (**T. Rocha Mier**, 1993 [16], **S. Dwivedi**, & al., 2004 [17] et **Encyclopédie d'épices**, 2007 [18]).

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

2.2.3.2-Modèle de séchage en couche mince

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

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

Les diverses équations donnent l'évolution au cours de séchage de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies (**S. Lahsasni, & al., 2004b et 2004c [8]** et **S. Simal, & al., 2005 [19]**).

Le tableau 1 regroupe quelques équations caractéristiques de séchage trouvées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche mince d'un produit.

Modèle	Expression du modèle	Référence
Newton	$X^* = \exp(-kt)$	W. K. Lewis, 1921 [20]
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	C. Page, 1949 [21]
Page modifié I	$X^* = \exp(-(kt)^n)$	D. D. Overhults & al., 1973 [22]
Page modifié II	$X^* = \exp((-kt)^n)$	G. M. White & al., 1981 [23]
Henderson et Pabis	$X^* = a \exp(-kt)$	M. S. Chinnan, 1984 [24]
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$	A. Yagcioglu, & al., 1999 [25]
Two-term	$X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	S. M. Henderson, 1974 [26]
Two-term exponentiel	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Y. I Sharaf-Elden, & al., 1980 [27]
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	C. Y. Wang, & al., 1978 [28]
Approximation de la diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	A. S. Kassem, 1998 [29]
Henderson et Pabis modifié	$X^* = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	V. T. Karathanos, 1999 [30]
Verma et al.	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	L. R. Verma, & al., 1985 [31]
Midilli-Kucuk	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	A. Midilli, et al., 2002 [32]

2.2.3.3-Paramètres statistiques utilisés

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

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

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - \bar{X}_{eqexp,i}) * (X_{eqpre,i} - \bar{X}_{eqpre,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - \bar{X}_{eqexp,i})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqpre,i} - \bar{X}_{eqpre,i})^2}} \quad (2.2.2)$$

avec :

$$\bar{X}_{eqexp,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eqexp,i} \quad (2.2.3)$$

$$\bar{X}_{eqpre,i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eqpre,i} \quad (2.2.4)$$

et :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - X_{eqpre,i})^2}{d_f} \quad (2.2.5)$$

$$ESM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{eqexp,i} - X_{eqpre,i})^2} \quad (2.2.6)$$

où :

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

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

N est le nombre de point expérimentaux et d_f est le degré de liberté de régression du modèle

($d_f = N-n$) où n désigne le nombre des constantes de chaque modèle.

2.2.4-MODÈLE DE COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE

La méthode a été proposée et développée par **D. A. Van Meel** en 1958 [34]. Le modèle CCS n'est valable que pour des échantillons non massifs et à couche mince permettant de négliger les gradients de diffusions. Plusieurs auteurs (**A. Belghit** & al., 2000 [35], **N. Kechaou**, 2000 [36], **A. A. El-Sebaii**, & al., 2002 [37] et **C. Ertekin**, & **O. Yaldiz**, 2004 [38]) ont exploité la notion de (CCS) dans le but de déterminer l'expression de la vitesse de séchage d'un produit. Ce concept est bien expliqué au paragraphe 1.4.3.5.

Les mesures expérimentales permettent d'obtenir un ensemble de courbes de séchage. La courbe caractéristique de séchage (CCS) représente la vitesse de séchage normée par rapport à la vitesse de séchage dans la première phase en fonction de la teneur en eau réduite $(X(t) - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$.

avec :

$X(t)$ teneur en eau à l'instant t ,

X_0 teneur en eau initiale,

X_{eq} teneur en eau à l'équilibre (kg eau /kg MS) donnée par la relation de G.A.B :

$$X_{eq} = \frac{C.K.X_M \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C.K \cdot a_w)} \quad (2.2.7)$$

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

$$C(T) = C_0 \cdot \exp\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right) \quad (2.2.8)$$

Où : $\Delta H_1 = H_m - H_n$

$$K(T) = K_0 \cdot \exp\left(\frac{H_1 - H_n}{RT}\right) \quad (2.2.9)$$

Où : $\Delta H_2 = H_1 - H_n$

C_0, K_0 constantes

H_1 enthalpie de condensation de la vapeur d'eau pure,

H_m enthalpie intégrale de sorption des premières molécules d'adsorbat sur tous les sites primaires,

H_n enthalpie intégrale de sorption des couches d'eau supplémentaires,

R constante des gaz parfaits,

T température,
 X_M teneur en eau à la saturation de la monocouche de Brunauer.

La teneur en eau d'équilibre X_{eq} est déduite des isothermes de désorption du produit (B. Touati & al., 2006 [39] et 2007 [40]).

2.2.5-RÉSULTATS ET DISCUSSION

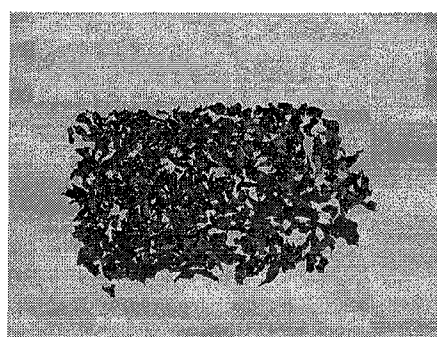
Les expériences de séchage ont été réalisées pendant le mois de mai à juillet 2006 pour les feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) au sein du laboratoire d'énergie solaire et des plantes aromatiques et médicinales à l'Ecole Normale Supérieure de Marrakech sous la direction des messieurs le directeur du laboratoire le professeur Mohammed Kouhila et le docteur Abdelkrim Jamali.

2.2.5.1. Cinétiques de séchage de la menthe verte (*Mentha viridis*)

Les essais ont été effectués pour trois températures de l'air asséchant ($40, 45$ et $50 \pm 0,1^\circ\text{C}$) et pour deux débits d'air ($0,0296$ et $0,0592 \pm 0,002 \text{ m}^3/\text{s}$). Le tableau 2 donne les conditions de séchage des divers essais. La température ambiante durant la période de séchage a variée de 25 à $35 \pm 1^\circ\text{C}$, l'humidité de l'air ambiant de 42% à $56\% \pm 2\%$. La teneur en eau initiale du *Mentha viridis* est de $4,6433\%$ MS et elle a été réduite à une teneur en eau finale variant de $0,0779$ à $0,1512\%$ MS. La figure 2 représente les photos du *Mentha viridis* avant et après séchage.



Menthes fraîches



Menthes séchées à 45°C

Figure 2.2.2 : Photos du *Mentha viridis* avant et après séchage.

2.2.5.1.1. Reproductibilité des expériences

Trois essais de séchage identiques ($T=45^{\circ}\text{C}$ et $D_v=100\text{ m}^3/\text{s}$), effectués sur la *Mentha viridis*, témoignent de la reproductibilité des expériences (Figure 2.2.3). D'autres essais de reproductibilité pour d'autres conditions ont donné les mêmes résultats.

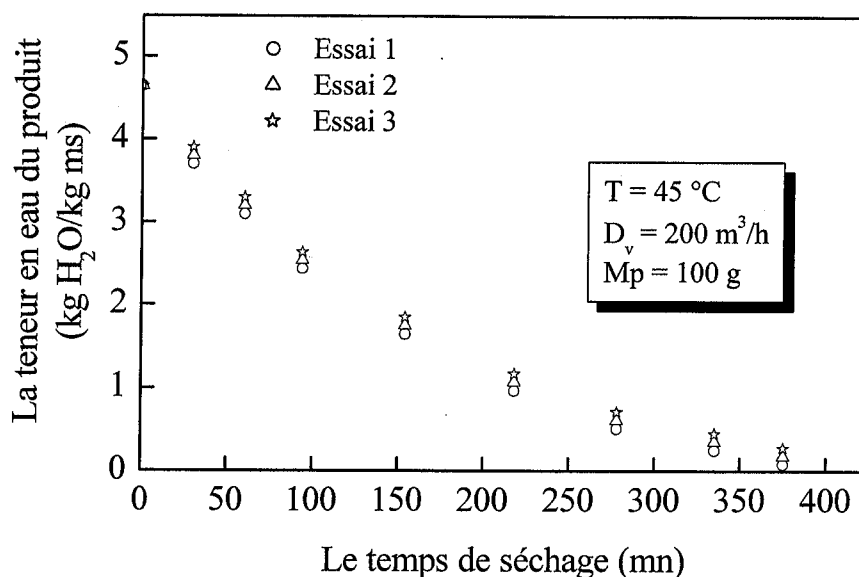


Figure 2.2.3 : Évolution de la teneur en eau de *Mentha viridis* en fonction du temps de séchage pour trois essais.

Tableau 2.2.2 : Conditions de séchage du *Mentha viridis*

Essai	$D_v \pm 0,0020$ (kg/s)	$\theta \pm 0,1$ (°C)	$H_a \pm 2$ (%)	$X_0 \pm 0,05$ (% MS)	$X_{eq} \pm 0,0005$ (% MS)	$X_f \pm 0,003$ (% MS)	t (min)
1	0,0296	40	46,5	4,6473	0,1417	0,0948	505
2	0,0296	45	56	4,637	0,1591	0,0936	390
3	0,0296	50	45	4,637	0,135	0,133	390
4	0,0592	40	46	4,6473	0,1346	0,0835	392
5	0,0592	45	55	4,6473	0,1564	0,0779	375
6	0,0592	50	42	4,6473	0,1293	0,1512	270

2.2.5.1.2-Courbes de séchage

La figure 2.2.4 montre l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour différentes conditions de l'air asséchant. L'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau est représentée dans la figure 2.2.5.

La menthe verte (*Mentha viridis*) est un produit qui ne présente pas de phase 0 lors du processus de séchage. L'absence des phases 0 et 1 dans les produits agroalimentaires en général est due au fait que ces derniers ne sont pas saturés en eau, c'est à dire qu'ils ne contiennent pas d'eau libre (J. J. Bimbenet & al., 1984 [41]).

Des résultats similaires ont été trouvés pour d'autres produits (M. A Basunia, & T. Abe, 2001 [42], B. H. Hassan, & A. I. Hobani, 2000 [43], A. Midilli & H. Kucuk, 2003b [6] T. I Togrul, & D. Pehlivan, 2002 [2], P.C. Panchariya, & al., 2002 [44], C. Ho-Hsien, & al., 2005 [45] et S. Janjai, & P. Tung, 2005 [46]).

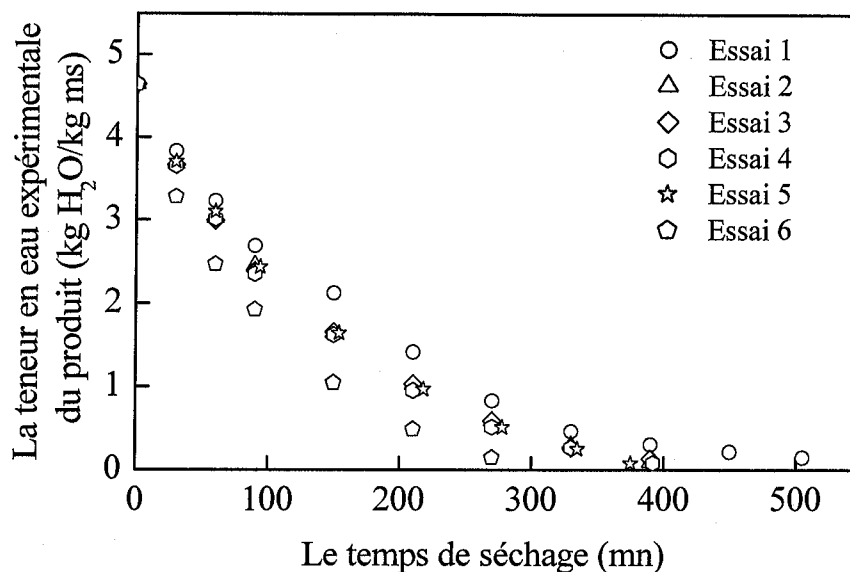


Figure 2.2.4 : Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage de *Mentha viridis* pour différentes conditions de l'air asséchant.

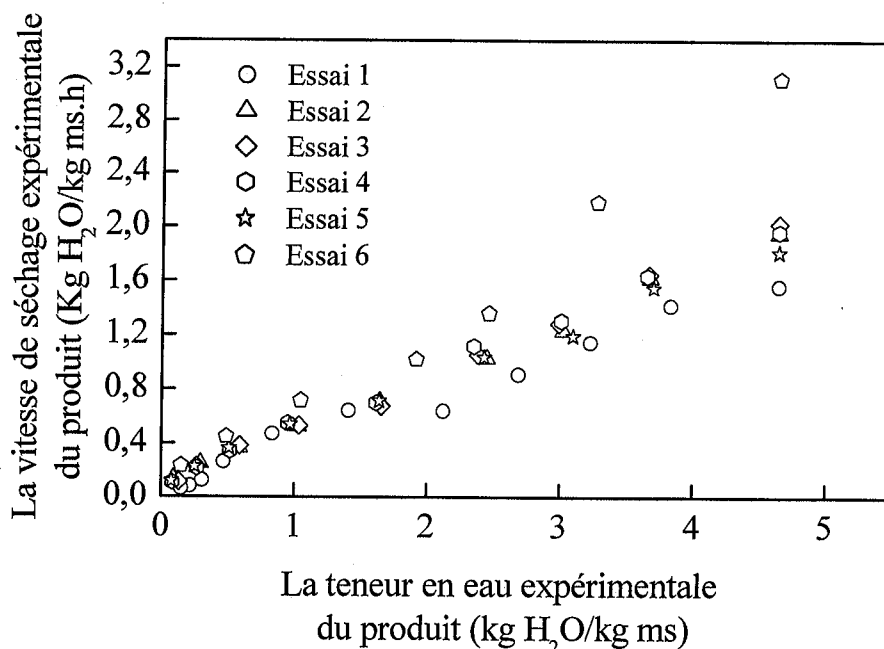


Figure 2.2.5 : Évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du *Mentha viridis* pour différentes conditions de l'air asséchant

2.2.5.1.3-Influence de la température et du débit d'air sur la vitesse de séchage du *Mentha viridis*

Les essais des expériences 4, 5 et 6, réalisés respectivement aux températures 40, 45 et 50°C pour un débit d'air asséchant de 200 m³/h permettent de mesurer l'influence de la température sur le séchage (figure 2.2.6) et montrent que la teneur en eau des feuilles de menthe diminue considérablement quand la température de l'air asséchant augmente.

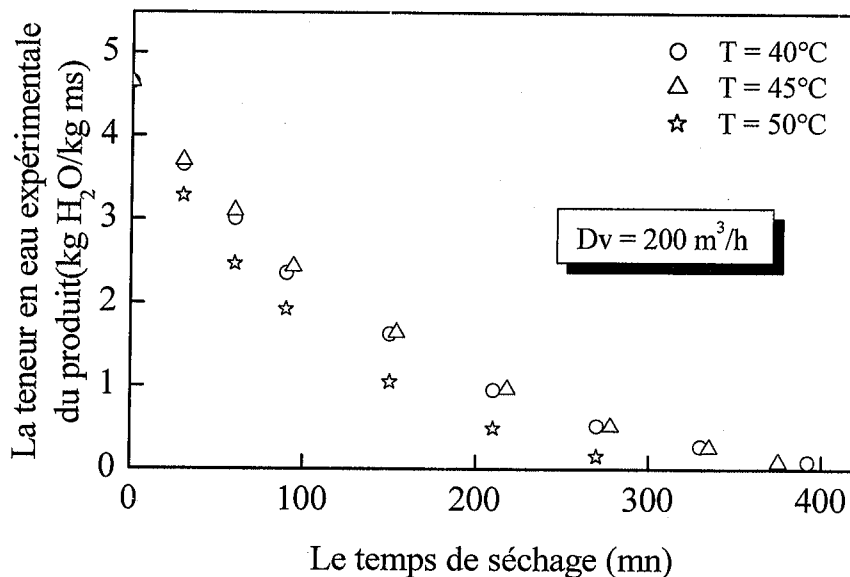


Figure 2.2.6 : Influence de la température de séchage sur la teneur en eau du *Mentha viridis*.

La figure 2.2.7 montre que l'influence du débit d'air, du moins dans la gamme de débit considéré, est moins importante que celle de la température de séchage.

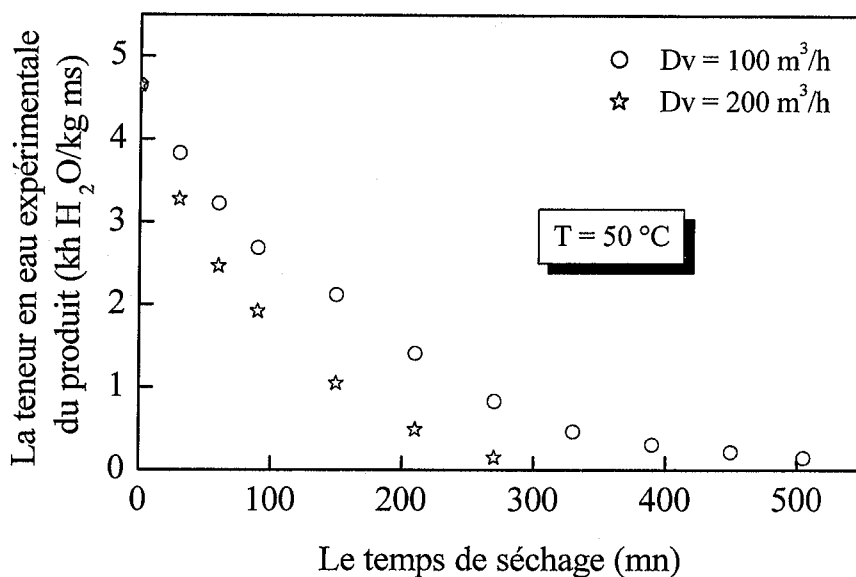


Figure 2.2.7 : Influence du débit d'air sur la teneur en eau du *Mentha viridis*.

Belhamidi (1992) explique ce résultat par le fait que le produit ne représente pas de phase 1. Dans ce cas, le débit d'air asséchant exerce une faible influence du fait que le facteur limitant est le transfert de l'eau à l'intérieur du produit et non pas l'évaporation en surface.

2.2.5.1.4-Courbe caractéristique de séchage du *Mentha viridis*

La figure 2.2.8 représente la courbe CCS de la menthe verte (*Mentha viridis*). Les points expérimentaux obtenus pour des conditions différentes de température et d'humidité de l'air asséchant se regroupent correctement sur la courbe CCS. Le lissage de la CCS de *Mentha viridis*, permet de déterminer l'équation de la vitesse de séchage sous forme d'un polynôme de degré 3 :

$$f = \left[\frac{\left(\frac{-dX}{dt} \right)}{\left(\frac{-dX}{dt} \right)_{in}} \right] = 1,42092X^* - 1,98005X^{*2} + 1,83273X^{*3} \quad (2.2.10)$$

$$r = 0,9820 \text{ et } \text{ESM} = 2,4039$$

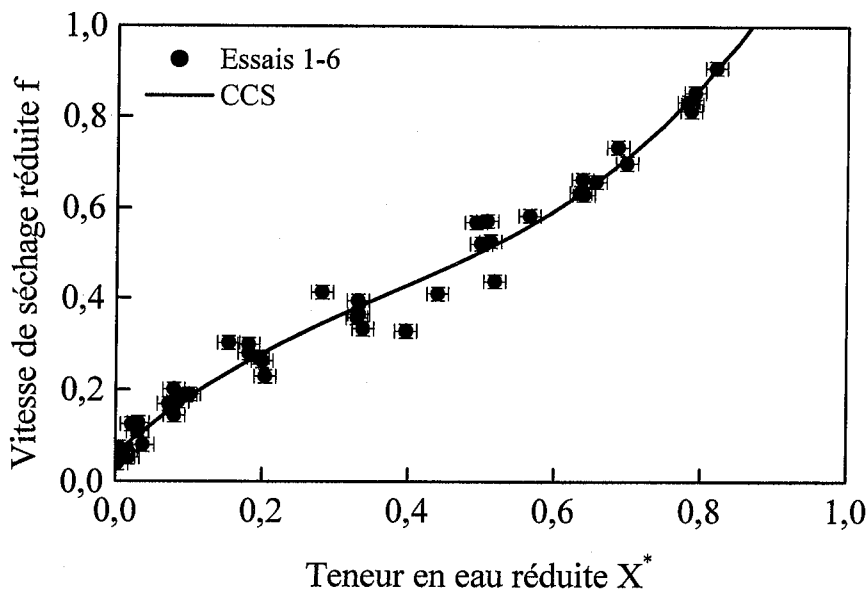


Figure 2.2.8 : Courbe caractéristique de séchage du *Mentha viridis*.

2.2.5.1.5. Lissage des courbes de séchage du *Mentha viridis*

Le tableau 3 résume les coefficients de treize modèles de séchage en couche mince. La précision des différents modèles est analysé en comparant les coefficients de corrélation (r), l'erreur moyenne relative (EMR), l'erreur standard de la teneur en eau du produit (EST) et l'erreur résiduelle (e_i).

Tableau 3 : Coefficients des modèles décrivant la loi de séchage de *Mentha viridis*

Modèle	Coefficients	r	χ^2	ESM
Newton	$k = 0,0110$	0,9948	$7,3996 \cdot 10^{-4}$	$2,4832 \cdot 10^{-2}$
Page	$k = 0,01; n = 1,0204$	0,9949	$9,06 \cdot 10^{-4}$	$2,4576 \cdot 10^{-2}$
Page modifié I	$k = 0,0110; n = 1,0209$	0,9949	$9,0454 \cdot 10^{-4}$	$2,4557 \cdot 10^{-2}$
Page modifié II	$k = 0,0106; n = 0,0419$	0,9948	$9,2426 \cdot 10^{-4}$	$2,4823 \cdot 10^{-2}$
Henderson & Pabis	$a = 0,9877; k = 0,0109$	0,9948	$9,1248 \cdot 10^{-4}$	$2,4664 \cdot 10^{-2}$
Logarithmique	$a = 1,0306; k = 0,0076;$ $c = -0,1247$	0,9998	$3,4871 \cdot 10^{-5}$	$4,1756 \cdot 10^{-3}$
Two term	$a = 0,4938; k_0 = 0,0109;$ $b = 0,4938; k_1 = 0,0109$	0,9948	$1,825 \cdot 10^{-3}$	$2,4664 \cdot 10^{-2}$
Two term exponentiel	$a = 1,0000; k = 0,0110$	0,9948	$9,2648 \cdot 10^{-4}$	$2,4853 \cdot 10^{-2}$
Wang & Singh	$a = -0,0081;$ $b = 1,7060 \cdot 10^{-5}$	0,9813	$3,0073 \cdot 10^{-3}$	$4,4776 \cdot 10^{-2}$
Approximation de la diffusion	$a = 2,2303 \cdot 10^{+5}; k = 7,2 \cdot 10^{-3};$ $b = 0,9999$	0,9966	$8,068 \cdot 10^{-4}$	$2,0085 \cdot 10^{-2}$
Henderson & Pabis modifié	$a = -13,6722; k = 0,0088;$ $b = 10,3276; g = 0,0088;$ $c = 4,3284; h = 0,0092$	1	-----	$1,5456 \cdot 10^{-2}$
Verma <i>et al.</i>	$a = -4,3544 \cdot 10^{+5}; k = 0,0069;$ $g = 0,0070$	0,9965	$8,1467 \cdot 10^{-4}$	$2,0183 \cdot 10^{-2}$
Midilli-Kucuk	$a = 0,9187; k = 0,0092;$ $n = 0,9871; b = 3,0000 \cdot 10^{-4}$	0,9998	$4,5875 \cdot 10^{-5}$	$3,9104 \cdot 10^{-3}$

Le modèle de Midilli-Kucuk semble celui qui décrit le mieux la cinétique de séchage de *Mentha viridis* car il présente la plus grande valeur de r et les plus faibles valeurs de χ^2 et ESM.

La figure 2.2.9 montre qu'il existe un excellent accord entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle de Midilli-Kucuk.

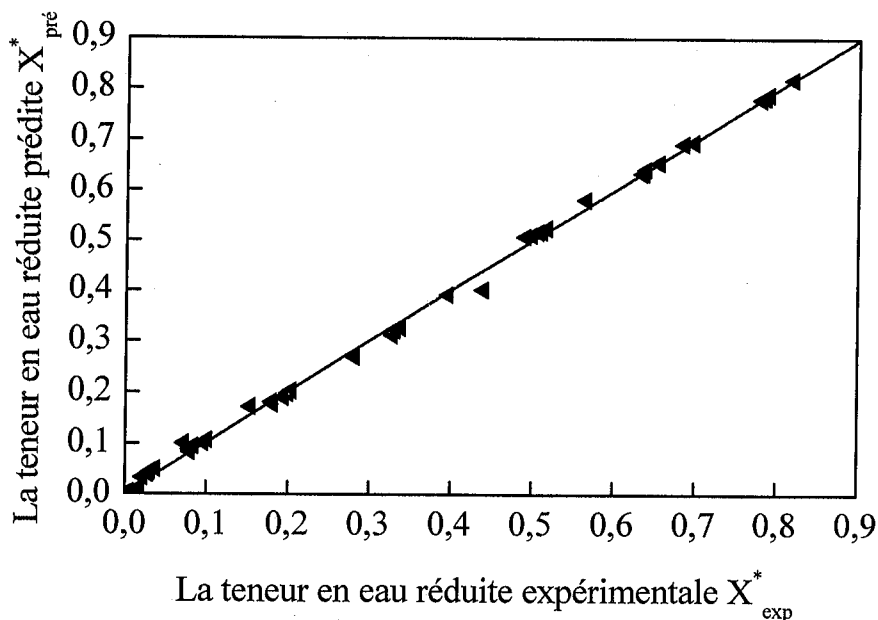


Figure 2.2.9 : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli-Kucuk en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de *Mentha viridis*.

Les coefficients du modèle Midilli-Kucuk sont exprimés en fonction de la température d'air asséchant dans les équations ci dessous:

$$X^* = a.\exp(-kt^n) + bt \tag{2.2.11}$$

$$a(T) = 2,8994 - 0,0887T + 9,92E - 04T^2 \tag{2.2.12}$$

$$k(T) = 0,2395 - 0,0110T + 1,27E - 04T^2 \tag{2.2.13}$$

$$n(T) = -8,5161 + 0,4421T - 5,04E - 03T^2 \tag{2.2.14}$$

$$b(T) = -6,9166E - 04 + 1,5E - 05T \tag{2.2.15}$$

2.2.6-CONCLUSION

L'influence des paramètres de l'air (température et débit) sur l'allure de séchage a été étudiée et a permis de déterminer que l'influence du débit d'air asséchant sur la vitesse de séchage est moins importante par rapport à celle de la température.

La courbe caractéristique de séchage du *Mentha viridis* donne des informations précieuses pour la prédiction de l'allure de séchage pour d'autres conditions expérimentales autres que celles dans lesquelles ont été réalisés nos essais.

Treize modèles de séchage en couche mince ont été testés. Le modèle de Midilli-Kucuk, qui décrit bien l'ensemble des points expérimentaux du séchage de la menthe verte *Mentha viridis*, a été retenu.

Les coefficients de diffusion de *Mentha viridis* utilisés par le modèle de Midilli Kucuk dépendent à la fois de la température et du débit d'air asséchant.

2.2.7-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **O Yaldiz, & C Ertekin, 2001**, Thin layer solar drying of some different vegetables, *Drying Technology*, vol. 19, pp 586-596.
- [2] **T. I Togrul, D. Pehlivan, 2002**, Mathematical modelling of solar drying of apricot in thin layers, *Journal of Food Engineering*, vol. 55, pp. 209-216.
- [3] **R. Al Hodali, 1997**, Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit using solar energy and adsorption process, Ph.D. Thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 309 p.
- [4] **M. Kouhila, & al., 2002**, Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus Globulus, *Drying Technology*, Vol. 20, n° 10, pp. 2027-2039.
- [5] **M. Kouhila, 2001**, Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (Menthe, Verveine, Sauge et Eucalyptus) de la région de Marrakech, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad de Marrakech, Morocco, 170 p.
- [6] **A Midilli, and H. Kucuk, 2003a**, Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio, *Energy*, vol. 28, n° 6, pp. 539-556.
- 2003b**, Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion and Management*, vol. 44, pp. 1111-1122.
- [7] **A Midilli, 2001**, Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system, *International Journal of Energy research*, vol. 25, pp. 715-725.
- [8] **S. Lahsasni, & al., 2004a**, Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Engineering*, vol. 61, n° 2, pp. 173-179.
- 2004b**, Thin layer convective solar drying and mathematical modelling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), *Energy The International Journal*, vol. 29, pp. 211-224.
- 2004c**, Characteristic drying curve and mathematical modelling of thin-layer solar drying of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Process Engineering*, vol. 27, pp. 103- 117.
- [9] **I. Doymaz, 2004**, Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering*, vol. 61, pp. 359-364.

- [10] **I. Doymaz, 2006**, Thin-layer drying behaviour of mint leaves, *Journal of Food Engineering*, Vol. 74, No. 2, pp 370-375.
- [11] **I. Doymaz,**
2007a, The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*, vol. 79, n° 1, pp. 243-248.
2007b, Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, vol. 78, n° 4, pp. 1291-1297
- [12] **L. Ait Mohamed, & al., 2005**, Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 1473-1483.
- [13] **N. A. Akgun, & I. Doymaz, 2005**, Modelling of olive cake thin-layer drying process, *Journal of Food Engineering*, vol. 68, n° 4, pp. 455-461.
- [14] **M. Belahmidi, & al., 1993**, Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires, Application aux peaux d'orange et à la pulpe de betterave, *Revue Générale de Thermique*, vol. 380, pp. 444-453.
- [15] **B. C. Boutaleb, 1997**, Etude expérimentale du séchage convectif de plantes médicinales : Application à la sauge et verveine, Thèse de 3^{ième} cycle, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 141p.
- [16] **T. Rocha Mier, 1993**, Influence des prétraitements et des conditions de séchage sur la couleur et l'arôme de la menthe (*Mentha Spicata* Huds) et de Basilic (*Ocimum Basilicum*), Thèse de Doctorat, ENSIA de Massy, p. 133.
- [17] **S. Dwivedi, & al., 2004**, Essential oil composition of different accessions of *Mentha x piperita* L. grown on the northern plains of India, *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 19, pp. 437-440.
- [18] **Encyclopédie d'épices, 2007**, Disponible dans <http://www.theepicentre.com/spices/spiceref/> [Accédé le 15 mai 2007].
- [19] **S. Simal, & al., 2005**, Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 85, pp. 425-432.
- [20] **W. K. Lewis, 1921** The rate of drying of solid materials, *Journal of Industrial Engineering*, vol. 5, pp. 427-433.
- [21] **C. Page, 1949**, Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layer. Unpublished M.S. Thesis, Purdue University, Lafayette, IN.

- [22] **D.D. Overhults**, & al., **1973**, Drying soybeans with heated air, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 16, pp. 195–200.
- [23] **G. M. White** & al., **1981**, Fully exposed drying popcorn, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 24, pp. 466–468.
- [24] **M. S. Chinnan**, **1984**, Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 22, pp. 447–460.
- [25] **A. Yagcioglu**, & al., **1999**, Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In : Bas cetincelik A, editor. Proceedings of the International Congress on Agricultural Mechanization and Energy, 26-27 May, Adana, Turkey, Faculty of Agriculture, C, ukurova University, pp. 565–569.
- [26] **S. M. Henderson**, **1974**, Progress in developing the thin layer drying equation, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 17, pp. 1167–1168.
- [27] **Y. I Sharaf-Elden**, & al., **1980**, A model for ear corn drying, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 5, pp. 1261–1262.
- [28] **C. Y. Wang**, & al., **1978**, A single layer drying equation for rough rice, American Society of Agricultural Engineers, Paper n° 3001.
- [29] **A. S. Kassem**, **1998**, Comparative studies on thin layer drying models for wheat, 13th International Congress on Agricultural Engineering, vol. 6, Morocco.
- [30] **V. T. Karathanos**, **1999**, Karathanos, V.T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics, Journal of Food Engineering, vol. 39, pp. 337–344.
- [31] **L. R. Verma**, & al., **1985**, Effects of drying air parameters on rice drying models, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 28, pp. 296–301.
- [32] **A. Midilli**, & al., **2002**, A new model for single layer drying, Drying Technology, vol. 20 pp. 1503-1513.
- [33] **T. L. Togrul**, & **D. Pehlivan**, **2003**, Mathematical modelling of solar drying of apricot in thin layers, Journal of Food Engineering, vol. 55, pp. 209-216.
- [34] **D. A. Van Meel**, **1958**, Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, Chemical Engineering Science, vol. 9, pp. 36-44.
- [35] **A. Belghit**, & al., **2000**, Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, Energy Conversion and Management, vol. 44, n° 12, pp. 1303-1321.

- [36] **N. Kechaou, 2000**, Etude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro-alimentaires, Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p.
- [37] **A. A. El-Sebaii, & al., 2002**, Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, *Energy*, vol. 27, n° 9, pp. 845-859.
- [38] **C. Ertekin, & O. Yaldiz, 2004**, Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering*, vol. 63, n° 2, pp. 349-359.
- [39] **B. Touati, & al., 2006**, Isothermes d'adsorption-désorption des feuilles de menthe verte (*Mentha viridis*), Premier Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies de Séchage, (SMSTS'2006), le 17-19 Décembre 2006 Tozeur-Tunisie, pp 208-214.
- [40] **B. Touati, & al., 2007**, Effet de la température sur les isothermes et la chaleur isostérique de sorption des feuilles de menthe (*Mentha viridis*), Société Française de la Thermique (SFT'2007), du 29 mai au 01 juin 2007 L'île des Embiez, France, pp 1215-1221.
- [41] **J. J. Bimbenet & al., 1984**, Air drying kinetics of biological particles, In R. Toei & A. S. Mujumdar (Eds), *Proceeding of the Fourth International Drying Symposium*, Kyoto, Japan.
- [42] **M. A Basunia, & T. Abe, 2001**, Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection, *Journal of Food Engineering*, vol. 47, pp. 295-301.
- [43] **B. H. Hassan, & A. I. Hobani, 2000**, Thin layer drying of dates, *Journal of Food Process Engineering*, vol. 23, pp. 177-189.
- [44] **C. Ho-Hsien, & al., 2005**, A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer, *Solar Energy* vol. 78, pp. 97-103.
- [45] **S. Janjai, & P. Tung, 2005**, Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices, *Renewable Energy*, vol. 30, pp 2085-2095.
- [46] **P.C. Panchariya, & al., 2002**, Thin-layer modelling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, vol. 52, n° 4, pp. 349-357.

Chapitre III

MODELISATION DU SECHOIR

SOLAIRE INDIRECT

3.1-MODELISATION DU SECHAGE DE LA MENTHE

Le but du modèle est de déterminer l'évolution de la teneur en eau du produit à sécher en fonction du temps en tenant compte des principaux paramètres aérothermiques (température, hygrométrie et débit massique de l'air asséchant)

Le modèle est basé sur les bilans d'énergie dans l'air asséchant et dans les feuilles de menthe verte (*Mentha viridis*). Ces deux équations de bilan sont complétées par la prise en compte de la courbe caractéristique du séchage

Le produit à sécher (les feuilles de la menthe verte) est soumis à un écoulement forcé d'air chaud perpendiculaire à la surface horizontale de la claie. La température et l'hygrométrie de l'air à l'entrée du séchoir peuvent varier au cours du séchage.

Dans un premier temps nous considérerons une température et une hygrométrie constante dans le temps afin de valider notre modèle grâce aux mesures effectuées à l'aide de la veine de séchage

3.2-HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Vu la complexité du problème, nous avons utilisé quelques hypothèses simplificatrices (C. AHOUANNOU, 2000, [1], S. YUCEF-ALI, 2001, [2], A. KANMOGNE, 2002, [3] et L. BENNAOUM, & A. BELHAMRI, 2002 [4], 2005 [5]). Plusieurs travaux entamés sur le séchage des produits en feuilles ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont utilisées :

- les échanges de chaleur entre l'air de séchage et l'extérieur sont négligeables (paroi de l'enceinte de séchage adiabatique).
- les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés,
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés,
- l'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits (air sec et vapeur d'eau),
- L'écoulement de l'air est supposé unidirectionnel et uniforme.

- les feuilles de menthe sont considérées comme indéformables et suffisamment humides,
- la température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit,

3.3-EQUATIONS DE BILAN

En tenant compte des hypothèses précédentes et en considérant que le séchoir est divisé en un certain nombre de tranches fictives, dans la direction de l'écoulement, les équations qui régissent les échanges thermiques et massiques au niveau de la chambre de séchage se traduisent par :

3.3.1-Bilan thermique

Le bilan thermique de l'air s'écrit :

$$\dot{m}_a C_{pa}(T_a^* - T_a) = h_{a,pr} S_{pr}(T_a - T_{pr}) + 4h_{a,p} S_v(T_a - T_p) \quad (3.1)$$

avec :

- \dot{m}_a Débit massique de l'air asséchant à travers le séchoir,
- C_{pa} Chaleur massique de l'air de séchage,
- T_a^* Température d'entrée de l'air de séchage,
- T_a Température de l'air,
- $h_{a,pr}$ Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et le produit,
- S_{pr} Surface d'échange du produit,
- T_{pr} Température des feuilles de la menthe verte,
- $h_{a,p}$ Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air de séchage et la paroi interne,
- S_v Surface entre deux claies,
- T_p Température de la paroi interne de l'enceinte de séchage.

Le bilan thermique des feuilles de menthe s'écrit :

$$m_{pr} C_{p_{pr}} \frac{dT_{pr}}{dt} = h_{a,pr} S_{pr} (T_a - T_{pr}) - P_{ev} \quad (3.2)$$

L'énergie reçue par les feuilles de menthe est utilisée pour évaporer l'eau qu'ils contiennent. Dans le cas particulier d'un produit mince, il est possible de négliger le terme de stockage. Dans ce cas, l'équation (3.2) devient :

$$P_{ev} = h_{a,pr} S_{pr} (T_a - T_{pr}) \quad (3.3)$$

avec :

m_{pr} Masse du produit à sécher,

$C_{p_{pr}}$ Capacité calorifique massique du produit,

P_{ev} Puissance d'évaporation de l'eau contenue dans le produit.

$$P_{ev} = L_v(T_{pr}) m^* (T_a, W_a, D_{va}) \quad (3.4)$$

avec :

L_v Chaleur latente d'évaporation de l'eau ($J \cdot kg^{-1}_{eau}$)

$$L_v(T_{pr}) = 4186,5 (597 - 0,56 \cdot T_{pr}) \quad (3.5)$$

En négligeant l'inertie thermique des feuilles de menthe, la température de surface des feuilles de menthe est égale à la température humide de l'air. L'équation (3.5) devient :

$$L_v(Th) = 4186,5 (597 - 0,56 \cdot Th) \quad (3.6)$$

La masse d'eau évaporée par unité de temps (kg_{eau}) m^* est donnée par :

$$m^* = m_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (3.7)$$

avec :

m_s est la masse sèche des feuilles de menthe,

$\left(-\frac{dX}{dt} \right)$ est la vitesse de séchage donnée par :

$$\left(-\frac{dX}{dt} \right) = \frac{X(t-\Delta t) - X(t)}{\Delta t} \quad (3.8)$$

$X(t)$ est la teneur en eau du produit,

Δt est le pas de temps (s).

L'équation exprimant la vitesse de séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) est déduite de la courbe caractéristique de séchage (C.C.S) traduite sous forme d'un polynôme de degré trois (voir paragraphe 2.2.5.1.4) (**B. Touati**, & al. 2008 [6]) :

$$f(X^*) = \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_{in}} = 1,42092X^* - 1,98005X^{*2} + 1,83273X^{*3} \quad (3.9)$$

avec :

$f(X^*)$ est la vitesse de séchage réduite (normée),

$\left(\frac{-dX}{dt}\right)_{in}$ est la vitesse initiale de séchage ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{ms}}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), elle est déterminée par la corrélation de Fornell et Bimbenet (**A. Fornell**, & al., 1980 [7]) :

$$\left(\frac{-dX}{dt}\right)_{in} = \alpha (T_a - T_h) v_a^\beta \quad (3.10)$$

avec :

α et β sont deux constantes d'ajustement (elles sont fonction du produit).

Cette vitesse initiale de séchage est définie en utilisant une analogie des transferts de chaleur et de masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée.

Le lissage numérique des valeurs expérimentales de $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_{in}$ a permis d'identifier les paramètres d'ajustement α et β .

$$\alpha = 0,816 \text{ et } \beta = 0,475$$

T_a et T_h sont respectivement les températures sèches et humides de l'air de séchage et v_a sa vitesse de séchage. Le calcul de la température humide T_h est donné en **annexe A3.1**.

X^* est la teneur en eau normée ou la perte de masse des feuilles de menthe déterminée par :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{in} - X_{eq}} \quad (3.11)$$

Où X_{in} est la teneur en eau initiale du produit ($\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ms}}$) et X_{eq} teneur en eau d'équilibre thermodynamique déterminée par l'isotherme de sorption.

Le lissage polynomiale des résultats expérimentaux des isothermes de sorption de la menthe verte (*Mentha viridis*), en utilisant le modèle de Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B) donne la teneur en eau d'équilibre X_{eq} comme suit (voir chapitre2 première partie) (B. Touati & al., 2006 [8] et 2007 [9]) :

$$X_{eq}(Hr)=0,021+0.0058.Hr-10^{-4}.Hr^2+10^{-6}.Hr^3 \quad (3.12)$$

avec :

Hr l'humidité relative de l'air de séchage (%).

En remplaçant l'équation (3.3) dans l'équation (3.1), et en tenant compte des hypothèses simplificatrices on obtient :

$$\dot{m}_a C_{pa}(T_a^* - T_a) = P_{ev} \quad (3.13)$$

avec :

$$T_a = T_a^* - \frac{P_{ev}}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} \quad (3.14)$$

3.3.2-Bilan massique de l'eau

La masse d'eau contenue dans l'air et celle échangée avec l'extérieur pendant l'intervalle de temps Δt est donnée par la relation :

$$W_a(t) = W_a(t - \Delta t) + \frac{m_{prs}}{D_m} \left(\frac{X(t - \Delta t) - X(t)}{\Delta t} \right) \quad (3.15)$$

avec :

W_a Teneur en eau de l'air de séchage,

m_{prs} Masse du produit sec,

D_m Débit massique de l'air de séchage.

Connaissant la teneur en eau de l'air de séchage, l'humidité relative est déterminée par :

$$Hr(t) = \frac{P \cdot Wa(t)}{P_{vsat} (0,622 + Wa(t))} \quad (3.16)$$

avec :

P Pression atmosphérique,

P_{vsat} Pression de la vapeur saturante,

La masse d'eau échangée entre le produit et l'air pendant le temps Δt peut également s'écrire :

$$X(t) = X(t - \Delta t) - \Delta t \left(-\frac{dX}{dt} \right)_{in} f(X^*) \quad (3.17)$$

3.4-RESOLUTION DES EQUATIONS DE TRANSFERT

La figure 3.2 représente le maillage adopté pour la discrétisation spatiale des équations de transfert dans l'enceinte de séchage de l'air et des feuilles de la menthe verte.

En divisant la hauteur de l'enceinte de séchage en N intervalles ou claies ($1 \leq j \leq N$), nous obtenons un système de n équations à n inconnues suivant :

$$X^t(j) = X^{t-\Delta t}(j) - \Delta t \left(-\frac{dX}{dt} \right)_{in} f(X^*(j)) \quad (3.18)$$

$$Ta^t(j) = Ta^{*t}(j-1) - \frac{P_{ev}^t(j)}{m_a \cdot Cp_a^t(j)} \quad (3.19)$$

$$Wa^t(j) = Wa^{*t}(j-1) + \frac{m_{prs}}{D_m} \left(\frac{X^{t-\Delta t}(j) - X^t(j)}{\Delta t} \right) \quad (3.20)$$

$$Hr^t(j) = \frac{P \cdot Wa^t(j)}{P_{vsat}^t(j) (0,622 + Wa^t(j))} \quad (3.21)$$

Pour résoudre ce système d'équation, nous avons élaboré un programme en **FORTRAN** en utilisant une méthode itérative. Le listing de ce programme de calcul est donné en **annexe A3.2**.

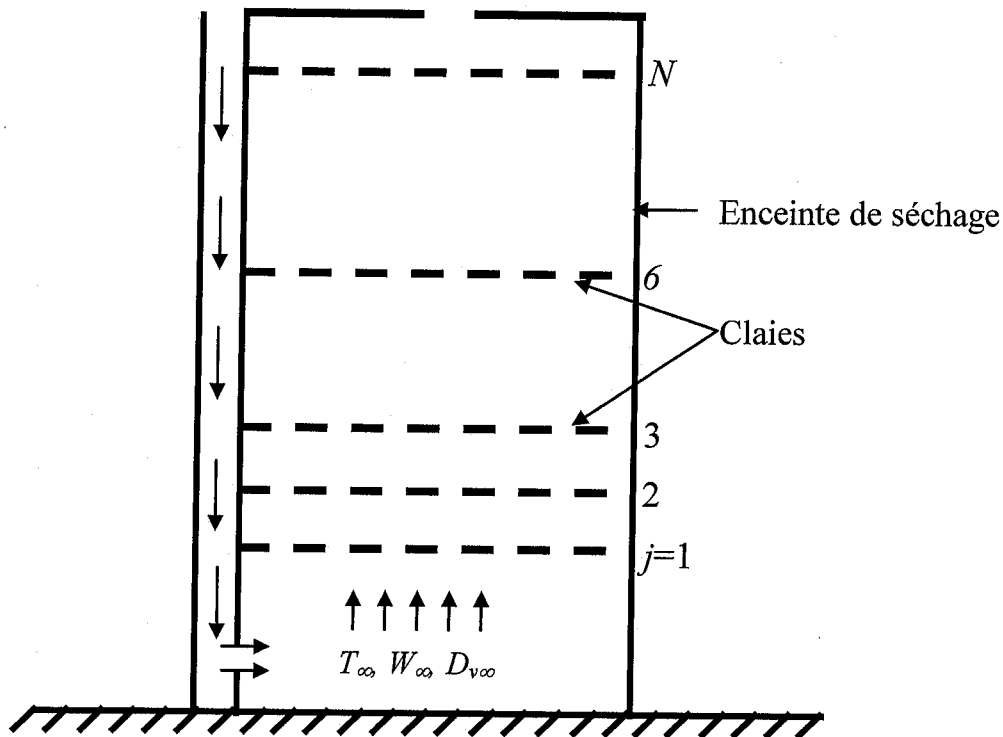


Figure 3.2 : Schéma expliquant la discrétisation des équations de transfert dans l'air et les feuilles de menthe

3.5-ORGANIGRAMME DU PROGRAMME « SECHAGE »

La figure 3.3 présente l'organigramme du programme « **SECHAGE** ». Il s'agit d'un programme modulaire, dont les différents modules peuvent être gérés séparément. Il permet de simuler le fonctionnement de l'enceinte de séchage.

Le programme, écrit en **FORTRAN** intègre les corrélations issues des données expérimentales des isothermes de désorption et de la cinétique de séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). Le programme gère les données telles que :

- les caractéristiques de l'air de séchage et de l'air humide,
- les caractéristiques du produit,
- les paramètres de l'enceinte de séchage (dimensions).

- Il calcule à chaque intervalle de temps les caractéristiques de l'air et les caractéristiques du produit à sécher.

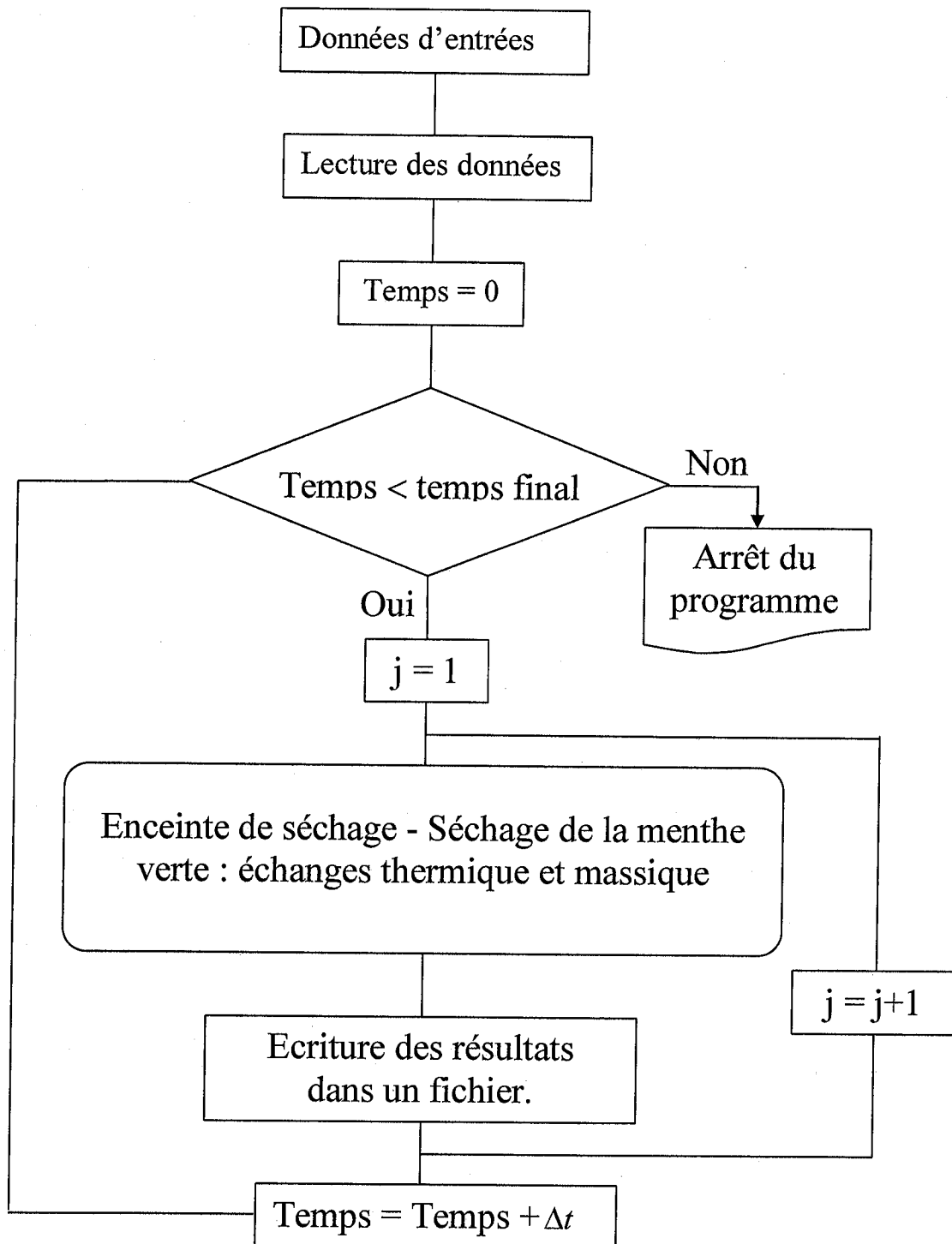


Figure 3.3 : Organigramme du programme **SECHAGE**

3.6-RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce paragraphe présente les résultats de la modélisation obtenus à l'aide du programme **SECHAGE**.

3.6.1-Objectifs de la simulation

Initialement, le produit à sécher est en équilibre thermodynamique avec l'ambiance. A l'instant t_0 ce même produit est soumis perpendiculairement à sa surface à un écoulement d'air chaud dont le débit, la température et l'humidité sont respectivement D_{∞} , T_{∞} et W_{∞} .

Les claies du séchoir supportant les feuilles de menthe verte (*Mentha viridis*) sont rectangulaires. Les feuilles de menthe en couche mince couvrent toute la surface des claies.

3.6.2-Comparaison des résultats du modèle numérique et des résultats expérimentaux

Les résultats du modèle sont comparés avec les résultats expérimentaux obtenus avec le séchoir **SECHPOLY** (chapitre 2.2)

Les figures 3.4 (a), 3.4 (b) et 3.4 (c) représentent respectivement les résultats mesurés et calculés de la teneur en eau du produit pour un débit de 200 m³/h dans le cas où le séchage est à température variable et pour deux débits 100 et 200 m³/h. La figure 3.5 représente la vitesse de séchage mesurée et simulée pour un débit de 200 m³/h dans le cas où cette température est constante pour les deux premières claies.

L'ensemble de ces figures montre une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Il apparaît cependant un léger écart entre les résultats, probablement dû à l'inertie du système mais aussi aux conditions initiales imposées et à l'approche expérimentale utilisée.

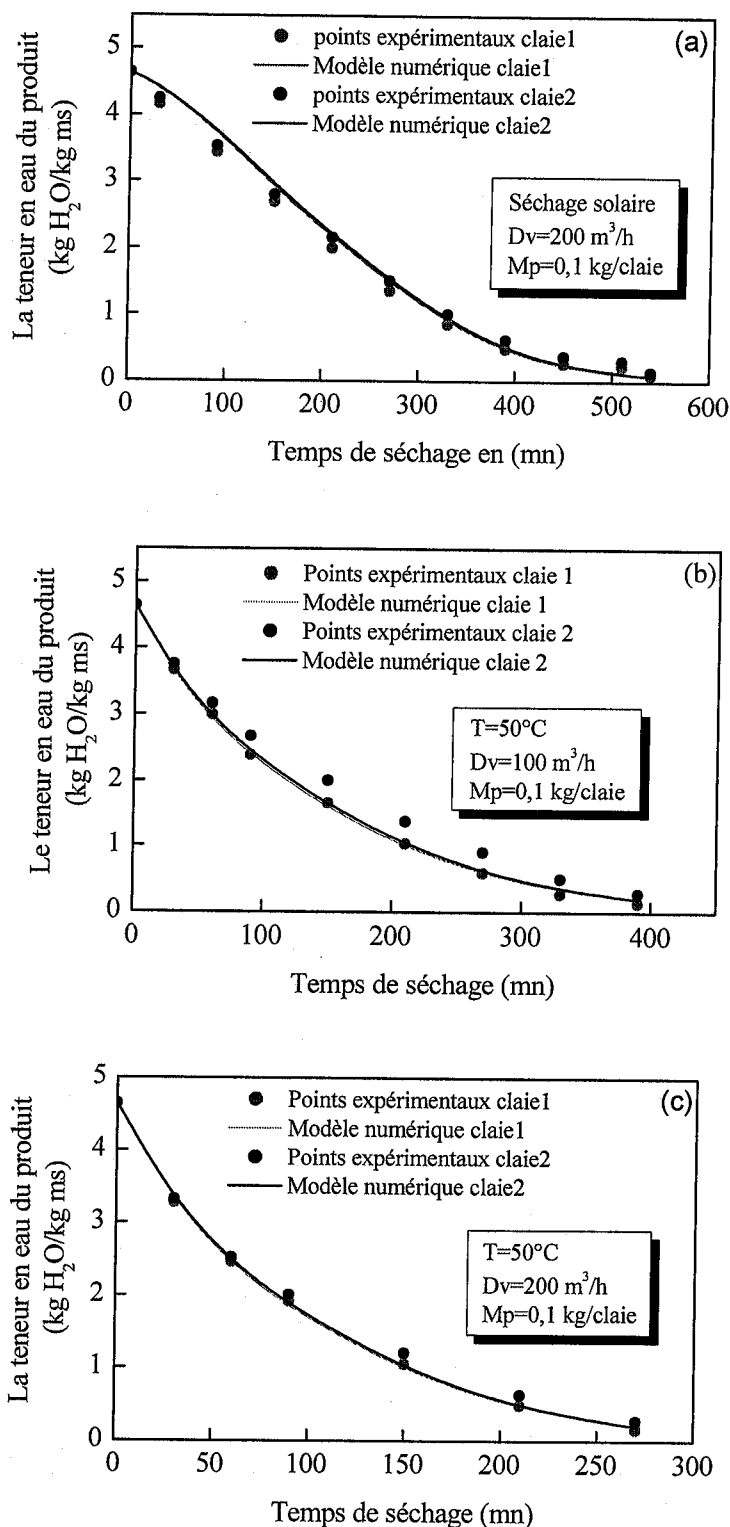


Figure 3.4 : Evolution de la teneur en eau mesurée et calculée du produit en fonction du temps pour $W_{\infty}=0,0168 \text{ kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{as}}^{-1}$, $Mp=100 \text{ g/claie}$ et pour les deux premières claies.

(a) Séchage solaire $D_{v\infty}=200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

(b) $D_{v\infty}=100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $T=50^\circ\text{C}$

(c) $D_{v\infty}=200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $T=50^\circ\text{C}$

Nous constatons sur les trois figures 3.4 (a), (b) et (c) que la durée de séchage varie peu entre les deux claies, ce qui signifie que le séchage se fait d'une façon presque uniforme.

Une augmentation du débit (vitesse de l'air), malgré la réduction de contact (air-feuilles de menthe) favorise les échanges convectifs et entraîne une diminution de la durée de séchage, figure 3.4 (b) et (c).

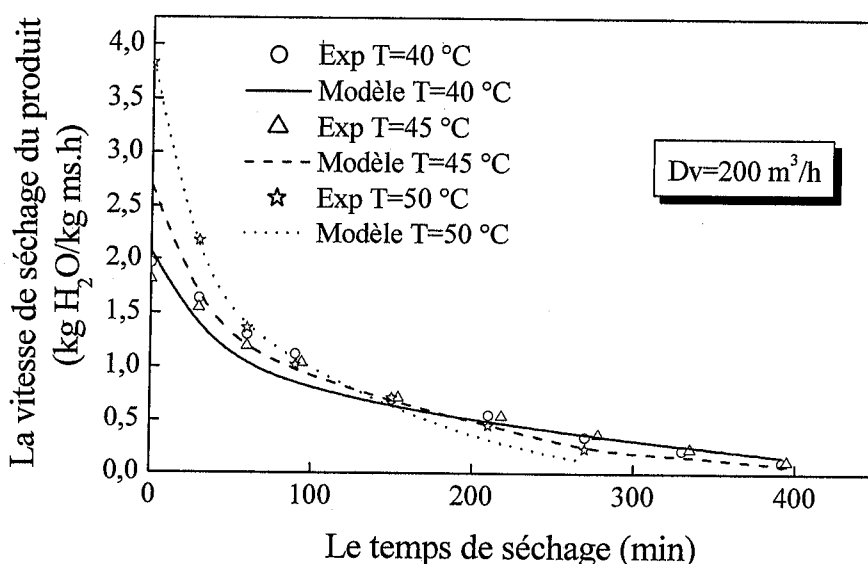


Figure 3.5 : Evolution de la vitesse de séchage mesurée et calculée du produit en fonction du temps pour différentes températures et pour la première claie.

$$W_{a\infty}=0,0168 \text{ kg}_{\text{eau}}.\text{kg}_{\text{gas}}^{-1}, M_p=100 \text{ g/claie}$$

3.6.3- Etude de l'influence des paramètres aérothermiques et la masse initiales du produit à sécher sur la durée du séchage.

Le débit de l'air asséchant, la température de séchage et la masse initiales des feuilles de menthe à sécher ont une influence sur le comportement du produit lors du séchage et par conséquent sur la durée de séchage de la *Mentha viridis*. Il est bien évident que plus l'air asséchant est sec, chaud et de débit élevé, plus le séchage de la totalité du produit sera rapide.

3.6.3.1- Influence de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit

L'influence de la température de l'air de séchage est illustrée sur la figure 3.6. Il s'agit du paramètre le plus important à prendre en considération.

Le temps de séchage raccourci quand la température augmente, ce qui s'explique par l'accroissement du potentiel d'échange entre l'air asséchant et le produit, favorisant ainsi l'évaporation de l'eau des feuilles de menthe.

Expérimentalement, pour une température de 50°C, un débit d'air de 200 m³/h et une masse initiale du produit de 0,1 kg/claie, il suffit de 270 minutes pour sécher les feuilles de menthe. Une diminution de température de cinq degrés entraîne une augmentation de temps de séchage de 375 minutes pour atteindre cette teneur.

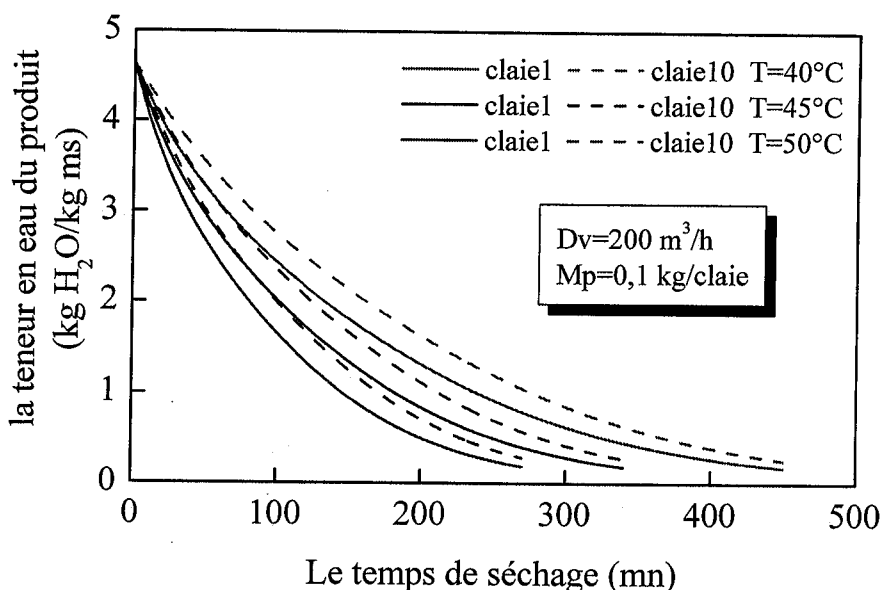


Figure 3.6 : Influence de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage pour les deux claies une et dix

Afin de mettre en évidence les différentes phases de séchage, nous avons représenté, sur la figure 3.7, les courbes de vitesse de séchage calculée ($-(dX/dt)$ qui représente la pente de la cinétique de séchage), en fonction de la teneur en eau calculée X de la *Mentha viridis*.

Nous constatons que la vitesse de séchage prend des valeurs maximales pour la température la plus élevée et décroît avec la diminution de cette température. En plus, on

distingue seulement une phase de séchage, la phase à vitesse de séchage décroissante qui débute à partir d'un point critique (se situent entre 2,0704 et 3,853 kg d'eau/kg ms/h) jusqu'au un point d'équilibre dont la valeur est proche de zéro.

Ce résultat est en bonne concordance avec les travaux de (M. Kouhila, & al. 2001 [10], S. Youcef-Ali, & al., 2001 [11] et I. Doymaz, 2006 [12]) concernant les produits agroalimentaires à couches minces.

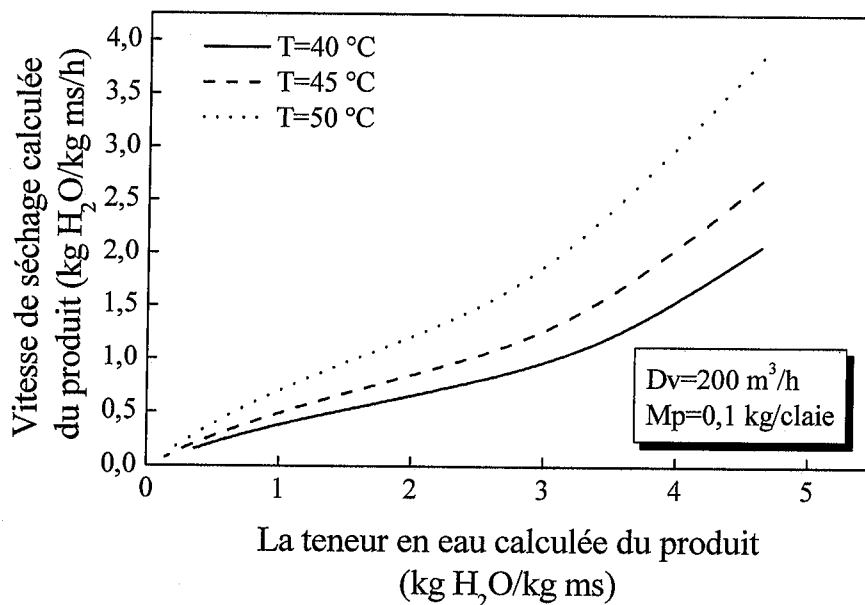


Figure 3.7 : Variation de la vitesse de séchage du produit situé sur la première claie en fonction de la teneur en eau pour diverses températures de l'air asséchant

Pour bien illustrer l'influence de la température de l'air asséchant sur le temps de séchage du produit, nous avons représenté sur les deux figures 3.8 et 3.9 la variation de la durée de séchage en fonction de la température de l'air asséchant pour divers débits. Nous remarquons sur la figure 3.8 que pour une faible température de séchage soit de 30 °C et un débit d'air de 200 m³/h, il nous faut presque 20 h de séchage pour atteindre la teneur en eau finale du produit. Ce temps est réduit à 5 heures si la température est de 55 °C.

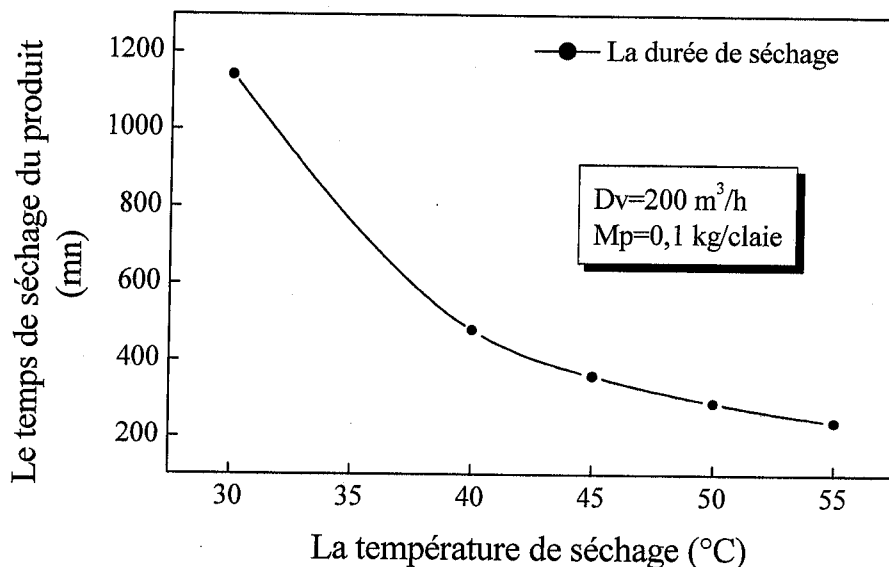


Figure 3.8: Variation du temps de séchage du produit en fonction de la température de l'air asséchant.

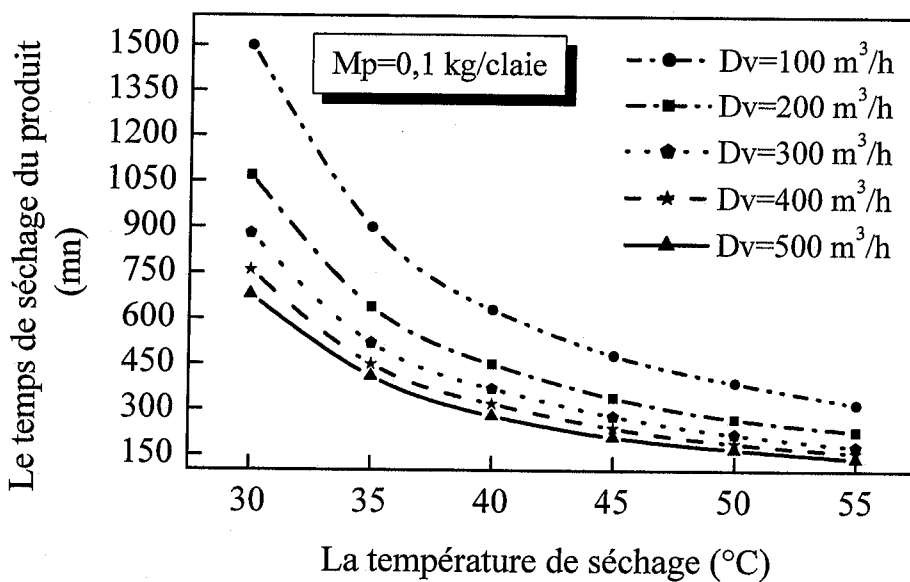


Figure 3.9: Variation du temps de séchage du produit en fonction de la température de l'air asséchant pour plusieurs débits et une masse de feuilles de menthe de 0,1 kg/craie.

Nous constatons aussi sur la figure 3.9 que pour une même température de 50 °C, une augmentation de débit d'air de 100 à 500 m³/h, favorisant les échanges par convection forcée, entraîne une diminution de temps de séchage de 450 à 150 min.

3.6.3.2- Influence du débit d'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit

Nous allons étudier l'influence du débit d'air sur le séchage de 0,1 kg de la *Mentha viridis*, pour une température de l'air asséchant de 50 °C.

Les courbes de cinétiques de séchage figure 3.10 montrent un raccourcissement des durées de séchage lorsque le débit augmente : elles passent de 390 à 210 minutes lorsque les débits passent de 100 à 300 m³/h pour une température d'entrée de 50°C.

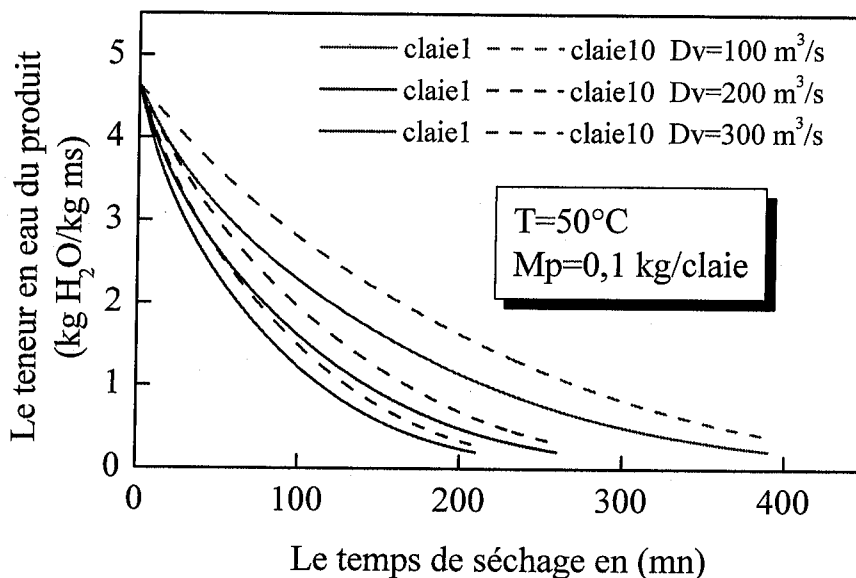


Figure 3.10 : Influence du débit d'air sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage pour les deux claies une et dix

Une augmentation du débit (vitesse de l'air), malgré la réduction du temps de contact air-produit, favorise les échanges convectifs, accélérant le processus de séchage, et entraîne un séchage presque uniforme (figures 3.11 et 3.12).

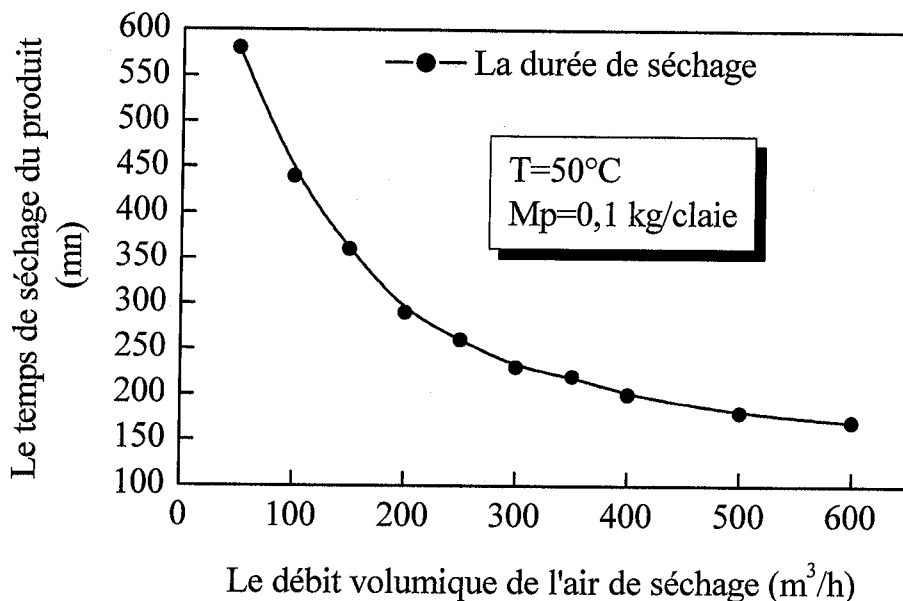


Figure 3.11: Variation du temps de séchage du produit en fonction du débit d'air asséchant.

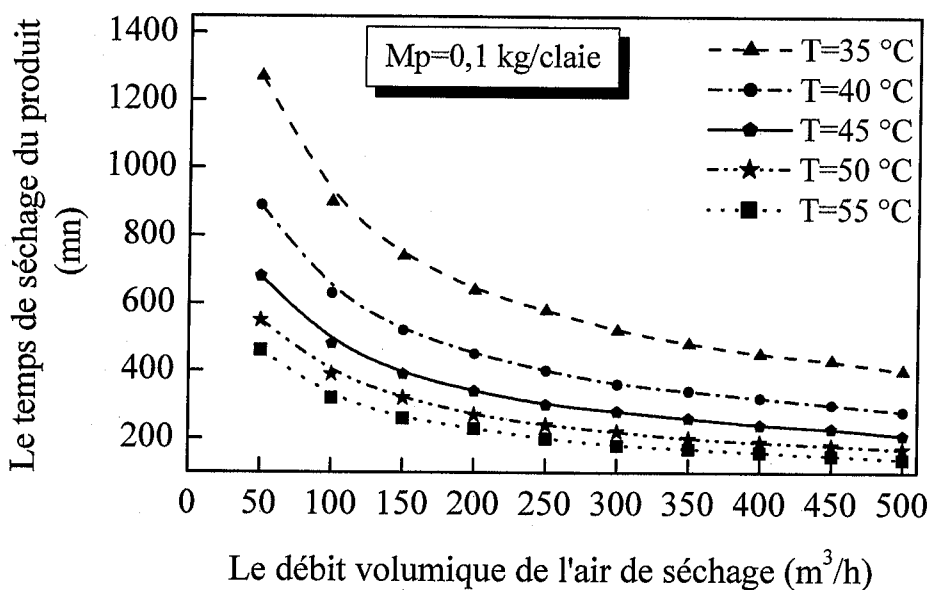


Figure 3.12: Durée de séchage du produit en fonction du débit pour plusieurs températures de l'air de séchage et une masse de feuilles de menthe de 0,1 kg/craie.

Néanmoins, en comparant les figures 3.8 et 3.11, nous constatons que l'influence du débit est plus faible que celle de la température. Ceci montre que la température est le facteur le plus important qui influence la cinétique de séchage du produit (J. L. Multon, 1980 [13], J. D. Daudin, 1983, [14], M. Kouhila, 2001 [10], S. Youcef Ali, 2001 [11] et C. Ahouannou, 2001 [1]).

3.6.3.3- Influence de l'hygrométrie de l'air asséchant sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit

L'augmentation de la teneur en humidité de l'air, accroît la pression partielle des vapeurs d'eau dans celui-ci, par conséquent diminue le potentiel d'échange entre l'air et le produit.

Nous n'avons pas pu, vu les moyens dont nous disposions, faire varier expérimentalement l'humidité de l'air tout en maintenant sa température fixée, alors nous nous sommes penché sur les travaux faits ultérieurement afin de voir l'influence de ce paramètre sur la teneur et la durée de séchage du produit.

Les études faites sur la menthe, verveine, sauge (M. Kouhila, 2001 [10]), la pomme de terre (S. Youcef Ali, 2001 [2]), manioc, gingembre, gombo et piment (C. AHOUANNOU, 2000 [1]) ont montré que la teneur en humidité de l'air asséchant à l'entrée du séchoir, n'a qu'une faible influence sur le processus de séchage.

3.6.3.4- Influence de la masse initiale des feuilles de menthe sur la teneur en eau et la durée de séchage du produit

La question que se pose l'industriel ou l'agriculteur est la suivante : ***Quelle quantité peut-on sécher et en combien de temps dans un séchoir donné ?***

La figure 3.13 donne la teneur en eau du produit en fonction du temps pour trois quantités différentes de menthe : 0,1, 0,5 et 1,0 kg/claie. Seul la première et la dixième claie sont représentées. Les paramètres de l'air asséchant sont fixés ($T=50^{\circ}\text{C}$ et $Dv=200\text{ m}^3/\text{h}$).

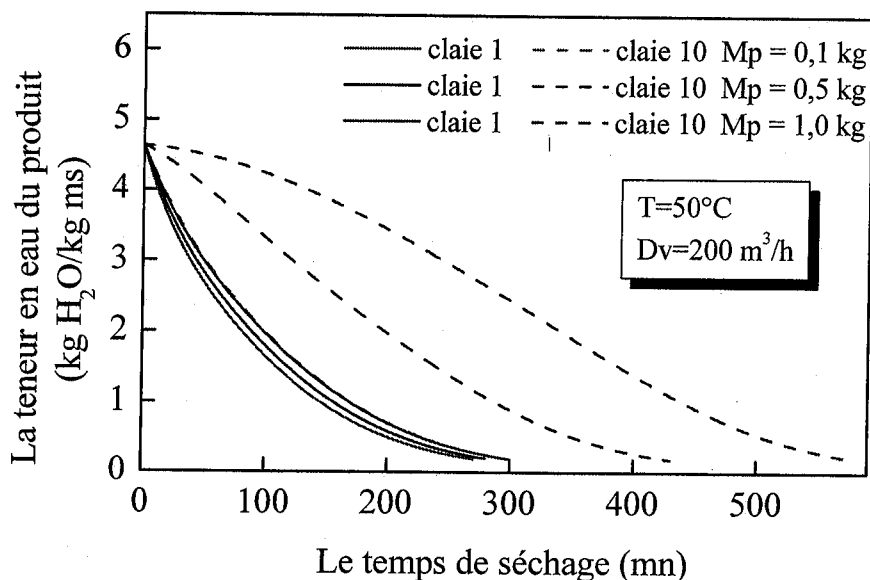


Figure 3.13 : Influence de la masse initiale du produit sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage pour les deux claies une et dix

Nous constatons qu'il n'y a qu'une légère influence de la quantité de menthe pour la première claie. Par contre l'écart est considérable pour la dixième claie car le temps de séchage passe de 5 à 10 heures si on augmente la masse des feuilles de menthe à sécher de 0,5 à 1,0 kg.

De fait, l'air entre sec, chaud et avec une teneur en eau faible traverse les diverses claies, s'humidifiant et se refroidissant à cause du transfert de chaleur et de masse avec le produit.

La figure 3.14 représente l'évolution de la durée de séchage du produit dans les claies 1, 3, 5, 7 et 9, en fonction de la quantité de masse des feuilles de menthe (*Mentha viridis*) à sécher.

Les courbes ont tendance à se stabiliser lorsque la masse diminue. Et pour une quantité de masse fixée, le temps de séchage augmente de la première à la neuvième claie.

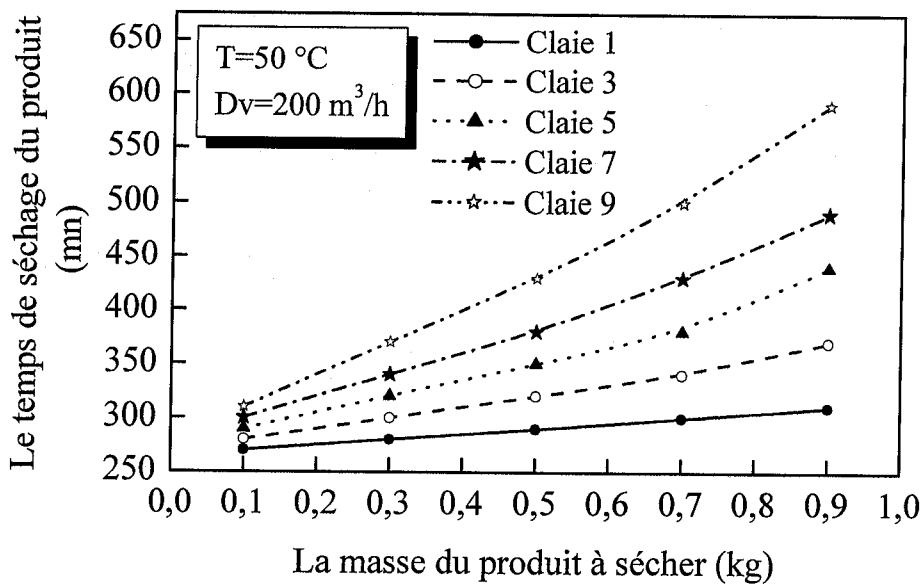


Figure 3.14: Variation du temps de séchage du produit en fonction de la masse des feuilles de menthe pour différentes claies de l'enceinte de séchage

3.7-CONCLUSION

Le programme de calcul nommé (**SECHAGE**) écrit en **FORTRAN** a été mis au point pour la simulation du séchage des feuilles de menthe.

Les courbes théoriques des teneurs en eau et vitesses de séchage coïncident parfaitement avec les résultats expérimentaux.

L'étude théorique de l'influence des paramètres intrinsèques et extrinsèques sur la teneur en eau et la durée de séchage des feuilles de menthe, nous a permis de constater que la température de l'air asséchant a un effet considérable sur le séchage du produit, alors que la vitesse l'affecte peu, mais il existe un compromis entre ces deux paramètres aérothermiques.

Il s'avère qu'il est plus intéressant de sécher les feuilles de menthe avec des débits élevés pour des températures moyennes qu'à faibles débits et à des températures à l'entrée de l'enceinte de séchage élevées.

La masse des feuilles de menthe n'a pas beaucoup d'influence sur sa teneur en eau et la durée de séchage seulement pour la première claie mais au delà de cette claie l'écart entre les

teneurs en eau et durée de séchage devient très important à cause du rafraîchissement et la saturation en humidité de l'air asséchant au cours du séchage.

3.8-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

- [12] **I. Doymaz, 2006**, Thin-layer drying behaviour of mint leaves, *Journal of Food Engineering*, vol. 74, pp. 370-375.
- [13] **J. L. Multon, 1980**, Etat de liaison de l'eau dans les aliments, *Problèmes fondamentaux de séchage*, ATP-PIRDES.
- [14] **J. D. DAUDIN, 1983**, Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides, *Sciences des Aliments*, vol. 3, pp. 1-36.

Chapitre IV

**LES PLANS D'EXPERIENCES - DIMENSIONNEMENT DU
SECHOIR SOLAIRE**

4.1-INTRODUCTION

Le modèle décrit dans le chapitre précédent est un outil qui doit permettre de dimensionner un séchoir en fonction de la quantité de produit à sécher.

La figure 4.1 donne un exemple de la succession de questions amenant au choix d'un type et d'une dimension de séchoir.

S'il n'est pas recommandé de poser les questions 3 ou 6 avant les questions 1 et 2, par contre, la réponse aux questions 4 ou 5 peut amener à se reposer les questions 1, 2 ou 3 et à y répondre différemment.

Cet exemple ne prend pas en compte les contraintes de coût du fait que nous n'avons pas fait, dans le cadre de ce travail, d'étude dans ce domaine. La contrainte de coût influe cependant fortement sur les choix à faire à chaque étape.

Le programme « **SECHAGE** » permet de tester par des « expériences numériques » un matériel de séchage.

Le nombre de paramètres à prendre en compte est cependant important, nécessitant un grand nombre « d'expériences numériques ».

L'utilisation d'un plan d'expérience permet, d'une part de réduire le nombre d'expériences, d'autre part d'obtenir la « réponse » sous forme d'une fonction polynomiale des paramètres, permettant de visualiser facilement l'importance de tel ou tel paramètre et d'optimiser les valeurs des paramètres (**J. GOUPY, [1]**)

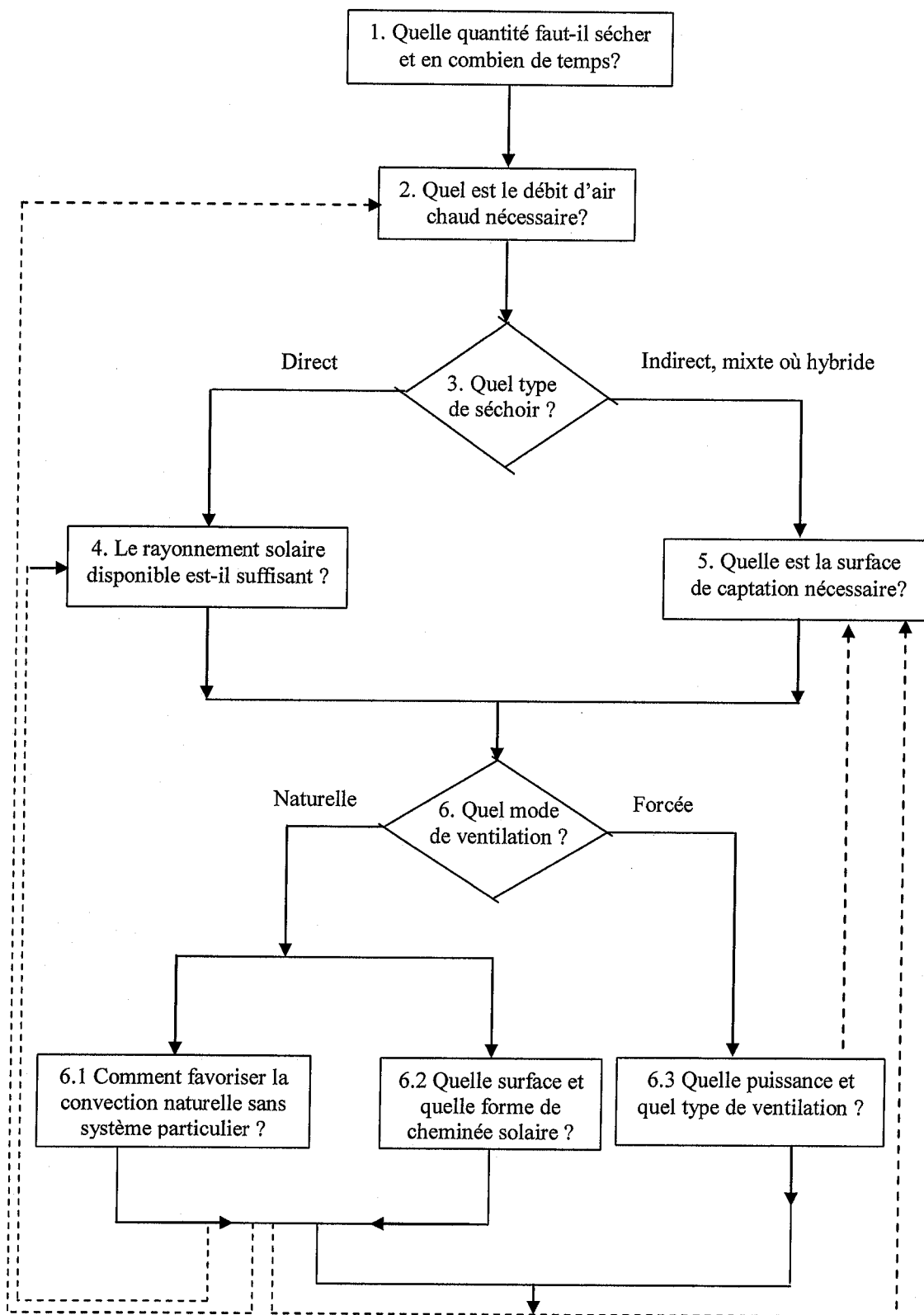


Figure 4.1 : Succession des questions dans la démarche de dimensionnement

4.2-UTILISATION DES PLANS D'EXPERIENCES POUR L'ETUDE DU SECHOIR

La première étape d'un plan d'expériences consiste à choisir les paramètres à étudier et à définir des plages de variations réalistes.

Le choix des plages de variation est important. Le résultat obtenu n'est valable que dans les plages de variation étudiées.

Si cette plage de variation est trop étroite pour un paramètre, la réponse prévisible sera que ce paramètre n'a pas d'influence ou une influence négligeable sur le résultat.

Inversement, si cette plage de variation est trop large, le risque sera important que le polynôme de réponse représente mal la réalité.

Il est par ailleurs important que cette plage de variation corresponde à des possibilités réelles et raisonnables.

Le logiciel **NEMROD**, écrit et distribué par le Laboratoire de Prospective Réactionnelle et d'Analyse de l'Information (LPRAI) de Marseille, a été utilisé pour construire les matrices d'expérience et analyser les résultats.

Le logiciel présente l'avantage d'être simple d'utilisation et consiste en un chemin obligé avec quelques choix concernant le nombre et la plage de variation des paramètres ainsi que la forme polynomiale recherchée. Il propose cependant divers types de matrices d'expériences.

4.2.1-Expériences numériques et résultats :

Le nombre d'expériences à réaliser dépend de la forme du polynôme recherché. Après quelques essais nous avons fait le choix d'un modèle polynomiale de degré 2 en utilisant une matrice composite.

La réponse sera donnée sous la forme :

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4 + b_{11} * (X_1 * X_1) \\
 & + b_{22} * (X_2 * X_2) + b_{33} * (X_3 * X_3) + b_{44} * (X_4 * X_4) \\
 & + b_{12} * (X_1 * X_2) + b_{13} * (X_1 * X_3) + b_{23} * (X_2 * X_3) \\
 & + b_{14} * (X_1 * X_4) + b_{24} * (X_2 * X_4) + b_{34} * (X_3 * X_4)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

X1, X2, X3 et X4 représentent les paramètres d'entrée du plan d'expériences.

4.2.2-Etude de séchoir avec des conditions d'entrée de l'air constantes

4.2.2.1-Choix des paramètres et des plages de variations

Nous avons choisi d'étudier l'ensemble des paramètres pouvant intervenir dans le fonctionnement du séchoir solaire.

Le premier plan d'expériences (modèle 1) effectué concerne le séchage avec des caractéristiques d'entrée constantes de l'air chaud dans le séchoir.

Les paramètres à étudier sont :

- la température de l'air asséchant T_s (de 30 à 50 °C) ;
- le débit volumique de l'air asséchant D_v (de 100 à 500 m³/h) ;
- la surface de l'enceinte de séchage S_{enc} (de 0,3 à 1,0 m²) ;
- la masse des feuilles de menthe à sécher M_p (de 0,1 à 1,0 kg/claie).

Les autres paramètres intervenant de manière significative dans le programme (**SECHAGE**) sont donnés en **annexe A4.1**.

Comme réponse nous nous sommes intéressé à :

- la durée de séchage de la dixième claie (D en h) ;
- l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans les feuilles de menthe (E en kWh/kg_{ms}) ;
- la différence du temps de séchage entre la claie dix (10) et la claie une (1) (Dd_{claie} en h) ;
- la différence du temps de séchage entre deux teneurs en eau finale des feuilles de menthe ($Dd_{X_{pr}}$ en h).

Ce modèle nécessite 25 expériences pour ce problème à 4 paramètres. Le tableau 4.1 donne les valeurs de chaque paramètre pour les 25 expériences ainsi que les résultats obtenus pour un séchage avec des caractéristiques d'entrée constantes de l'air chaud dans le séchoir.

N° Exp	Temp.	Débit D _v	Surface	Masse produit M _p	Durée de séchage D_X1C10	Energie	Dif-durée	Dif-durée
	T _s		enceinte S _{enc}			E_X1C10 E	X1C(10-1) Dd_Claie	(X1-X2) Dd_X _{pr}
	°C	m ³ /h	m ²	kg	h	kWh/kg _{ms}	h	h
1	35	200	0,475	325	12,17	7,08	3,33	1,17
2	45	200	0,475	325	6,50	7,58	1,83	0,67
3	35	400	0,475	325	7,83	9,16	1,67	0,83
4	45	400	0,475	325	4,17	9,77	1,00	0,50
5 ^(*)	35	200	0,825	325	17,50	10,13	8,17	1,33
6	45	200	0,825	325	9,50	11,02	4,50	0,67
7	35	400	0,825	325	10,50	12,19	4,17	1,00
8	45	400	0,825	325	5,67	13,20	2,33	0,50
9 ^(*)	35	200	0,475	775	14,83	8,66	3,33	1,67
10	45	200	0,475	775	8,00	9,36	2,00	0,83
11	35	400	0,475	775	9,83	11,54	1,83	1,33
12	45	400	0,475	775	5,17	12,14	1,00	0,67
13 ^(*)	35	200	0,825	775	20,00	11,58	8,00	1,67
14	45	200	0,825	775	10,83	12,57	4,50	0,83
15	35	400	0,825	775	12,22	14,34	4,00	1,17
16	45	400	0,825	775	6,67	15,55	2,33	0,67
17 ^(*)	30	300	0,65	550	20,67	8,98	6,33	2,17
18	50	300	0,65	550	5,33	11,68	1,83	0,50
19 ^(*)	40	100	0,65	550	18,83	8,19	8,17	1,50
20	40	500	0,65	550	6,17	13,50	1,67	0,67
21	40	300	0,3	550	6,17	8,21	0,50	0,83
22	40	300	1	550	11,17	14,56	5,00	0,83
23	40	300	0,65	100	6,83	8,93	2,83	0,50
24	40	300	0,65	1000	10,00	13,13	2,67	1,00
25	40	300	0,65	550	8,67	11,35	2,83	0,83

(*) les expériences dépassants une journée ensoleillée

Tableau 4.1 : Les valeurs des paramètres d'entrée et les résultats obtenus pour le premier plan d'expérience « Séchage à condition d'entrer de l'air constante »

Les tableaux 4.2 et 4.3, donnent la valeur des coefficients ainsi que la signification de chaque coefficient et les résidus, c'est-à-dire la différence entre les valeurs obtenues avec le modèle « **SECHAGE** » et celles obtenus avec la forme polynomiale pour la réponse « **Durée du séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X** », obtenu grâce au plan d'expériences.

Nom	Coefficient	Signif.
b0	8,66667	***
b1	-3,29397	***
b2	-2,60881	***
b3	1,43286	***
b4	0,83564	**
b11	0,99017	**
b22	0,86517	*
b33	-0,09317	75,50%
b44	-0,15567	61,30%
b12	0,68403	*
b13	-0,42014	11,70%
b23	-0,51736	6,10%
b14	-0,25347	33,10%
b24	-0,14236	58,30%
b34	-0,03819	87,50%

Tableau 4.2 : Coefficient pour la réponse « Durée de séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	12,17	13,22	-1,05	-8,63
2	6,50	6,61	-0,11	-1,69
3	7,83	7,95	-0,12	-1,53
4	4,17	4,08	0,09	2,16
5	17,50	18,04	-0,54	-3,09
6	9,50	9,75	-0,25	-2,63
7	10,50	10,70	-0,20	-1,90
8	5,67	5,15	0,52	9,17
9	14,83	15,76	-0,93	-6,27
10	8,00	8,14	-0,14	-1,75
11	9,83	9,92	-0,09	-0,92
12	5,17	5,04	0,13	2,51
13	20,00	20,42	-0,42	-2,10
14	10,83	11,12	-0,29	-2,68
15	12,22	12,52	-0,30	-2,45
16	6,67	5,95	0,72	10,79
17	20,67	19,22	1,45	7,01
18	5,33	6,04	-0,71	-13,32
19	18,83	17,34	1,49	7,91
20	6,17	6,91	-0,74	-11,99
21	6,17	5,43	0,74	11,99
22	11,17	11,16	0,01	0,09
23	6,83	6,37	0,46	6,73
24	10,00	9,72	0,28	2,80
25	8,67	8,67	0,00	0,00

Tableau 4.3 : Résidus pour la réponse « Durée de séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

Le pourcentage dans la colonne « signif » correspond à la probabilité pour que la valeur correspondante soit égale à zéro.

Les valeurs sont significativement différentes de 0 lorsqu'il apparaît une, deux ou trois étoiles. Il est difficile de donner une limite précise mais il est en général admis qu'un coefficient peut être négligé lorsque le pourcentage donné est supérieur à 10 ou 20 % (**B. LIPS**, 2000 [2]).

Les tableaux 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9 donnent les mêmes indications pour les réponses « **Energie nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans les feuilles de menthe de la dixième (10)** », « **La différence du temps de séchage entre la claie dix (10) et la claie une (1)** » et « **La différence du temps de séchage entre deux teneurs en eau finale des feuilles de menthe** ».

Nom	Coefficient	Signif.
b0	11,35306	***
b1	0,49625	***
b2	1,27211	***
b3	1,58314	***
b4	1,00092	***
b11	-0,24017	**
b22	-0,11169	12,50%
b33	0,02394	72,80%
b44	-0,06506	35,90%
b12	0,02156	71,10%
b13	0,10708	8,50%
b23	0,00317	95,50%
b14	0,03064	60,50%
b24	0,18011	**
b34	-0,03897	51,20%

Tableau 4.4 : Coefficient pour la réponse « Energie de vaporisation de l'eau contenue dans les feuilles de menthe de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	7,08	6,91	0,17	2,40
2	7,58	7,59	-0,01	-0,13
3	9,16	9,05	0,11	1,20
4	9,77	9,81	-0,04	-0,41
5	10,13	9,94	0,19	1,88
6	11,02	11,04	-0,02	-0,18
7	12,19	12,08	0,11	0,90
8	13,20	13,27	-0,07	-0,53
9	8,66	8,57	0,09	1,04
10	9,36	9,37	0,00	-0,11
11	11,54	11,42	0,12	1,04
12	12,14	12,31	-0,17	-1,40
13	11,58	11,44	0,14	1,21
14	12,57	12,66	-0,09	-0,72
15	14,34	14,31	0,03	0,21
16	15,55	15,62	-0,07	-0,45
17	8,98	9,40	-0,42	-4,68
18	11,68	11,38	0,30	2,57
19	8,19	8,36	-0,17	-2,08
20	13,50	13,45	0,05	0,37
21	8,21	8,28	-0,07	-0,85
22	14,56	14,62	-0,05	-0,41
23	8,93	9,09	-0,16	-1,79
24	13,13	13,09	0,04	0,30
25	11,35	11,35	0,00	0,00

Tableau 4.5 : Résidus pour la réponse « Energie de vaporisation de l'eau contenue dans les feuilles de menthe de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

Nom	Coefficient	Signif.
b0	2,83333	***
b1	-1,00000	***
b2	-1,26389	***
b3	1,29167	***
b4	-0,01389	89,60%
b11	0,27083	11,30%
b22	0,47917	*
b33	-0,06250	70,00%
b44	-0,06250	70,00%
b12	0,31250	*
b13	-0,39583	*
b23	-0,45833	**
b14	0,02083	87,20%
b24	0,00000	100
b34	-0,04167	75,60%

Tableau 4.6 : Coefficient pour la réponse « Différence de temps de séchage entre la claie 10 et 1 pour une teneur en eau finale X »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	3,33	3,88	-0,55	-16,52
2	1,83	2,01	-0,17	-9,84
3	1,67	1,65	0,02	1,20
4	1,00	1,02	-0,02	-2,00
5	8,17	8,26	-0,09	-1,10
6	4,50	4,80	-0,30	-6,67
7	4,17	4,19	-0,02	-0,48
8	2,33	1,98	0,35	15,02
9	3,33	3,90	-0,56	-17,12
10	2,00	2,10	-0,10	-5,00
11	1,83	1,66	0,17	9,29
12	1,00	1,12	-0,12	-12,00
13	8,00	8,10	-0,10	-1,25
14	4,50	4,73	-0,23	-5,11
15	4,00	4,03	-0,03	-0,75
16	2,33	1,91	0,42	18,03
17	6,33	5,92	0,42	6,48
18	1,83	1,92	-0,08	-4,92
19	8,17	7,28	0,89	10,89
20	1,67	2,22	-0,56	-32,93
21	0,50	0,00	0,50	100,00
22	5,00	5,17	-0,17	-3,40
23	2,83	2,61	0,22	7,77
24	2,67	2,56	0,11	4,12
25	2,83	2,83	0,00	0,00

Tableau 4.7 : Résidus pour la réponse « Différence de temps de séchage entre la claie 10 et 1 pour une teneur en eau X »

Nom	Coefficient	Signif.
b0	0,83333	***
b1	-0,34028	***
b2	-0,15972	***
b3	0,00694	76,60%
b4	0,13194	***
b11	0,11981	**
b22	0,05731	11,60%
b33	-0,00519	87,40%
b44	-0,02603	46,10%
b12	0,05208	9,20%
b13	-0,01042	71,90%
b23	-0,01042	71,90%
b14	-0,05208	9,20%
b24	-0,01042	71,90%
b34	-0,03125	29,40%

Tableau 4.8 : Coefficient pour la réponse « Différence de temps de séchage entre deux teneurs en finale X1 et X2 pour la claie 10 »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	3,33	3,88	-0,55	-16,52
2	1,83	2,01	-0,17	-9,84
3	1,67	1,65	0,02	1,20
4	1,00	1,02	-0,02	-2,00
5	8,17	8,26	-0,09	-1,10
6	4,50	4,80	-0,30	-6,67
7	4,17	4,19	-0,02	-0,48
8	2,33	1,98	0,35	15,02
9	3,33	3,90	-0,56	-17,12
10	2,00	2,10	-0,10	-5,00
11	1,83	1,66	0,17	9,29
12	1,00	1,12	-0,12	-12,00
13	8,00	8,10	-0,10	-1,25
14	4,50	4,73	-0,23	-5,11
15	4,00	4,03	-0,03	-0,75
16	2,33	1,91	0,42	18,03
17	6,33	5,92	0,42	6,48
18	1,83	1,92	-0,08	-4,92
19	8,17	7,28	0,89	10,89
20	1,67	2,22	-0,56	-32,93
21	0,50	0,00	0,50	100,00
22	5,00	5,17	-0,17	-3,40
23	2,83	2,61	0,22	7,77
24	2,67	2,56	0,11	4,12
25	2,83	2,83	0,00	0,00

Tableau 4.7 : Résidus pour la réponse « Différence de temps de séchage entre la claie 10 et 1 pour une teneur en eau X »

Nom	Coefficient	Signif.
b0	0,83333	***
b1	-0,34028	***
b2	-0,15972	***
b3	0,00694	76,60%
b4	0,13194	***
b11	0,11981	**
b22	0,05731	11,60%
b33	-0,00519	87,40%
b44	-0,02603	46,10%
b12	0,05208	9,20%
b13	-0,01042	71,90%
b23	-0,01042	71,90%
b14	-0,05208	9,20%
b24	-0,01042	71,90%
b34	-0,03125	29,40%

Tableau 4.8 : Coefficient pour la réponse « Différence de temps de séchage entre deux teneurs en finale X1 et X2 pour la claie 10 »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	1,17	1,28	-0,11	-9,40
2	0,67	0,62	0,05	7,46
3	0,83	0,90	-0,06	-8,43
4	0,50	0,44	0,06	12,00
5	1,33	1,40	-0,06	-5,26
6	0,67	0,69	-0,03	-2,99
7	1,00	0,97	0,03	3,00
8	0,50	0,48	0,02	4,00
9	1,67	1,73	-0,06	-3,59
10	0,83	0,86	-0,03	-3,61
11	1,33	1,31	0,03	1,50
12	0,67	0,65	0,02	2,99
13	1,67	1,72	-0,06	-2,99
14	0,83	0,81	0,02	2,41
15	1,17	1,26	-0,09	-7,69
16	0,67	0,56	0,11	16,42
17	2,17	1,99	0,17	8,29
18	0,50	0,63	-0,13	-26,00
19	1,50	1,38	0,12	8,00
20	0,67	0,74	-0,08	-10,45
21	0,83	0,80	0,03	3,61
22	0,83	0,83	0,01	0,00
23	0,50	0,47	0,03	6,00
24	1,00	0,99	0,01	1,00
25	0,83	0,83	0,00	0,00

Tableau 4.9 : Coefficient pour la réponse « Différence de temps de séchage entre deux teneurs en finale X1 et X2 pour la claie 10»

Dans le cas du plan d'expériences (modèle 1), les polynômes des paramètres de sortie s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 D(\text{heure}) = & 8,66667 - 3,29397 * T_s - 2,60881 * D_v + 1,43286 * S_{\text{enc}} \\
 & + 0,83564 * M_p + 0,99017 * T_s^2 + 0,86517 * D_v^2 + 0,68403 * (T_s * D_v) \\
 & - 0,42014 * (T_s * S_{\text{enc}}) - 0,51736 * (D_v * S_{\text{enc}}) - 0,25347 * (T_s * M_p). \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E(\text{kWh/kg}_{\text{ms}}) = & 11,35306 + 0,49625 * T_s + 1,27211 * D_v + 1,58314 * S_{\text{enc}} \\
 & + 1,00092 * M_p - 0,24017 * T_s^2 - 0,11169 * D_v^2 - 0,06506 * M_p^2 \\
 & + 0,10708 * (T_s * S_{\text{enc}}) + 0,18011 * (D_v * M_p). \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Dd_{\text{ claie}}(\text{heure}) = & 2,83333 - 1,00000 * T_s - 1,26389 * D_v + 1,29167 * S_{\text{enc}} \\
 & + 0,27083 * T_s^2 + 0,47917 * D_v^2 + 0,31250 * (T_s * D_v) \\
 & - 0,39583 * (T_s * S_{\text{enc}}) - 0,45833 * (D_v * S_{\text{enc}}). \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Dd_Xpr(\text{heure}) = & 0,83333 - 0,34028 * T_s - 0,15972 * D_v + 0,13194 * M_p \\
 & + 0,11981 * T_s^2 + 0,05731 * D_v^2 + 0,05208 * (T_s * D_v) \\
 & - 0,05208 * (T_s * M_p) - 0,03125 * (S_{enc} * M_p)
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Pour les 25 expériences données par le logiciel NEMROD, nous constatons dans le tableau 4.1 donnant les valeurs des paramètres d'entrée et les résultats obtenus pour le premier plan d'expérience de séchage à condition d'entrer de l'air constante que la durée de séchage de la dixième claie des cinq expériences marquées par une étoile dépasse une journée.

Sur les autres expériences nous remarquons que la température et le débit de l'air asséchant jouent un rôle primordial sur les paramètres de sortie. La surface de l'enceinte et la quantité du produit à sécher interviennent à un degré moindre. Ceci est bien illustré sur les tableaux 4.2-4.9, donnant les coefficients et les résidus pour les paramètres de sortie.

4.2.2-Etude de séchoir avec des conditions d'entrée de l'air variables

4.2.1.2-Choix des paramètres et des plages de variations

Un deuxième plan d'expériences (modèle 2) a été traité pour étudier un système complet comprenant un séchoir et un capteur solaire. Dans ce cas, les paramètres sont :

- la surface du capteur solaire à air S_{cap} (de 1 à 5 m²) ;
- le débit volumique de l'air asséchant D_v (de 100 à 500 m³/h) ;
- la surface de l'enceinte de séchage S_{enc} (de 0,3 à 1,0 m²) ;
- la masse des feuilles de menthe à sécher M_p (de 0,1 à 1,0 kg/claie).

Pour ce plan nos réponses sont :

- la durée de séchage de la dixième (10) claie (D en h) ;
- la différence du temps de séchage entre la claie dix (10) et la claie une (1) (Dd_claie en h) ;

Nous ne sommes pas intéressés aux réponses :

- énergie nécessaire à l'évaporation car elle est gratuite pour le cas du séchage solaire ;
- la différence du temps de séchage entre deux teneurs en eau finale des feuilles car elle n'est pas significative pour ce type de séchage.

Comme précédemment, ce modèle nécessite 25 expériences pour un problème à 4 paramètres. Le tableau 4.10 donne les valeurs de chaque paramètre pour les 25 expériences ainsi que les résultats obtenus pour un séchage ou en couplant le capteur solaire avec séchoir.

N° Exp	surface du capteur S_{cap} (m ²)	débit d'air D_v m ³ /h	masse du produit M_p kg	surface enceinte S_{enc} m ²	Durée de séch. X1C10 D h	Dif-durée de séchage X1(C10-C1) Dd claie h	Temp. air Humide max K	Temp. air séchage max K
1 ^(a)	2	200	0,325	0,475	7,67	2,00	301,58	319,97
2 ⁽⁺⁾	4	200	0,325	0,475	4,50	1,00	305,43	338,44
3 ^(a)	2	400	0,325	0,475	9,00	2,50	299,42	310,93
4 ^(a)	4	400	0,325	0,475	5,17	0,83	301,58	320,17
5 ^(*)	2	200	0,775	0,475	27,50	21,50	301,55	319,59
6 ⁽⁺⁾	4	200	0,775	0,475	6,00	2,33	305,43	338,51
7 ^(*)	2	400	0,775	0,475	28,33	21,50	299,91	310,68
8 ^(a)	4	400	0,775	0,475	6,67	2,17	301,57	320,10
9 ^(*)	2	200	0,325	0,825	25,83	18,67	301,57	319,86
10 ⁽⁺⁾	4	200	0,325	0,825	5,17	1,00	305,43	338,38
11 ^(*)	2	400	0,325	0,825	27,67	17,50	299,42	310,89
12 ^(a)	4	400	0,325	0,825	7,00	0,67	301,94	321,83
13 ^(*)	2	200	0,775	0,825	28,83	21,33	301,56	319,34
14 ⁽⁺⁾	4	200	0,775	0,825	6,83	2,50	305,42	338,25
15 ^(*)	2	400	0,775	0,825	29,83	3,67	299,42	311,10
16 ^(a)	4	400	0,775	0,825	7,83	2,50	301,56	319,95
17 ^(*)	1	300	0,55	0,65	51,67	22,67	298,66	307,58
18 ⁽⁺⁾	5	300	0,55	0,65	5,17	1,33	304,20	332,30
19 ⁽⁺⁾	3	100	0,55	0,65	6,17	2,33	308,80	356,58
20 ^(a)	3	500	0,55	0,65	8,67	2,50	299,86	312,72
21 ^(a)	3	300	0,1	0,65	5,67	0,33	301,57	320,16
22 ^(*)	3	300	1	0,65	26,50	20,83	301,56	319,71
23 ^(a)	3	300	0,55	0,3	6,17	2,00	301,57	320,13
24 ^(*)	3	300	0,55	1	25,33	19,00	301,56	319,84
25 ^(a)	3	300	0,55	0,65	7,83	2,33	301,56	319,95

^(a) les expériences acceptables (Dimensionnées).

^(*) les expériences dépassants une journée de séchage

⁽⁺⁾ les températures de l'air dépassants celle de consigne (323 ± 5 K).

Tableau 4.10 : Les valeurs des paramètres d'entrer et les résultats obtenus pour le deuxième plan d'expérience « Séchage solaire »

Les tableaux 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14 donnent la valeur des coefficients ainsi que la signification de chaque coefficient et les résidus pour la réponse « **Durée séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X** » et « **La différence du temps de séchage entre la claie dix (10) et la claie une (1)** ».

Nom	Coefficient	Signif.
b0	7,83333	10,50%
b1	-9,52083	***
b2	0,59028	53,50%
b3	3,81250	**
b4	3,43750	**
b11	4,76217	**
b22	-0,48783	71,90%
b33	1,67883	23,10%
b44	1,59550	25,40%
b12	-0,05208	96,20%
b13	-2,42708	5,20%
b23	-0,13542	90,10%
b14	-2,19792	7,30%
b24	0,13542	90,10%
b34	-2,15625	7,80%

Tableau 4.11 : Coefficient pour la réponse « Durée de séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	7,67	10,23	-2,56	-33,38
2	4,50	0,54	3,96	88,00
3	9,00	11,51	-2,51	-27,89
4	5,17	1,62	3,55	68,67
5	27,50	27,29	0,21	0,76
6	6,00	7,90	-1,90	-31,67
7	28,33	28,03	0,30	1,06
8	6,67	8,43	-1,76	-26,39
9	25,83	25,54	0,29	1,12
10	5,17	7,06	-1,90	-36,56
11	27,67	27,37	0,30	1,08
12	7,00	8,68	-1,68	-24,00
13	28,83	33,98	-5,15	-17,86
14	6,83	5,79	1,04	15,23
15	29,83	35,26	-5,43	-18,20
16	7,83	6,87	0,97	12,26
17	51,67	45,92	5,74	11,13
18	5,17	7,84	-2,67	-51,64
19	6,17	4,70	1,47	23,82
20	8,67	7,06	1,60	18,57
21	5,67	6,92	-1,26	-22,05
22	26,50	22,17	4,33	16,34
23	6,17	7,34	-1,17	-18,96
24	25,33	21,09	4,24	16,74
25	7,83	7,83	0,00	0,00

Tableau 4.12 : Résidus pour la réponse « Durée de séchage de la claie 10 pour une teneur en eau finale X »

Nom	Coefficient	Signif.
b0	2,33333	70,6%
b1	-5,76389	***
b2	-0,77778	54,6%
b3	3,09722	*
b4	2,00000	13,1%
b11	2,20486	24,5%
b22	-0,19097	91,4%
b33	1,85069	32,7%
b44	1,82986	33,2%
b12	1,10417	48,5%
b13	-1,33333	40,0%
b23	-1,04167	51,0%
b14	-0,83333	59,7%
b24	-1,20833	44,5%
b34	-3,06250	6,7%

Tableau 4.13 : Coefficient pour la réponse « Différence de temps de séchage entre la claie 10 et 1 pour une teneur en eau finale X »

N° Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Différence (%)
1	2,00	3,10	-1,10	-55,00
2	1,00	-6,31	7,31	731,00
3	2,50	3,83	-1,33	-53,20
4	0,83	-1,15	1,99	238,55
5	21,50	20,17	1,33	6,19
6	2,33	5,43	-3,10	-133,05
7	21,50	16,74	4,76	22,14
8	2,17	6,42	-4,25	-195,85
9	18,67	17,31	1,36	7,28
10	1,00	4,57	-3,57	-357,00
11	17,50	13,21	4,29	24,51
12	0,67	4,89	-4,22	-629,85
13	21,33	22,13	-0,79	-3,75
14	2,50	4,06	-1,56	-62,40
15	3,67	13,86	-10,19	-277,66
16	2,50	0,21	2,29	91,60
17	22,67	22,68	-0,01	-0,04
18	1,33	-0,38	1,71	128,57
19	2,33	3,13	-0,79	-34,33
20	2,50	0,01	2,49	99,60
21	0,33	3,54	-3,21	-972,73
22	20,83	15,93	4,90	23,52
23	2,00	5,65	-3,65	-182,50
24	19,00	13,65	5,35	28,16
25	2,33	2,33	0,00	0,00

Tableau 4.14 : Résidus pour la réponse « Différence de temps de séchage entre la claie 10 et 1 pour une teneur en eau finale X »

Dans ce plan d'expérience (modèle 2), les polynômes des paramètres de sortie s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 D(\text{heure}) = & 7,83333 - 9,52083 * S_{\text{cap}} + 3,81250 * M_p + 3,43750 * S_{\text{enc}} \\
 & + 4,76217 * S_{\text{cap}}^2 + 1,67883 * M_p^2 + 1,59550 * S_{\text{enc}}^2 \\
 & - 2,42708 * (S_{\text{cap}} * M_p) - 2,19792 * (S_{\text{cap}} * S_{\text{enc}}) - 2,15625 * (M_p * S_{\text{enc}}).
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
 Dt_{\text{claie}}(\text{heure}) = & - 5,76389 * S_{\text{cap}} + 3,09722 * M_p + 2,00000 * S_{\text{enc}} \\
 & + 2,20486 * S_{\text{cap}}^2 + 1,85069 * M_p^2 + 1,82986 * S_{\text{enc}}^2 \\
 & - 1,33333 * (S_{\text{cap}} * M_p) - 3,06250 * (M_p * S_{\text{enc}})
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Dans ce deuxième plan d'expérience, nous pouvons définir trois catégories d'expériences, celles dont le temps de séchage est inférieur à la durée d'ensoleillement d'une journée, celle dont ce temps de séchage est supérieur à une journée et celles pour lesquelles la température de séchage dépassent celles de consignes.

Les deux dernières catégories d'expériences sont éliminées car le résultat est incompatible avec la qualité du produit. D'après l'étude de Teresita ROCHA MIER, lors d'un séchage des produits en feuilles, une température qui dépasse les $50 \pm 5^\circ\text{C}$ détruit les composants nutritifs (couleur et arôme) de ces produits.

Un séchage des feuilles de menthe dépassant une journée est également préjudiciable pour la qualité du produit à cause du phénomène d'adsorption des feuilles de menthe pendant la période nocturne due au changement brusque de la température.

Ainsi la figure 4.2 montre que pour sécher la claie une et dix contenant 0,55 kg de feuilles de menthe avec une surface de captation d'énergie solaire de 1 m^2 , un débit d'air de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ dans une enceinte de séchage de surface de $0,65 \text{ m}^2$ il faut respectivement presque 30 et 52 heures de séchage. Ceci implique que le produit passe par les deux phases désorption-adsorption ce qui provoque la détérioration (fermentation) des feuilles de menthe.

Les polynômes représentant les réponses issues de ce plan d'expérience sont moins prédictifs que celles du séchage avec des conditions d'entrée constantes.

Nous constatons par ailleurs qu'il y a l'absence totale de l'influence du débit d'air asséchant et que la surface du capteur solaire domine tous les autres paramètres tels que la surface de l'enceinte de séchage et la masse des feuilles de menthe à sécher.

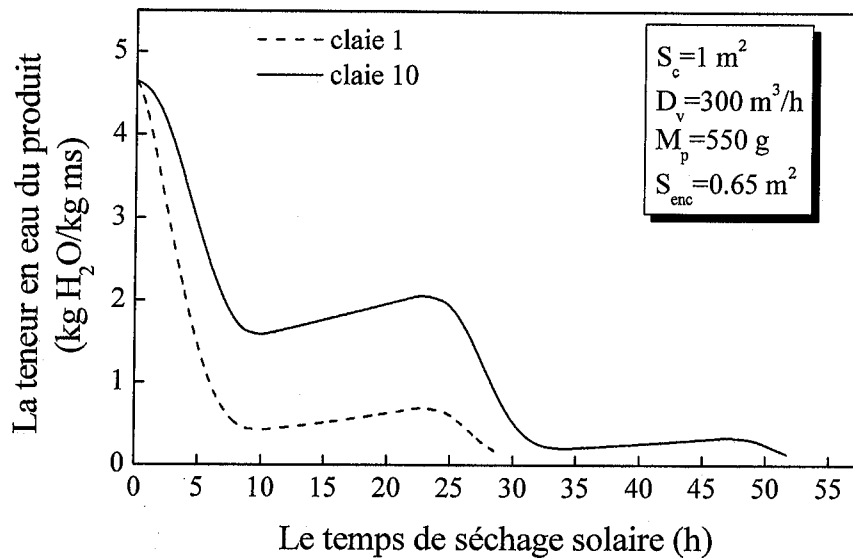


Figure 4.2 : Variation de la teneur en eau des feuilles de menthe en fonction du temps de séchage

4.3-REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **J. GOUPY**, Plans d'expériences, Technique de l'ingénieur, Traité Analyse et Caractérisation, PE 230-1 - PE 230-26.

[2] **B. LIPS**, 2000, Utilisation des plans d'expériences pour l'étude d'un sèche-linge à évacuation, Rapport final, Convention INSA-EDF n° E16/C59696/0.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail a consisté en l'étude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) par convection forcée dans un séchoir polyvalent.

Sur le plan expérimental, nous avons établi pour les feuilles de menthe verte les isothermes de sorption par la méthode gravimétrique statique pour trois températures (30, 40 et 50°C). Ces courbes d'humidité d'équilibre permettent de faire des prévisions sur le comportement du produit lors du traitement (séchage et stockage). Les corrélations disponibles dans la littérature ayant servi à modéliser les isothermes de sorption par huit modèles statiques. Ces modèles sont intégrés dans un programme informatique (Curve expert 1.3) qui a permis de simuler les courbes expérimentales.

Une deuxième étude expérimentale est réalisée pour la *Mentha viridis* afin de déterminer la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps du produit ainsi que la courbe caractéristique de séchage (CCS) pour les températures (40, 45 et 50 °C) et pour deux débits (0,0296 et 0,0592 m³/s). Cette courbe expérimentale est lissée par treize modèles. L'analyse des paramètres statiques a montré que le modèle de **Midilli-Kucuk** décrit bien cette courbe.

Afin de pouvoir identifier numériquement une forme de la courbe caractéristique de séchage de la menthe verte, nous avons considéré que X_{cr} est égale à X_0 . Cette représentation simple de la CCS constitue un outil intéressant pour la compréhension du fonctionnement du séchoir. La multiplicité des essais expérimentaux réalisés nous a permis de discuter l'unicité de la courbe caractéristique de séchage. Nous avons ainsi identifié les paramètres caractéristiques de séchage du produit ciblé. Des corrélations mathématiques de calcul de la teneur en eau en fonction du temps et de la vitesse de séchage initiale sont établies. Elles permettent de reconstituer les cinétiques de séchage du produit avec une bonne concordance.

Les résultats de ces deux études expérimentales sont introduits dans un programme écrit en fortran afin de modéliser le séchage solaire du produit. Ce modèle prend en compte les corrélations de calcul de la puissance solaire reçu sur un capteur plan et les équations différentielles aux dérivées partielles pour déterminer la température de l'air à la sortie du capteur. Il intègre également la modélisation de la cellule de séchage avec des caractéristiques d'entrée constantes de l'air chaud et pour un système complet comprenant un séchoir et un

capteur solaire. Nous avons cherché à définir un modèle mathématique qui nous affranchisse de la résolution de systèmes d'équations différentielles aux dérivées partielles au niveau de l'air asséchant et le produit à sécher. Il est basé sur les paramètres propres du produit étudié et sur ceux du site d'expérimentation. Une confrontation des résultats théoriques et expérimentaux a été faite, et offre une bonne concordance pour les courbes de séchage.

Une simulation numérique a été faite pour étudier l'influence de la température de l'air asséchant, le débit d'air chaud, l'hygrométrie du fluide caloporteur et la masse initiale du produit à sécher sur la teneur en eau du produit et la durée de séchage des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*).

Afin de dimensionner le système de séchage solaire (capteur plan, enceinte de séchage) une étude paramétrique basée sur la technique des plans d'expérience est menée. Le premier plan d'expériences effectué concerne le séchage avec des caractéristiques d'entrée constantes de l'air chaud dans le séchoir et un deuxième plan avec un séchage ou l'enceinte de séchoir est couplée un capteur solaire plan. Ces deux plans nécessitent 25 expériences pour quatre paramètres d'entrée en utilisant le logiciel NEMROD écrit et distribué par le Laboratoire de Prospective Réactionnelle et d'Analyse de l'Information (LPRAI) de Marseille.

Le premier plan d'expérience permet d'étudier l'influence des divers paramètres et d'obtenir les réponses étudiées sous une forme polynomiale. La correspondance est bonne entre le polynôme ainsi déterminé et les résultats du modèle.

Les résultats des polynômes du deuxième plan d'expérience ainsi ceux du modèle sont moins bons que les résultats dans le cas d'un séchage avec les conditions d'entrer sont constants. Ceci est dû à la forte liaison entre tout les paramètres d'entrer et surtout la surface du capteur et de l'enceinte ainsi que la masse du produit. Nous pouvons constater sur les deux polynômes l'absence totale de l'influence du débit d'air malgré que dans une opération de séchage ce paramètre soit de grande importance.

En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux par :

- une étude dynamique des isothermes de sorption afin de trouver une teneur en eau d'équilibre du produit très réaliste,
- la détermination des cinétiques de séchage des feuilles de menthe, plus précises, dans une soufflerie de laboratoire pour éviter la mesure de la perte en eau du produit à l'extérieur de l'enceinte de séchage,
- l'utilisation des résultats du chapitre 4 pour déterminer des abaques de dimensionnement permettant de lire la surface d'insolateur à installer connaissant la masse de produit à sécher,
- l'étude de l'influence des paramètres du séchage sur la qualité du produit à sécher,
- l'étude d'un modèle économique pour estimer le coût du séchage solaire.

A NNEXES

ANNEXE A2.1: Détermination expérimentale des Isothermes de sorption

A2.1.1- Performance des modèles sélectionnés pour les isothermes du sorption du *Mentha viridis*

Le tableau A2.1.1 regroupe les valeurs des paramètres statistiques des huit modèles sélectionnés à savoir les coefficients de corrélation, l'erreur moyenne relative et l'erreur standard de la teneur en eau estimée des modèles utilisés pour le lissage des isothermes de désorption et d'adsorption du *Mentha viridis*.

Tableau A2.1.1 : Performance des modèles sélectionnés pour les isothermes du sorption du *Mentha viridis*

Modèle	Constan tes	Désorption			Adsorption		
		30	40	50	30	40	50
GAB	A	9,17	8,16	7,03	5,02	4,74	4,55
	B	0,84	0,86	0,89	0,92	0,93	0,94
	C	3,27E+10	4,86E+10	8,11E+10	633,00	168,00	180,00
	r	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EMR (%)	7,54	3,73	3,84	4,88	5,70	5,78
	EST	2,08	1,07	0,91	1,02	0,91	0,89
	X _m		8,12			4,77	
	K		2,05			1,15	
	C		6,55E+16			-6,07E-07	
	h ₁		-2,25E+3			-5,66E+2	
h ₂		-3,69E+4			5,19E+4		
Henderson modifié	A	6,00E-04	8,00E-04	5,00E-04	4,50E-03	2,80E-03	3,00E-03
	B	-25,49	-23,25	-28,48	-21,97	-32,06	-31,23
	C	1,86	1,73	1,54	1,25	1,16	1,13
	r	0,96	0,96	0,95	0,97	0,98	0,98
	EMR(%)	12,56	15,07	18,11	18,29	17,84	16,76
	EST	3,74	3,71	3,93	2,96	2,56	2,36
Chung- Pfof modifié	A	6,00E-04	8,00E-04	5,00E-04	4,50E-03	2,80E-03	3,00E-03
	B	-25,49	-23,25	-28,48	-21,97	-32,06	-31,23
	C	1,86	1,73	1,54	1,25	1,16	1,13
	r	0,96	0,96	0,95	0,97	0,98	0,98
	EMR (%)	12,56	15,07	18,11	18,29	17,84	16,76
	EST	3,74	3,71	3,93	2,96	2,56	2,36
Oswin	A	14,11	12,47	10,98	10,58	9,32	9,79
	B	0,11	0,08	0,06	-0,01	0,00	-0,01
	C	0,34	0,37	0,40	-0,47	0,50	0,51
	r	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99

modifié	EMR (%)	7,16	9,00	12,37	11,56	12,32	13,24
	EST	2,15	2,18	2,63	1,78	1,67	1,60
Hasley modifié	A	5,53	5,63	4,71	4,20	4,58	3,12
	B	1,44E-02	-7,0E-03	-2,0E-03	-1,4E-02	-3,34E-02	-1,1E-03
	C	2,26	2,11	1,92	1,82	1,63	1,58
	r	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	EMR (%)	4,00	3,30	6,05	7,56	7,70	8,54
	EST	1,28	0,81	1,36	1,69	1,09	1,05
Peleg	A	21,60	15,93	11,60	11,47	8,44	6,98
	B	0,35	0,23	0,12	0,32	0,22	0,16
	k ₁	49,31	40,10	39,53	39,24	34,55	32,70
	k ₂	9,48	6,14	4,99	7,12	5,20	0,79
	r	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EMR (%)	2,21	1,99	2,70	5,18	5,11	4,91
	EST	0,78	0,78	1,14	1,02	0,90	0,79
Langmuir	A	0,09	0,11	0,12	0,19	0,25	0,28
	B	-0,08	-0,09	-0,11	-0,17	-0,23	-0,26
	C	2,35	2,31	2,38	2,12	1,79	1,71
	r	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EMR (%)	8,24	3,90	1,66	5,68	5,14	6,23
	EST	1,97	0,87	0,57	1,00	0,81	0,75
BET modifié	A	6,06	5,00	3,63	0,00	3,83	2,91
	B	0,11	0,07	0,06	-21,97	0,03	0,02
	C	99,97	4,59E+09	7,49E+10	1,25	563,00	8,15
	r	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	EMR (%)	1,68	2,61	7,05	3,06	2,84	4,13
	EST	0,28	0,32	0,76	0,82	0,66	0,80

A2.1.2- Les isothermes de désorption et d'adsorption du *Mentha viridis* mesurées et calculées pour les six modèles :

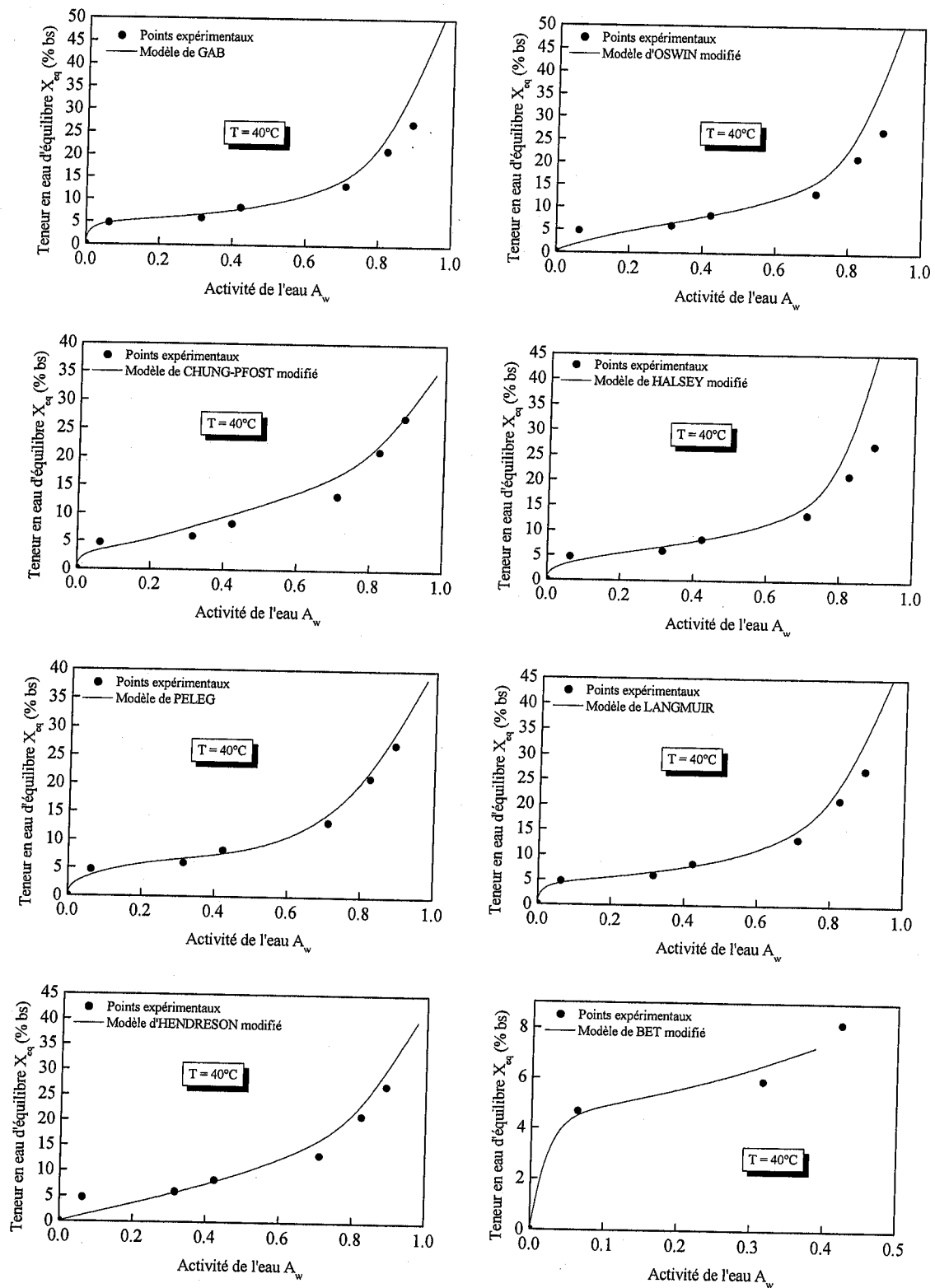


Figure A2.1.2.1 : Isothermes d'adsorption de la menthe verte (*Mentha viridis*) lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 40^\circ\text{C}$)

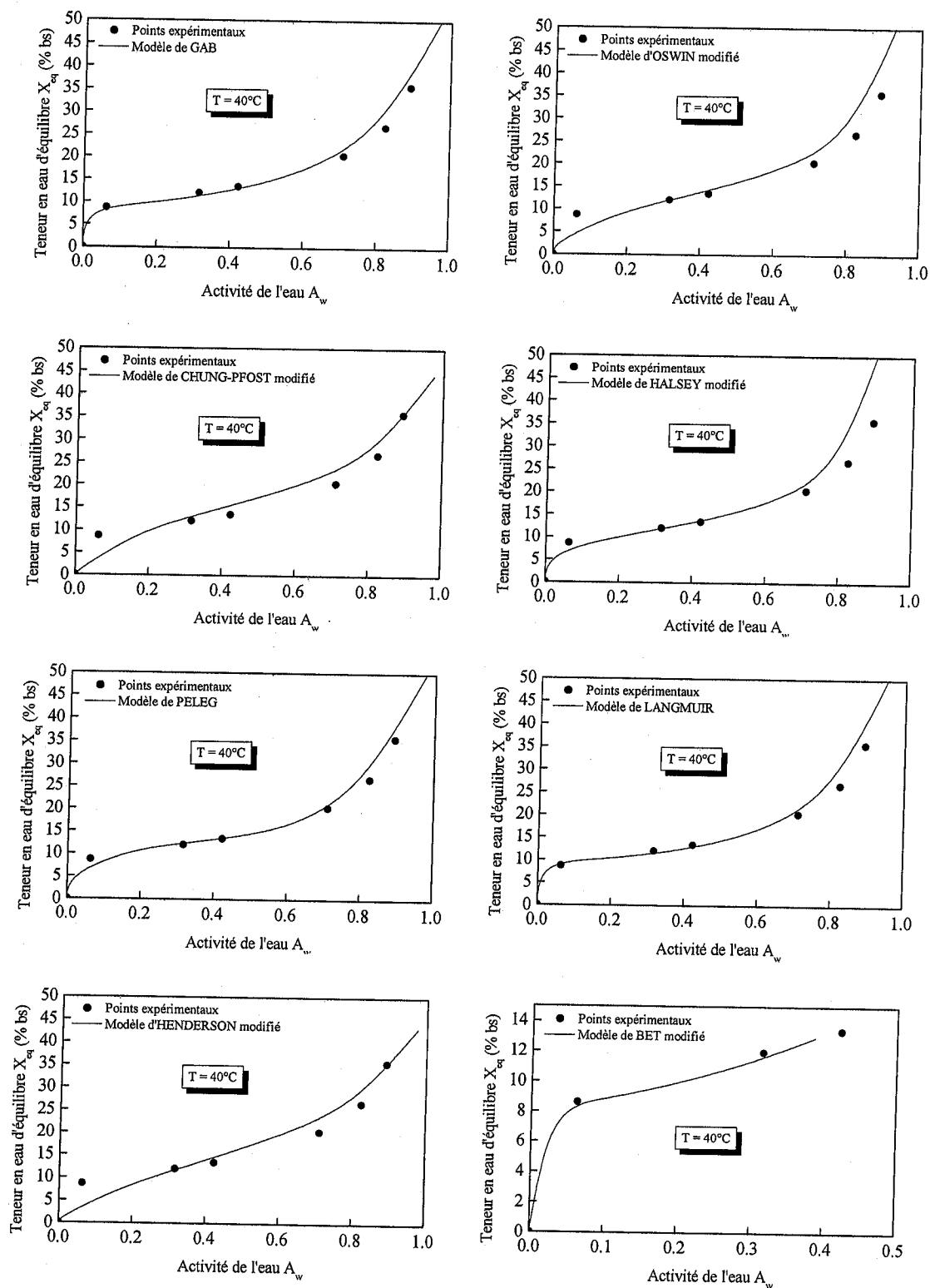


Figure A2.1.2.2 : Isothermes de désorption de la menthe verte (*Mentha viridis*)
lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 40^\circ\text{C}$)

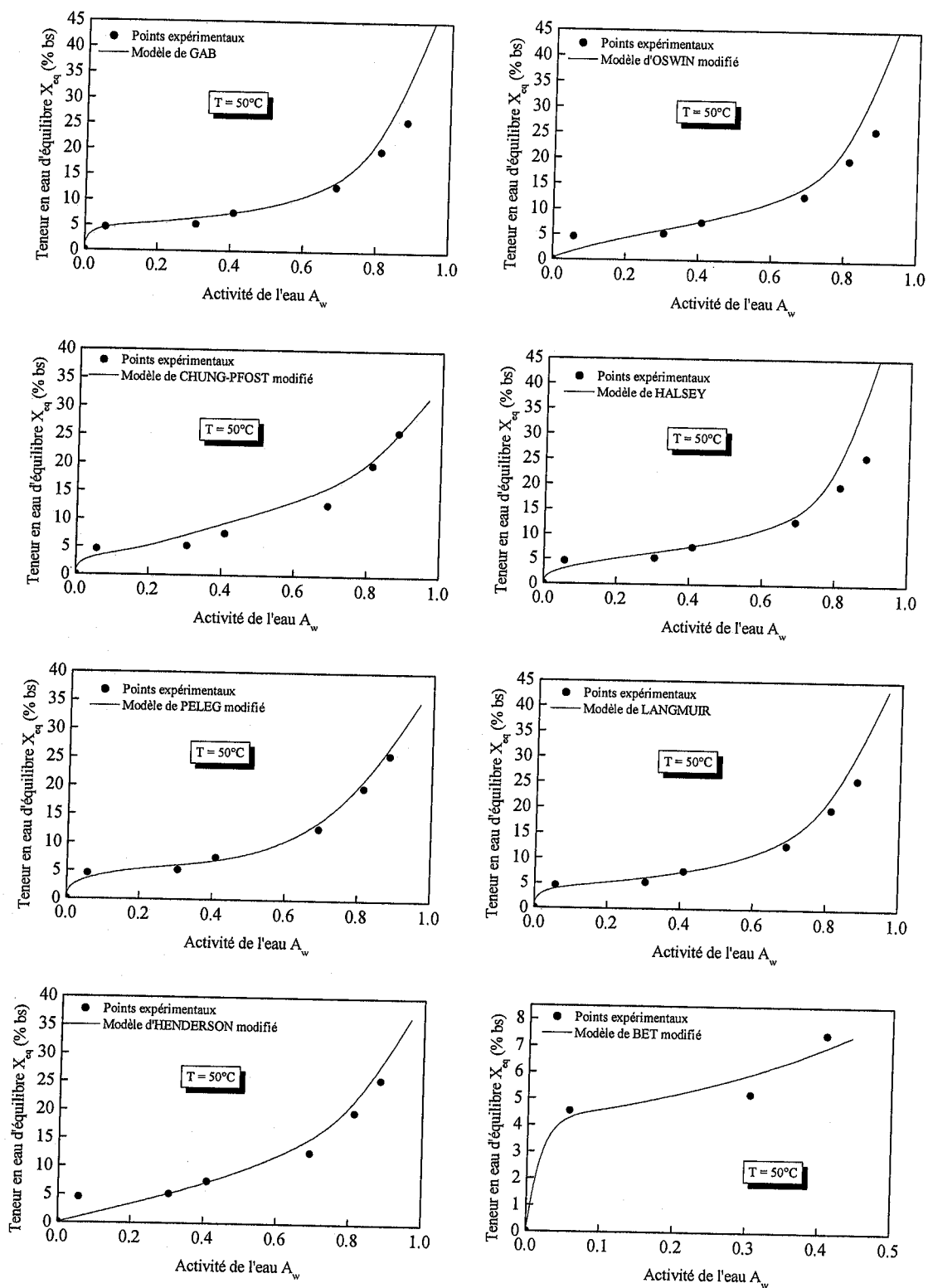


Figure A2.1.2.3 : Isothermes d'adsorption de la menthe verte (*Mentha viridis*)
lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 50^\circ\text{C}$)

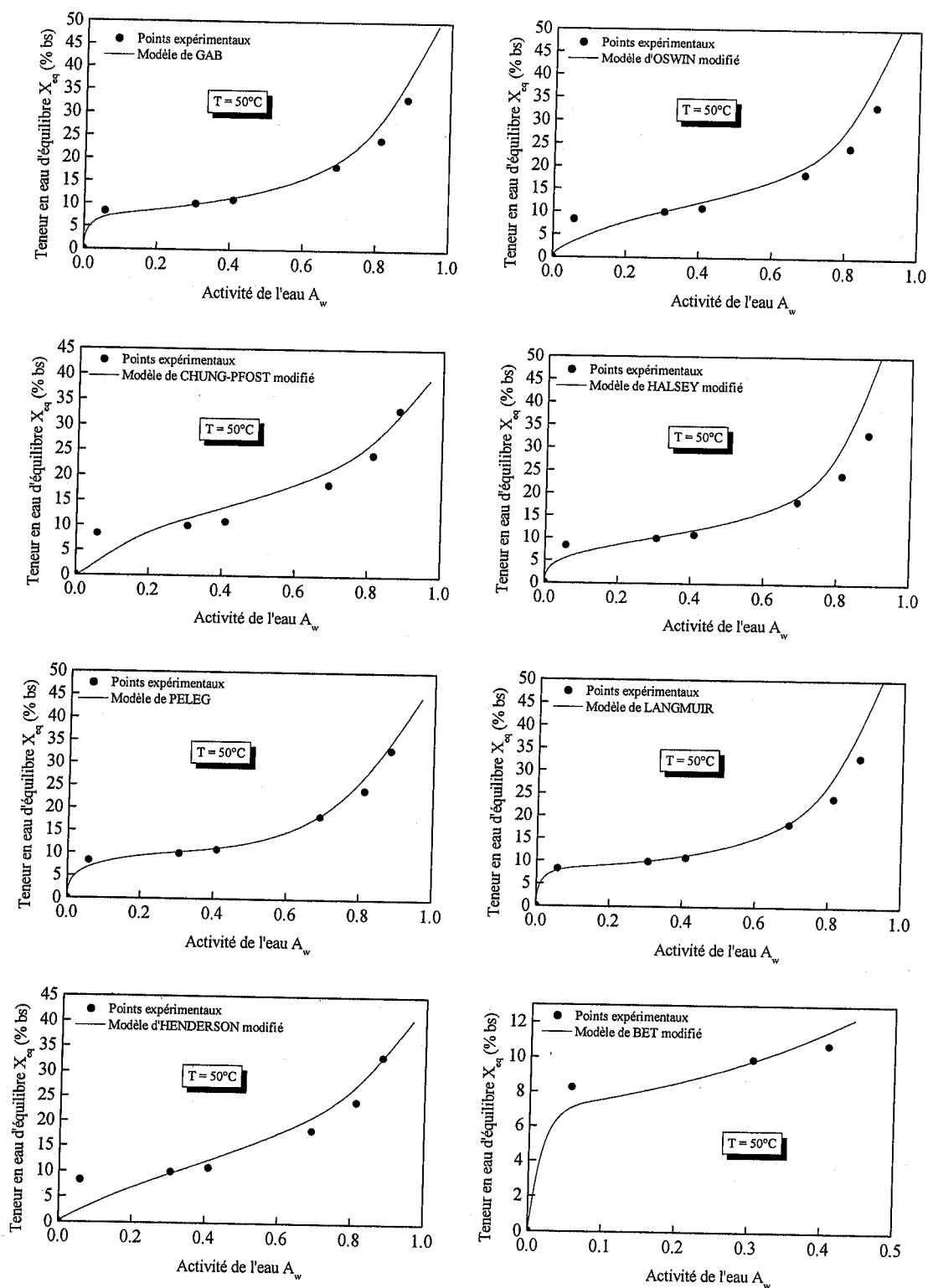


Figure A2.1.2.4 : Isothermes de désorption de la menthe verte (*Mentha viridis*)
lissées par les huit modèles sélectionnés à ($T = 50^{\circ}\text{C}$)

ANNEXE A3.1: Calcul de la température humide de l'air de séchage

Le calcul de la température humide T_h est donné par la subroutine suivante :

*****subroutine calcul de la température humide*****

```

Subroutine temperature_humide(Tair_humide,CPair,A_Lvap,Weq,Teq)
real Tair_humide,Wsath,Psath,CPair,A_Lvap,Weq,Teq
correl=2.
EPSILON=0.001
P=101325.
Tair_humide=Teq
Tair_humideC=1000
do while(abs(Tair_humide-Tair_humideC).GT.EPSILON)
Psath=10**((2.7877+((7.625*(Tair_humide-273.15))/
$(241.6+(Tair_humide-273.15))))))
Wsath=0.622*(Psath/(P-Psath))
CPair=1.005928+(0.000001*(Teq-273.15)+(0.0000006*(Teq-273.15)**2
&))
A_Lvap=4.186*(597.-0.56*(Tair_humide-273.15))
Tair_humideC=273.15+(Teq-273.15)-((A_Lvap*(Wsath-Weq))
&/((CPair+(1.826*Wsath))))
Tair_humide=((correl*Tair_humide)+Tair_humideC)/(1+correl)
ENDDO
Return
end

```

A3.2 LE LISTING DU PROGRAMME SECHAGE

Program sechage

```

*****
COMMON/paramètres expérimentaux/TEMPS_IN,TEMPS_FINAL,Dt
*****Programme principal*****
CALL base_donnee
TEMPS=TEMPS_IN
DO WHILE(TEMPS.LT.TEMPS_FINAL+DT)
10 CALL Capteur(TEMPS)
CALL enceinte_sechage(TEMPS)
CALL resultats(TEMPS)
TEMPS=TEMPS+Dt
ENDDO
CLOSE(33)
CLOSE(34)
STOP
END
*****
*****subroutine base de donnée*****
Subroutine base_donnee
common/nom fichier/nomfichD,nomfichRE,nomfichRC
common/parametres experimentaux/TEMPS_IN,TEMPS_FINAL,Dt
common/caract air/Uamb,Wair0,DEBITM_air
common/caract produit/AM_prsec,X_pr_in,EP_pr,X0
common/caract sechoir/ALong,ALarg,haut,N,EP_pi,Rho_pi,Cond_pi,
&EP_iso,Cond_iso,CP_pi
common/caract courbe de sechage/Tair_sec,Tair_hum,ALPHA,BETA
common/capt solaire/EP_vit,EP_abs,EP_isoc,Rho_vit,Rho_ab,Rho_iso,
&Rho_air,CP_vit,CP_ab,CP_iso,CP_air,Sigma,epsi_vit,epsi_abs,epsi_
&iso,Cond_vit,Cond_isoc,Cond_air,alfa_n,a,b,alati0,ai0,d,al,an1,an2
&,ak,teta0,ALarg_cap,beta0,EP_air
common/geom/ALong_cap,K

```

```
character nomfichD*22
character nomfichRE*22
character nomfichRC*22
open(55,file='c:\touati\essai.dat')
read(55,*)nomfichD
read(55,*)nomfichRE
read(55,*)nomfichRC
read(55,*)
  read(55,*) TEMPS_IN
  read(55,*) TEMPS_FINAL
read(55,*) Dt
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*)
  read(55,*) Uamb
  read(55,*) Wair0
  read(55,*) DEBITM_air
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*)
  read(55,*) AM_prsec
  read(55,*) X_pr_in
  read(55,*) X0
  read(55,*) EP_pr
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*)
  read(55,*) ALong
  read(55,*) ALarg
  read(55,*) haut
  read(55,*) N
  read(55,*) EP_pi
  read(55,*) Rho_pi
```

read(55,*) CP_pi
read(55,*) Cond_pi
read(55,*) EP_iso
read(55,*) Cond_iso
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*) Tair_sec
read(55,*) Tair_hum
read(55,*) ALPHA
read(55,*) BETA
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*)
read(55,*) EP_air
read(55,*) EP_vit
read(55,*) EP_abs
read(55,*) EP_isoc
read(55,*) Rho_vit
read(55,*) Rho_ab
read(55,*) Rho_iso
read(55,*) Rho_air
read(55,*) CP_vit
read(55,*) CP_ab
read(55,*) CP_iso
read(55,*) CP_air
read(55,*) Sigma
read(55,*) epsi_vit
read(55,*) epsi_abs
read(55,*) epsi_iso
read(55,*) Cond_vit
read(55,*) Cond_isoc
read(55,*) Cond_air

```
read(55,*) alfa_n
read(55,*) a
read(55,*) b
read(55,*) alati0
read(55,*) beta0
read(55,*) ai0
read(55,*) d
read(55,*) al
read(55,*) an1
read(55,*) an2
read(55,*) ak
read(55,*) teta0
read(55,*) ALarg_cap
read(55,*) ALong_cap
read(55,*) K
close(55)
open(31,file='c:\touati\tempamb4.dat')
open(32,file=nomfichD)
open(33,file=nomfichRE)
open(34,file=nomfichRC)
Write(32,1)
1  Format(15X,'Parametres experimentaux')
   write(32,*) 'TEMPS_IN =', TEMPS_IN
   write(32,*) 'TEMPS_FINAL =', TEMPS_FINAL
   write(32,*) 'Dt =', Dt
   Write(32,2)
2  format(15X,'Caracteristiques de l air')
   write(32,*) 'Uamb =', Uamb
   write(32,*) 'Wair0 =', Wair0
   write(32,*) 'DEBITM_air =', DEBITM_air
   Write(32,3)
3  Format(15X,'Caracteristiques du produit')
   write(32,*) 'AM_prsec =', AM_prsec
```



```
write(32,*) 'X_pr_in =', X_pr_in
write(32,*) 'X0=', X0
write(32,*) 'EP_pr =', EP_pr
    Write(32,4)
4  Format(15X,'Caracteristiques du sechoir')
write(32,*) 'ALong =', ALong
write(32,*) 'ALarg =', ALarg
write(32,*) 'haut=', haut
write(32,*) 'N =', N
write(32,*) 'EP_pi =', EP_pi
write(32,*) 'Rho_pi =', Rho_pi
write(32,*) 'CP_pi =', CP_pi
write(32,*) 'EP_iso =', EP_iso
write(32,*) 'Cond_iso =', Cond_iso
    Write(32,5)
5  Format(15X,'Caracteristiques de la courbe de sechage')
write(32,*) 'Tair_sec=', Tair_sec
write(32,*) 'Tair_hum =', Tair_hum
write(32,*) 'ALPHA =', ALPHA
write(32,*) 'BETA =', BETA
    Write(32,6)
6  Format(15X,'Caracteristiques du capteur solaire')
write(32,*) 'EP_air=', EP_air
write(32,*) 'EP_vit=', EP_vit
write(32,*) 'EP_abs=', EP_abs
write(32,*) 'EP_isoc=', EP_isoc
write(32,*) 'Rho_vit=', Rho_vit
write(32,*) 'Rho_ab=', Rho_ab
write(32,*) 'Rho_iso=', Rho_iso
write(32,*) 'Rho_air=', Rho_air
write(32,*) 'CP_vit=', CP_vit
write(32,*) 'CP_ab=', CP_ab
write(32,*) 'CP_iso=', CP_iso
```

```

write(32,*) 'CP_air=',CP_air
write(32,*) 'Sigma=',Sigma
write(32,*) 'epsi_vit=',epsi_vit
write(32,*) 'epsi_abs=',epsi_abs
write(32,*) 'epsi_iso=',epsi_iso
write(32,*) 'Cond_vit=',Cond_vit
write(32,*) 'Cond_isoc=',Cond_isoc
    write(32,*) 'Cond_air=',Cond_air
write(32,*) 'alfa_n=',alfa_n
write(32,*) 'a=',a
write(32,*) 'b=',b
write(32,*) 'alati0=',alati0
    write(32,*) 'beta0=',beta0
write(32,*) 'ai0=',ai0
write(32,*) 'd=',d
write(32,*) 'al=',al
    write(32,*) 'an1=',an1
write(32,*) 'an2=',an2
write(32,*) 'ak=',ak
write(32,*) 'teta0=',teta0
write(32,*) 'ALarg_cap=',ALarg_cap
write(32,*) 'ALong_cap=',ALong_cap
    write(32,*) 'K=',K
close(32)
Return
End

```

*******subroutine capteur solaire*******

```

subroutine Capteur(TEMPS)
    common/parametres experimentaux/TEMPS_IN,TEMPS_FINAL,Dt
    common/capt solaire/EP_vit,EP_abs,EP_isoc,Rho_vit,Rho_ab,Rho_iso,
&Rho_air,CP_vit,CP_ab,CP_iso,CP_air,Sigma,epsi_vit,epsi_abs,epsi_
&iso,Cond_vit,Cond_isoc,Cond_air,alfa_n,a,b,alati0,ai0,d,al,an1,an2

```

```

&,ak,teta0,ALarg_cap,beta0,EP_air
  common/caract air/Uamb,HRair0,DEBITM_air
common/temperature/Tamb,Tair_cap(900)
  common/geom/Along_cap,K
  common/puissance/Pui_dif,Pui_dir
integer j
dimension Tvit_ex(900),Tvit_in(900),Tabs(900),Tiso_in(900),
&Tiso_ex(900),TTiso_ex(900),TTvit_ex(900),
&TTvit_in(900),TTabs(900),TTiso_in(900),TTair(900)
dimension Visdyn_air(900),ANU(900),Re(900),Prnd(900),Hair_abs(900)
&,Hrvit_ciel(900),Hrvit_abs(900),Hrabs_vit(900),Hriso_sol(900)
  Write(*,10)
10 Format(15X,'La temperature ambiante')
  read(31,*) Tamb
  write(*,*) 'Tamb(',TEMPS,')=', Tamb
*****Latitude*****
  alati=alati0*3.1416/180.
*****Constante solaire*****
  c=1.+0.033*cos(360*d/365*3.1416/180.)
  beta1=beta0*3.1416/180.
*****Déclinaison*****
  delta=23.45*sin(360./365*(d-81)*3.1416/180.)*3.1416/180.
  teta1=teta0*3.1416/180.
  teta2=asin(an1/an2*sin(teta1))
  r2=1/2.*((sin(teta2-teta1))**2)/((sin(teta2+teta1))**2)
  &+((tan(teta2-teta1))**2)/((tan(teta2+teta1))**2)
  tr2=(1-r2)/(1+r2)
  ta2=exp(-ak*EP_vit/cos(teta2))
  tdif2=tr2*ta2
  alfa_df=1-r2-tdif2
*****le pas d'espace*****
  Dx=ALong_cap/(K-1)

```

```

Hcond_vit=Cond_vit/EP_vit
Hcond_iso=Cond_isoc/EP_isoc
Hamb_vit=5.67+3.86*Uamb
dh=4.*EP_air*ALarg_cap/(2.*(EP_air+ALarg_cap))
Hcond_vit_abs=cond_air/EP_air
*****Calcul du rayonnement diffus et direct*****
    Tsol=Tamb
    Tciel=0.0552*(Tamb**1.5)
    Omega=15.*(TEMPS-12)*3.1416/180.
    haut=asin(cos(alati)*cos(delta)*cos(Omega)+sin(alati)
    &*sin(delta))
*****Angle d'inclinaison capteur*****
    ainc=acos(cos(alati-beta1)*cos(delta)*cos(Omega)
    &+sin(alati-beta1)*sin(delta))
    tau_dir=a*exp(-b/sin(haut))
    tau_dif=0.2710-0.293*tau_dir
    Pui_dirh=ai0*c*tau_dir
    Pui_dir=Pui_dirh*cos(ainc)
    IF(Pui_dir.LT.0)THEN
    Pui_dir=0.
    ENDIF
    Pui_difh=ai0*c*sin(haut)*tau_dif
    Pui_difcap=Pui_difh*(1+cos(beta1))/2.
    Pui_difs=al*(1-cos(beta1))/2.*(Pui_dirh*sin(haut)+Pui_difh)
    Pui_dif=Pui_difcap+Pui_difs
    IF(TEMPS.GE.TEMPS_FINAL-Dt/3600)THEN
    Pui_dif=0.
    ENDIF
    aksi=asin(an1/an2*sin(ainc))
    r1=1/2.*((sin(aksi-ainc))**2)/((sin(aksi+ainc))**2)
    &+((tan(aksi-ainc))**2)/((tan(aksi+ainc))**2)
    tr1=(1-r1)/(1+r1)
    ta1=exp(-ak*EP_vit/cos(aksi))

```

```

tdir=tr1*ta1
alfa_dr=1-r1-tdir
pv=Pui_dir*alfa_dr+Pui_dif*alfa_df
pn=alfa_n/(1-(1-alfa_n)*r2)*(Pui_dir*tdir+Pui_dif*tdif2)

```

*****Calcul des températures*****

*****Les conditions d'espace et du temps*****

```

Tair_cap(1)=Tamb
write(*,*)'dans capteur',temps,tamb
if(TEMPS.EQ.TEMPS_IN) then
do j=1,k
Tair_cap(j)=Tamb
Tvit_ex(j)=Tamb
Tvit_in(j)=Tamb
Tabs(j)=Tamb
Tiso_in(j)=Tamb
Tiso_ex(j)=Tamb
end do
goto 200
endif
do 20 j=1,k

```

*****Calcul des coefficients de transfert*****

```

Hrvit_ciel(j)=epsi_vit*Sigma*(Tciel+Tvit_ex(j))*(Tciel**2+
&Tvit_ex(j)**2)
Hrvit_abs(j)=Sigma*(Tvit_in(j)+Tabs(j))*(Tvit_in(j)**2+Tabs(j)**2)
&/((1-epsi_vit)/epsi_vit+1+(1-epsi_abs)/epsi_abs)
Hrabs_vit(j)=Sigma*(Tabs(j)+Tiso_in(j))*(Tabs(j)**2+Tiso_in(j)**2)
&/((1-epsi_abs)/epsi_abs+1+(1-epsi_iso)/epsi_iso)
Hriso_sol(j)=epsi_iso*Sigma*(Tiso_ex(j)+Tamb)*(Tiso_ex(j)**2+
&Tamb**2)
Visdyn_air(j)=1.458*sqrt(Tair_cap(j))/(1+110.4/Tair_cap(j))*10.**
&(-6)

```

$$\text{Prnd}(j)=\text{Visdyn_air}(j)*\text{CP_air}/\text{cond_air}$$

$$\text{Re}(j)=\text{Uamb}*dh*\text{Rho_air}/\text{Visdyn_air}(j)$$

$$\text{ANU}(j)=0.0196*\text{Re}(j)**0.8*\text{Prnd}(j)**0.3$$

$$\text{Hair_abs}(j)=\text{ANU}(j)*\text{cond_air}/dh$$

*****Calcul des coefficients des équations*****

$$c11=(\text{Rho_vit}*\text{EP_vit}*\text{CP_vit}/\text{Dt})+\text{Hrvit_ciel}(j)+\text{Hamb_vit}+\text{Hcond_vit}$$

$$c12=-\text{Hcond_vit}$$

$$c13=0.$$

$$c14=0.$$

$$c15=0.$$

$$c16=0.$$

$$d1=pv+(\text{Hrvit_ciel}(j)*\text{Tciel})+(\text{Hamb_vit}*\text{Tamb})+\text{Rho_vit}*\text{EP_vit}*\text{CP_vit}*\text{Tvit_ex}(j)/\text{Dt}$$

$$c21=c12$$

$$c22=\text{Rho_vit}*\text{EP_vit}*\text{CP_vit}/\text{Dt}+\text{Hcond_vit}+\text{Hrvit_abs}(j)+\text{Hcond_vit_abs}$$

$$c23=-(\text{Hrvit_abs}(j)+\text{Hcond_vit_abs})$$

$$c24=0.$$

$$c25=0.$$

$$c26=0.$$

$$d2=\text{Rho_vit}*\text{EP_vit}*\text{CP_vit}*\text{Tvit_in}(j)/\text{Dt}$$

$$c31=0.$$

$$c32=c23$$

$$c33=\text{Rho_ab}*\text{CP_ab}*\text{EP_abs}/\text{Dt}+\text{Hrvit_abs}(j)+\text{Hcond_vit_abs}+\text{Hair_abs}(j)+\text{Hrabs_vit}(j)$$

$$c34=-\text{Hrabs_vit}(j)$$

$$c35=0.$$

$$c36=0.$$

$$d3=pn+\text{Hair_abs}(j)*\text{Tair_cap}(j)+\text{Rho_ab}*\text{EP_abs}*\text{CP_ab}*\text{Tabs}(j)/\text{Dt}$$

$$c41=0.$$

$$c42=0.$$

$$c43=c34$$

$$c44=\text{Rho_iso}*\text{EP_isoc}*\text{CP_iso}/\text{Dt}+\text{Hrabs_vit}(j)+\text{Hair_abs}(j)+\text{Hcond_iso}$$

$$c45=-\text{Hcond_iso}$$

```

c46=0.
d4=Hair_abs(j)*Tair_cap(j)+Rho_iso*EP_isoc*CP_iso/Dt*Tiso_in(j)
c51=0.
c52=0.
c53=0.
c54=c45
c55=Rho_iso*EP_isoc*CP_iso/Dt+Hcond_iso+Hriso_sol(j)+Hamb_vit
c56=0.
d5=Hriso_sol(j)*Tsol+Hamb_vit*Tamb+Rho_iso*EP_isoc*CP_iso/Dt*
&Tiso_ex(j)
c61=0.
c62=0.
c63=-Hair_abs(j)*Dx
c64=c63
c65=0.
c66=Rho_air*Uamb*EP_air*CP_air
d6=(c66+2*c63)*Tair_cap(j)
*****Gauss-Seidel method*****
30 TTvit_ex(j)=(d1-(c12*Tvit_in(j))-(c13*Tabs(j))-(c14*Tiso_in(j))-
&(c15*Tiso_ex(j))-(c16*Tair_cap(j)))/c11
    TTvit_in(j)=(d2-c21*TTvit_ex(j)-c23*Tabs(j)-c24*Tiso_in(j)-c25*
&Tiso_ex(j)-c26*Tair_cap(j))/c22
    TTabs(j)=(d3-c31*TTvit_ex(j)-c32*TTvit_in(j)-c34*Tiso_in(j)-c35*
&Tiso_ex(j)-c36*Tair_cap(j))/c33
    TTiso_in(j)=(d4-c41*TTvit_ex(j)-c42*TTvit_in(j)-c43*TTabs(j)-c45*
&Tiso_ex(j)-c46*Tair_cap(j))/c44
    TTiso_ex(j)=(d5-c51*TTvit_ex(j)-c52*TTvit_in(j)-c53*TTabs(j)-c54*
&TTiso_in(j)-c56*Tair_cap(j))/c55
    TTair(j)=(d6-c61*TTvit_ex(j)-c62*TTvit_in(j)-c63*TTabs(j)-c64*
&TTiso_in(j)-c65*TTiso_ex(j))/c66
    print *, 'TTair=',TTair(j)
IF((abs(TTvit_ex(j)-Tvit_ex(j)).LE.10.**(-10)).and.
& (abs(TTvit_in(j)-Tvit_in(j)).LE.10.**(-10)).and.

```

```

& (abs(TTabs(j)-Tabs(j)).LE.10.**(-10)).and.
& (abs(TTiso_in(j)-Tiso_in(j)).LE.10.**(-10)).and.
& (abs(TTiso_ex(j)-Tiso_ex(j)).LE.10.**(-10)).and.
& (abs(TTair(j)-Tair_cap(j)).LE.10.**(-10))) THEN
  Tvit_ex(j)=TTvit_ex(j)
  Tvit_in(j)=TTvit_in(j)
  Tabs(j)=TTabs(j)
  Tiso_in(j)=TTiso_in(j)
  Tiso_ex(j)=TTiso_ex(j)
  Tair_cap(j)=TTair(j)
else
  Tvit_ex(j)=TTvit_ex(j)
  Tvit_in(j)=TTvit_in(j)
  Tabs(j)=TTabs(j)
  Tiso_in(j)=TTiso_in(j)
  Tiso_ex(j)=TTiso_ex(j)
  Tair_cap(j)=TTair(j)
goto 30
  endif
  write(34,16)j,TEMPS,(Tamb-273.15),(Tair_cap(K)-273.15),Pui_dif,
&Pui_dir
16  format(I2,4x,F8.0,4x,f9.5,4x,f9.5,4x,f9.5,4x,f9.5)
20  continue
200 Return
  End

```

*******subroutine enceinte se séchage*******

Subroutine enceinte_sechage(TEMPS)

common/parametres experimentaux/TEMPS_IN,TEMPS_FINAL,Dt

common/geom/ALong_cap,K

common/caract air/Uamb,Wair0,DEBITM_air

common/caract produit/AM_prsec,X_pr_in,X0,EP_pr

common/caract sechoir/ALong,ALarg,haut,N,EP_pi,Rho_pi,Cond_pi,


```

&EP_iso,Cond_iso,CP_pi
  common/caract courbe de sechage/Tair_sec,Tair_hum,ALPHA,BETA
  common/temperature/Tamb,Tair_cap(900),Ray
  common/Temperature enceinte/Tair(900),Tpi(900),Wair(900),HRair(900
&),X_pr(900),X_eq(900),VSECH(900),Tair1,Tair2,Tair3,Weq,Teq,Heq,
&Tair_h(900),Wsath(900),j
  dimension TpiN(900),Cond_air(900),Hair_pi(900)
  dimension Prnd_pi(900),Re_pi(900),Visdyn_air(900),ANU_pi(900),
&P_evap(900),A_Lv(900),Rho_air(900),CP_air(900),Pvsat(900),Cv(900)
&,Visdyn_airs(900),Visdyn_vap(900),AV(900),AV1(900),Uair(900),
&Psath(900)
  dimension X_prN(900),X_red(900),VSECH_RED(900),AM_RED(900)
  Write(*,10)
10 Format(15X,'La temperature ambiante')
  read(31,*) Tamb
  write(*,*) 'Tamb(',TEMPS,') =', Tamb
  Write(*,10)
10 Format(15X,'La temperature de séchage')
  read(31,*) Tair_cap(k)
  write(*,*) 'Tair_cap(k)(',TEMPS,') =', Tair_cap(k)
  open(35,file='c:\touati\ray_solg160606.dat')
  Write(*,101)
101 Format(15X,'Le rayonnement solaire')
  read(35,*) Ray
  write(*,*) 'Ray(',TEMPS,') =', Ray
  Tair_cap(k)=Tamb+(0.7*Ray/(1006*DEBITM_air-4.5))
c La température de l'air à l'entrée de la soufflerie
  Tair_sec=Tair_cap(K)
c La pression atmosphérique:
  P=1.
c La teneur en eau initiale des feuilles de menthe
  X0=4.64
c La précision des calculs

```

EPSILON=0.0001

c La température ambiante

c Tamb=298.15

c Le pas d'espace entre deux claies

DZ=0.1

c La surface d'une seule chambre de séchage

SURF_chamsech=DZ*ALarg

c La surface du séchoir

SURF_sechoir=ALong*ALarg

*****Entrée des conditions initiales*****

if (TEMPS.EQ.TEMPS_in) then

do j=1,N

Wair(j)=Wair0

X_pr(j)=X_pr_in

enddo

endif

*****Entrée des conditions aux limites*****

Tair(1)=Tair_cap(k)

Teq=Tair_cap(k)

Wair(1)=Wair0

Weq=Wair0

Pvsat(1)=10**((2.7877+((7.625*(Tair(1)-273.15))/(241.6+(Tair(1)-
&273.15))))))

HRair(1)=(Wair(1)*P*101235)/(Pvsat(1)*(Wair(1)+0.622))

HReq=HRair(1)

Do j=1,N

Tair2=500.

do while (abs(Teq-Tair2).GT.EPSILON)

*****Calcul des propriétés physique de l'air*****

Tair2=Teq

Pvsat(j)=10**((2.7877+((7.625*(Teq-273.15))/(241.6+(Teq-273.15))))))

```

Cv(j)=Weq/(1+Weq)
Rho_air(j)=(352.99*P/Teq)*(1-(0.378*Cv(j)/0.622+0.378*Cv(j)))
Visdyn_air(j)=(2.095E-5+8.191E-6*cos(0.0137*Teq+3.078))/
&Rho_air(j)
Cond_air(j)=0.0243+7.3677249E-5*(Teq-273.15)+9.5486111E-8*
&(Teq-273.15)**2-2.025463E-9*(Teq-273.15)**3+1.3020833E-11
&*(Teq-273.15)**4
CP_air(j)=1005.928+0.001*(Teq-273.15)+0.0006*(Teq-273.15)**2
Uair(j)=(DEBITM_air/Rho_air(j))*ALong*ALarg
*****Calcul de la vitesse de séchage*****
CALL temperature_humide(Tair_humide,CPair,A_Lvap,Weq,Teq)
Tair_h(j)=Tair_humide
A_Lv(j)=A_Lvap
CP_air(j)=CPair
VSECHIN=ALPHA*(Teq-Tair_h(j))*Uair(j)**BETA
X_eq(j)=0.021+0.0058*HReq-1E-4*HReq**2+1E-6*HReq**3
X_red(j)=(X_pr(j)-X_eq(j))/(X0-X_eq(j))
VSECH_RED(j)=1.436*X_red(j)-2.0274*X_red(j)**2+1.8302*X_red(j)**3
VSECH(j)=VSECHIN*VSECH_RED(j)
X_prN(j)=-(Dt/3600)*VSECHIN*VSECH_RED(j)+X_pr(j)
*****Calcul de la puissance d'évaporation*****
AM_RED(j)=AM_prsec*(X_pr(j)-X_prN(j))/Dt
P_evap(j)=A_Lv(j)*AM_RED(j)
*****Calcul de la température et humidité de l'air de séchage*****
if (j.EQ.1) then
Tair(1)=Tair_cap(k)-(P_evap(1)/(DEBITM_air*CP_air(1)))
Wair(1)=Wair0+(AM_prsec/DEBITM_air)*((X_pr(1)-X_prN(1))/Dt)
else
Tair(j)=Tair(j-1)-(P_evap(j)/(DEBITM_air*CP_air(j)))
Wair(j)=Wair(j-1)+(AM_prsec/DEBITM_air)*((X_pr(j)-X_prN(j))/Dt)
endif
HRair(j)=P*101235*Wair(j)/(Pvsat(j)*(0.622+Wair(j)))
*****

```

```

      HReq=HRair(j)
      Teq=Tair(j)
      Weq=Wair(j)
      ENDDO
      write(33,15)j,TEMPS,X_eq(j),VSECH(j),X_pr(j),Wair(j),HRair(j),
&Tair_cap(k),Tair(j),Tair_h(j)
15  format(I2,4x,F8.0,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,
&f9.5,4x,f9.5,4x,f9.5)
      write(34,16)j,TEMPS,(Tamb-273.15),(Tair_cap(k)-273.15)
16  format(I2,4x,F8.0,4x,f9.5,4x,f9.5,4x,f9.5,4x,f9.5)
      X_pr(j)=X_prN(j)
      HReq=HRair(j)
      Teq=Tair(j)
      Weq=Wair(j)
      ENDDO
      Return
      End
*****
*****subroutine resultats*****
subroutine resultat(TEMPS)
  common/temperature/Tamb,Tair_cap(900)
  common/puissance/Pui_dif,Pui_dir
  common/Temperature enceinte/Tair(900),Tpi(900),Wair(900),HRair(900
&),X_pr(900),X_eq(900),VSECH(900),Tair_h(900),j
  common/geom/ALong_cap,K
  common/caract sechoir/ALong,ALarg,haut,N,EP_pi,Rho_pi,Cond_pi,
&EP_iso,Cond_iso,CP_pi
  dimension X_prN(900),X_red(900),VSECH_RED(900),AM_RED(900)
  do j=1,N
    write(33,15)j,TEMPS,X_eq(j),VSECH(j),X_pr(j),Wair(j),HRair(j),
&Tair(j),Tair_h(j)
15  format(I2,4x,F8.0,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,f7.5,4x,
&f9.5,4x,f9.5)

```

```
write(33,*)j,TEMPS,Tair(j),Wair(j),HRair(j),X_pr(900)
end do
return
end
```

A4.1 LES PARAMETRES INTERVENANTS DE MANIERE SIGNIFICATIVE DANS LE PROGRAMME (SECHAGE)

C:\touati\nomfichD

C:\touati\nomfichRE

C:\touati\nomfichRC

PARAMETRES EXPERIMENTAUX

t_i TEMPS_IN en (s): Heure de début d'expérience

t_f TEMPS_FINAL en (s): Heure de la fin de l'expérience

dt Pas de temps en (s)

CARACTERISTIQUES DE L'AIR

1.5 U_{amb} en (m/s): La vitesse du vent

0.0168 W_{air0} en (g/kg): Teneur en eau de l'air

0.1481 $DEBITM_{air}$ en (kg/s): Débit d'air asséchant

CARACTERISTIQUE DU PRODUIT

4.2 AM_{prsec} (en kg): Masse menthe sèche par claie

4.64 X_{pr_in} en (kg eau/kg ms): La teneur en eau initiale du produit

4.64 X_0 en (kg eau/kg ms): La teneur en eau du produit

5E-4 EP_{pr} en (m): Epaisseur d'une feuille de menthe

CARACTERISTIQUES DU SECHOIR

0.9 Long en (m): La longueur de l'enceinte de séchage

0.5 Larg en (m): La largeur de l'enceinte de séchage

1.4 Haut en (m): La hauteur de l'enceinte de séchage

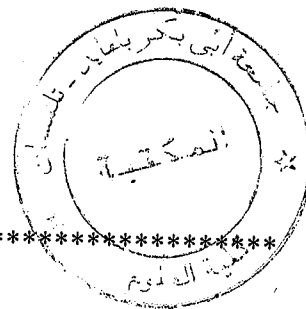
10. N: Nombre de claies

4E-3 EP_{pi} en (m): Epaisseur de paroi

8055 Rho_{pi} en (kg/m³): Masse volumique de la paroi

480 CP_{pi} en (J/kg°K): Capacité calorifique de la paroi

0.024 $Cond_{pi}$ en (W/m°K): Conductivité thermique de la paroi



- 5E-2 EP_iso en (m): Epaisseur de l'isolation
 0.028 Cond_iso en (W/m^{°K}): Conductivité thermique de l'isolation

CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE SECHAGE

- 323.15 Tair_sec en (°C): La température de l'air dans la soufflerie
 303.15 Tair_hum en (°C): La température humide de l'air dans la soufflerie
 0.816 ALPHA (sd): La constante de la vitesse de séchage initiale
 0.475 BETA (sd): La constante de la vitesse de séchage initiale

CARACTERISTIQUES DU CAPTEUR SOLAIRE

- 0.025 EP_air en (m): Epaisseur de la lame d'air statique
 0.01 EP_vit en (m): Epaisseur du vitrage
 0.001 EP_abs en (m): Epaisseur de l'absorbeur
 0.05 EP_isoc en (m): Epaisseur de l'isolation
 2210 Rho_vit en (kg/m³): Masse volumique du vitrage
 2707 Rho_ab en (kg/m³): Masse volumique de l'absorbeur
 16. Rho_iso en (kg/m³): Masse volumique de l'isolation
 1.1 Rho_air en (kg/m³): Masse volumique de l'air
 750 CP_vit en (J/kg^{°K}): Capacité calorifique du vitrage
 896 CP_ab en (J/kg^{°K}): Capacité calorifique de l'absorbeur
 1670 CP_iso en (J/kg^{°K}): Capacité calorifique de l'isolation
 1006 CP_air en (J/kg^{°K}): Capacité calorifique de l'air
 5.67E-8 Sigma (sd): Cste de stephan-Boltzmann
 0.9 epsi_vit : Emissivité du vitrage
 0.96 epsi_abs : Emissivité de l'absorbeur
 0.04 epsi_iso : Emissivité de l'isolation
 1.3 Cond_vit en (W/m^{°K}): Conductivité thermique du vitrage
 204 Cond_isoc en (W/m^{°K}): Conductivité thermique de l'isolation
 0.026 Cond_air en (W/m^{°K}): Conductivité thermique de l'air
 0.95 alfa_n
 0.88 a
 0.26 b
 31.37 alati0 en degrés: Latitude du lieu

10 beta0
1367 ai0
167 d (sd): le numéro de jour dans l'année
0.2 al (sd): albédo
1 an1
1.5 an2
10 ak
60 teta0
1 ALarg_cap
2 ALong_cap
11 K

Étude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*)

Résumé : Les plantes médicinales et aromatiques et en particulier les feuilles de la menthe verte ont beaucoup d'importance pour la pharmacopée, la parfumerie, la confiserie et la liquoristerie. Ce travail entre dans le cadre de la valorisation de cette plante produite en grande quantité dans le sud et le sud-ouest algérien. Il s'agit d'étudier le séchage de cette plante et de développer l'utilisation de l'énergie pour sécher la *Mentha viridis*.

Afin de développer un code de calcul permettant de simuler le séchage solaire en convection forcée de cette plante, une détermination expérimentale des isothermes de sorption a été menée à l'aide de la méthode des solutions de sels saturés. Les courbes de sorption ainsi obtenues sont ensuite approchées par des modèles empiriques et semi-empiriques utilisables dans un modèle numérique d'un séchoir.

Une autre étude expérimentale est consacrée à la détermination des cinétiques de séchage dans des conditions contrôlables ainsi que dans un séchoir solaire. Les courbes de perte de masse et l'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant sont étudiées dans le but de déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS), et par conséquent la corrélation empirique exprimant la vitesse de séchage de la menthe verte étudiée.

Par la suite les deux corrélations ainsi obtenues sont introduites dans un programme écrit en Fortran afin de valider les résultats expérimentaux de la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps pour les modes de séchage et d'étudier l'influence de la température, du débit, de l'hygrométrie de l'air asséchant et de la masse initiale des feuilles de menthe.

Afin de dimensionner notre séchoir une étude paramétrique basée sur la technique des plans d'expérience est menée.

Le modèle développé dans ce travail permettra de dimensionner un séchoir et d'étudier son fonctionnement dans le cas d'utilisation avec un capteur solaire afin de définir les conditions optimales de séchage.

Mots clés: Menthe verte – Isothermes de sorption – Cinétiques de Séchage convectif – Séchoir solaire – Expérimentation – Modélisation – plan d'expérience.

Theoretical and experimental study of solar drying of the green mint leaves (*Mentha viridis*)

Medicinal and aromatic plants and particularly green mint leaves have a great importance for chemistry perfuming, confisery and liquoristry. The present work deals with the vaporisation of this plant produced in great quantities in the south and south west of Algeria. It is a study of the drying of this plant and to develop the energy use to dry the *Mentha viridis*.

In order to develop a calculating code that permits to simulate solar drying in a forced convection of this plant, an experimental determination of sorption isotherms has been led with the help of the solutions method of state salts. Sorption curves thus obtained are then approached by empiric and semi empiric models used in a numerical model of drying.

Another experimental study is devoted to the drying kinetic determination in the controlled conditions and in a solar drying. The mass loss curves and the influence of the temperature and seed dried air are studied to determine drying characteristic curve (D.C.C.), and therefore the empiric correlation expressing the speed of drying of the studied green mint.

After that the two obtained correlations are introduced in a program written in FORTRAN so as to validate the experimental results of moisture content and the drying speed in terms of time for drying modes and to study the temperature, the debit, the hygrometry drying air influence and of the initial mass of the mint leaves.

In order to dimension our drying, a parametric study based on the experience plans technique is led.

The model developed in this work will permit to dimension a drier and to study its functioning in case it is used with a solar collector in order to define the optimal drying conditions.

Keywords : Green mint – Sorption Isotherms – Convective drying Kinetics – Solar drying – Experimentation – Modelisation – Experiment plan.