

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté de technologie

Département de mécanique

THESE DE DOCTORAT

En Mécanique

Spécialité : Energétique

Modélisation et Expérimentation d'un Système de Séchage Solaire en
Régime Transitoire : Prise en Charge de la Déformation du Produit

Par

Nour-Eddine BENAOUA

Devant le jury composé de :

B.BOUMEDDANE	Professeur, U. de Blida	Président
A.HAMID	Professeur, U. de Blida	Examineur
D.SEMMAR	Professeur, U. de Blida	Examineur
N.YASSAA	Professeur, U.S.T.H.B / C.D.E.R, Alger	Examineur
A.KHELLAF	Directeur de recherche, C.D.E.R., Alger	Directeur de thèse
B.ZEGHMATI	Professeur, U. Perpignan. France	Co-directeur

Blida, Juin 2019

DÉDICACES**À***La mémoire de ma défunte mère,**Mon père**Mon épouse**Mes enfants et à le tout petit garçon ADÈM*

RESUMÉ

Ce travail concerne une étude expérimentale et numérique d'un séchoir modulaire à chauffage partiellement solaire fonctionnant en convection forcée. Ce séchoir est composé d'insolateurs plan à air, d'un dispositif de chauffage auxiliaire et d'une armoire de séchage. Nous appliquons la méthode nodale pour établir les équations qui régissent les transferts dans l'insolateur et l'armoire de séchage. Ces équations sont résolues par un schéma implicite aux différences finies et la méthode "Diabolo-Sablier". Un code de calcul a été élaboré en FORTRAN pour simuler le comportement dynamique du séchoir modulaire à chauffage partiellement solaire. Nous avons déterminé, pour une durée du séchage égale à celle de la durée de l'ensoleillement, les conditions optimales du fonctionnement du séchoir pour feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*). Les données météorologiques et radiométriques, basées sur la notion de journée type, utilisées dans nos simulations, sont celles de Bouzaréah, Alger (Algérie). Les expressions de la vitesse de séchage, de la courbe caractéristique de séchage et du coefficient de diffusion effective ont été déduites de mesures de la perte de poids des feuilles de menthe au cours du séchage en fonction de la vitesse et de la température de l'air asséchant. L'effet de conditions de séchage sur le retrait de feuilles de menthe a été étudié. L'analyse technico-économique a conduit à la détermination du coût de l'investissement nécessaire, au coût de fonctionnement et au temps de retour sur investissement du séchoir modulaire pour feuilles de menthe. Les conditions optimales de séchage ont conduit à l'élaboration d'une méthode simple de dimensionnement du système de séchage. Cette méthode est basée sur des corrélations exprimant le taux de couverture solaire et la fraction d'énergie économisée sous la forme de polynômes d'un paramètre adimensionnel défini par le rapport entre la moyenne journalière du besoin énergétique pour le séchage et la moyenne journalière du flux solaire capté par les insolateurs.

Mots clés : séchoir solaire, modélisation, simulation, dimensionnement, plantes aromatiques et médicinales, insolateur, économique, couverture solaire, retrait.

ABSTRACT

This work concerns an experimental and numerical study of a partial solar heated modular polyvalent dryer which functions by forced convection. The drying is composed of an air flat plate collector, an auxiliary heater and a drying cabinet. We apply the nodal method to establish the formulations of the governing equations of the heat and mass transfer in collector and the drying cabinet. These equations are solved with an implicit finite difference scheme and the DIABOLO - SABLIER method. A computer code is developed in FORTRAN to simulate the dynamic behavior of drying system. We determined, for a drying time equal to the duration of the sunshine, optimum operating conditions for the dryer system of mint leaves (*MENTHA SPICATA*). Meteorological and radiometric data, based on the notion of the typical day, used in our simulations are those of Bouzaréah, Algiers (Algeria). The expression of the drying rate, Drying characteristics & kinetics and effective diffusion coefficient are derived using measurements according to the drying air velocity and air drying temperature. The effects of drying conditions on shrinkage of leaves mint were studied. The purpose of the techno-economic analysis is to determine the investment required the cost of operation and return on investment for the modular dryer of mint leaves. The optimum drying conditions are used to develop a simple design method of drying system. This method is based on correlations expressing the solar fraction and the fraction of energy economized in the form of polynomials of a dimensionless parameter defined by the ratio between the average daily requirement energy for drying and the average daily solar flux received by the solar collectors.

Keywords: solar dryers, design, medicinal and aromatic plants, collector, economic, solar fraction, shrinkage.

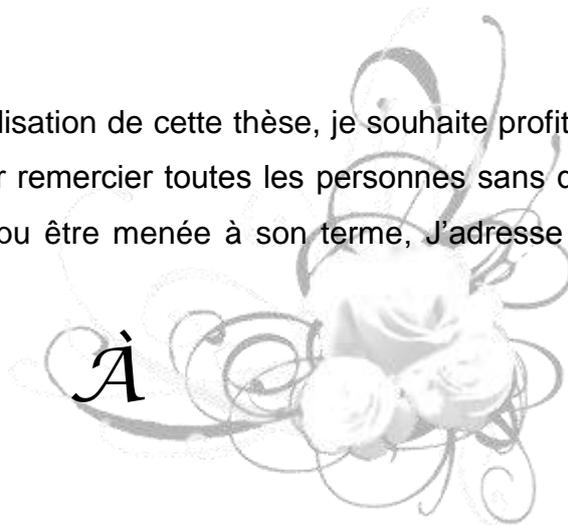
الخلاصة

يتعلق هذا العمل بدراسة عددية و تجريبه لمجفف شمسي يعمل عن طريق تسخين الهواء بالحمل الحراري القسري وغير مباشر الذي يتكون من مجمع حراري سخان المساعدة ومقصورة للتجفيف. قمنا بتطبيق طريقة التحليل ألعدي لإنشاء نموذج رياضي يعتمد على مجموعة من معدلات نقل الحرارة و الكتلة للمجمع الشمسي و مقصورة التجفيف. تم حل أنظمة المعادلات بطريقة الفروق المحدودة و الضمنية و نظام الحلول الحسابية DIABOLO- SABLIER. تم تطوير برنامج محاكاة بلغة الفر وتران للتنبؤ بالأداء للمجفف الشمسي و تحديد ظروف التشغيل المثلى لتجفيف لأوراق النعناع (النعناع المدبب) معتبرين أن مدة عملية التجفيف هي مساوية لمدة سطوع الشمس. استعملنا في الحسابات العددية معادلات سرعة ألتجفيف المنحنيات المميزة للتجفيف معامل الانتشار الفعال و طاقة التنشيط التي قد تم استخراجها من عدة تجارب لتجفيف أوراق النعناع (النعناع المدبب) على مختلف معدلات تدفق الهواء درجة حرارة هواء التجفيف، تمت أيضا دراسة تأثير ظروف التجفيف على انكماش أوراق النعناع. بيانات الأرصاد الجوية و الإشعاع الشمسي تعتمد على فكرة اليوم النموذجي المستخدمة في المحاكاة لمناخ بوزريعة، الجزائر. وكذا أخذنا بعين الاعتبار الجوانب الاقتصادية من أجل دراسة الجدوى الاقتصادية والفنية للنظام التجفيف. و وضع طريقة تصميم بسيط من خلال دراسة وسيطين لا بعدين و هما نسبة التغطية الشمسية و نسبة الطاقة المقتصدة بدلالة وسيط يمثل النسبة بين متوسط الاحتياجات اليومية من طاقة التجفيف ومتوسط الإشعاع الشمسي اليومي التي تلقاها المجمع الحراري و نتج عن هذا عدة ارتباطات حسابية مستمدة من خلال نتائج المحاكاة.

الكلمات المفتاحية : المجففات الشمسية، ألتصميم النباتات الطبية والعطرية، مجمع حراري الدراسة الاقتصادية، نسبة التغطية الشمسية، الانكماش.

REMERCIEMENTS

Au terme de la période de réalisation de cette thèse, je souhaite profiter de l'opportunité qui m'est offerte ici pour remercier toutes les personnes sans qui ce manuscrit n'aurait certainement pas pu être menée à son terme, J'adresse donc des remerciements particuliers:



- ❖ ZEGHMATI Belkacem, Professeur des Universités, Université de Perpignan, France, qui m'a accueilli au sein de son équipe de recherche du Laboratoire de Mathématiques et Physique (LA.M.P.S.) et a dirigé mes travaux de thèse. Il a su me montrer la voie à suivre et me faire bénéficier du fruit de ses connaissances et de son expérience de la recherche tout en m'accordant une grande liberté de travail.
- ❖ Mon encadrant KHELLAF Abdellah, Directeur de recherche, C.D.E.R, Alger pour les riches discussions que nous avons eues. Il m'a donné la confiance et la liberté d'approfondir chacune de mes idées ainsi de m'épanouir pleinement dans mon travail de recherche.
- ❖ KOUHILA Mohammed, Professeur des Universités, E.N.S. Marrakech, Maroc, pour m'avoir accueilli de son laboratoire et de m'avoir aidé à mener à bien l'étude expérimentale de ma thèse, je lui en suis très reconnaissant.
- ❖ Yassa Nour-Eddine, Professeur des Universités, U.S.T.H.B/CDER, Alger pour son soutien constant.
- ❖ BOUMEDDANE Boussaad, Professeur des Universités, U. de Blida, pour avoir accepté d'être président de mon jury.
- ❖ BENKHEDDA Younes, Professeur des Universités, U. de Blida pour son soutien permanent.
- ❖ TEMMAR Mustapha, chef de département de génie Mécanique pour son soutien afin de finaliser ce travail.
- ❖ SEMMAR Djafer et Hamid Abdelkader, U. de Blida, d'avoir accepté d'être les examinateurs de ma thèse, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

- ❖ YAICHE et Abdellah BOUHANIK, C.D.E.R, Alger, pour l'acquisition des mesures radiométriques et météorologiques de Bouzaréah.
- ❖ LALAOUI Mohammed, BOUSSA Zoubir et HAMANE Mustafa, C.D.E.R, Alger. Ils ont répondu présents à toutes mes sollicitations concernant la mise au point des instruments de mesure.
- ❖ L'équipe de la division base température du CDER, pour ses encouragements surtout Khelifa SALHI, Sofiane BOUAICHAOUI et Salahedine BENSALÉM.
- ❖ J'ai eu l'insigne honneur de bénéficier des conseils et encouragements de : Pr. Naji ABDENOURI. FST Guélie, Maroc, Pr. Nabil KECHAOU, ENIS, Sfax (Tunisie), Pr. Angélique Léonard, Université de Liège (Belgique), Dr. Lyes BENNAMOUN, Faculté d'engineering, université de New Brunswick (Canada), Xavier CHESNEAU, MCF-HDR, Stéphane ABIDE, MCF, et Bachir OUARI, Pr. et membre du LA.M.P.S.
- ❖ Toutes les personnes qui, par leurs aides et leurs encouragements, m'ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

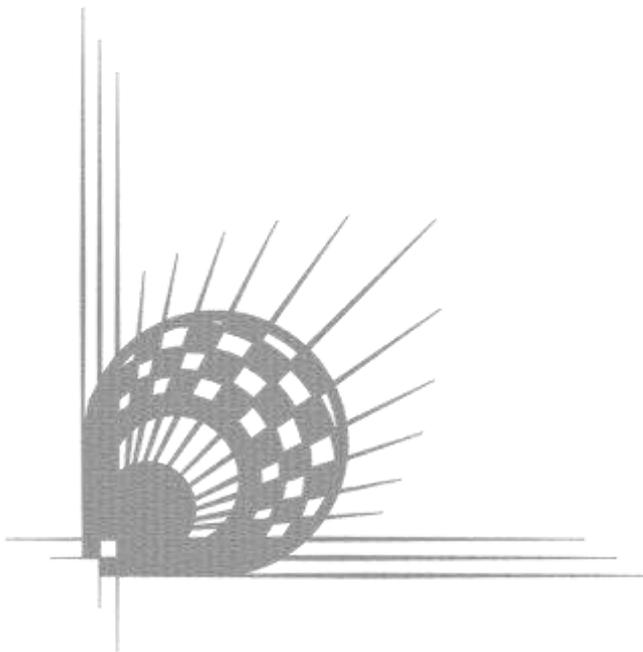


TABLE DES MATIERES

RESUME	3
REMERCIEMENTS	6
TABLE DES MATIERES	8
LISTE DES FIGURES, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	12
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	18
INTRODUCTION GENERALE	22
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART	
1.1. Introduction	24
1.2. Rappels sur les mécanismes du séchage	24
1.2.1. Notions fondamentales	24
1.2.1.1 Phases de séchages	25
1.2.1.2 Isothermes de sorption.....	26
1.2.1.3 Phénomène de Retrait (séchage)	27
1.2.2. Procédés de séchage	29
1.2.3. Séchage traditionnel	29
1.2.4. Séchoirs solaires	30
1.2.4.1 Séchoirs solaires directs	30
1.2.4.2 Séchoirs solaires indirects	30
1.2.4.3 Séchoirs solaires Mixtes	30
1.2.4.4 Séchoirs hybrides	31
1.3. Insolateurs plan à air	32
1.3.1. Couverture transparente	32
1.3.2. Absorbeur	33
1.3.3. Isolation	33
1.4. Rappels bibliographiques.....	35
1.5. Analyse technico-économique et dimensionnement des systèmes de séchage	37
1.6. Principaux modèles de séchage	39
1.6.1. Les modèles distribués	39
1.6.2. Les modèles de séchage en couches minces	41
1.7. Conclusion	42
CHAPITRE 2: MODELISATION DU SYSTEME DE SECHAGE	
2.1. Introduction	43
2.2. Description	43
2.3. Principe de fonctionnement	44
2.4. Modélisation	44
2.4.1 Hypothèses générales	44
2.4.2 Méthodologie	45
2.4.3 Equations de transfert	46
2.5. Coefficients de transfert de chaleur	49
2.5.1. Coefficients de transfert de chaleur par conduction	49
2.5.2. Coefficients de transfert de chaleur par convection	49
2.5.3 Coefficients de transfert de chaleur par rayonnement	51
2.6. Paramètres mis en jeu dans le fonctionnement du système de séchage	52

2.6.1. Insolateur	52
2.6.2. Armoire de séchage	53
2.7. Rendements	54
2.8. Autres grandeurs caractéristiques du fonctionnement du séchoir.....	55
2.9. Discrétisation des équations	55
2.10. Méthodologie numérique	58
2.11. Conclusion.....	58
CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE	
3.1. Introduction	59
3.2. Menthe	59
3.3. Etude hygroscopique des feuilles de menthe	60
3.3.1. Matériel	60
3.3.2. Mode opératoire	61
3.3.3. Préparation des échantillons	61
3.3.4. Protocole expérimental	62
3.3.5. Précision sur les mesures effectuées	62
3.4. Résultats expérimentaux	63
3.4.1. Phénomène d'hystérésis	64
3.4.2. Conditions optimales de conservation des feuilles de menthe.	65
3.5. Modélisation des isothermes de sorption	66
3.6. Propriétés thermodynamiques	69
3.6.1. Chaleur isostérique	69
3.6.2. Entropie différentielle de sorption	70
3.6.3. Théorie de compensation	70
3.7. Influence du retrait durant le séchage	72
3.7.1. Préparation des échantillons	72
3.7.2. Etude expérimentale	73
3.7.3. Protocole expérimental	74
3.7.4. Paramètres mesurés et photos	75
3.7.5. Modélisation du retrait	76
3.8. Résultats et discussion	77
3.8.1. Cinétiques de séchage	78
3.8.2. Influence de la température de l'air asséchant	81
3.8.3. Influence du débit d'air asséchant	83
3.8.4. Courbe caractéristique de séchage	84
3.8.5. Lissage des courbes de séchage	85
3.8.6. Rétrécissement pendant le séchage	88
3.8.7. Modèle de retrait de feuille de menthe	92
3.8.8. Détermination du coefficient de diffusion	94
3.8.9. Énergie d'activation	96
3.9. Conclusion	97
CHAPITRE 4: RESULTATS DE LA MODELISATION/SIMULATION DU SYSTEME DE SECHAGE	
4.1. Introduction	98
4.2. Conditions météorologiques	98
4.2.1. Flux solaire global	99
4.2.2. Température de l'air	100
4.2.3. Humidité relative de l'air	100
4.2.4. Vitesse du vent	100

4.3. Démarches et outils de simulation	101
4.4. Résultats et discussions	103
4.4.1. Durée de séchage	103
4.4.2. Rendements de l'insolateur	105
4.4.3. Rendement de séchage	105
4.4.4. Couverture solaire	107
4.5. Conclusion	111
CHAPITRE 5 : ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DU SYSTEME DE SÉCHAGE & ETABLISSEMENT D'ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE SECHAGE	
5.1. Introduction	112
5.2. Notions d'économie	112
5.2.1. Valeur temps de l'argent	112
5.2.2. Description de la méthode d'analyse de cycle de vie	113
5.3. Analyse des coûts du système de séchage solaire	114
5.3.1. Coût d'investissement	114
5.3.2. Coût de fonctionnement	116
5.3.3. Coût global du système	117
5.3.4. Economie réalisée	118
5.3.5. Coût de la recette global	118
5.3.6. Flux financier net (Bénéfice)	118
5.3.7. Coût du séchage	119
5.4. Paramètres économiques adimensionnels	119
5.5. Méthodologie	119
5.6. Résultats et discussion	121
5.6.1. Période d'amortissement	121
5.6.2. Flux financier net	123
5.6.3. Durée d'utilisation	123
5.7. Abaques de dimensionnement	124
5.7.1. Méthode	124
5.7.2. Méthodologie numérique	125
5.7.3. Résultats	126
5.7.3.1. Débit d'air asséchant optimum	126
5.7.3.2. Couverture solaire	127
5.7.3.3. Fraction de chaleur économisée	128
5.8. Conclusion	130
CONCLUSION GENERALE	132
ANNEXE	
A. Séchoirs solaires	135
B. Propriétés de l'air humide	138
C. Cinétiques de séchage	142
D. Grandeurs hygrométriques	148
E. Isothermes de sorption	150
F. Modélisation du comportement énergétique d'un système de séchage	158
G. Protocol expérimental	162

H. Organigramme de programmation	171
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Représentation schématique des échanges de matière et de chaleur lors du séchage par convection.....	25
Figure 1.2	Complexité du processus de séchage des produits alimentaires	26
Figure 1.3	Présentation de différents types et de mode de fonctionnement de séchoirs solaires	31
Figure 1.4	Différents types d'insolateurs.	34
Figure 1.5	Plaques absorbantes.....	37
Figure 2.1	Représentation schématique du système de séchage	43
Figure 2.2 a,b	Représentation schématique de l'insolateur et des coefficients de transfert	47
Figure 2.3 a,b	Coupe transversale de l'armoire de séchage et présentation des différents coefficients de transfert et disposition de feuilles de menthe	48
Figure 3.1	Photo de feuilles et de fleurs de menthe (MENTHA SPICATA).....	59
Figure 3.2	Dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption	61
Figure 3.3	Bocal d'échantillon.....	61
Figure 3.4a	Isothermes de désorption des feuilles de menthe.....	63
Figure 3.4b	Isothermes d'adsorption des feuilles de menthe.....	63
Figure 3.5	Hystérésis entre les isothermes d'adsorption et de désorption des feuilles de la menthe (MENTHA SPICATA) à 40°C.....	64
Figure 3.6	Courbe montrant l'activité optimale de l'eau de conservation de la menthe (MENTHA SPICATA)	65
Figure 3.7	Isothermes de désorption des feuilles de menthe (MENTHA SPICATA) décrites par cinq modèles de lissage.....	67
Figure 3.8	Isothermes d'adsorption des feuilles de menthe décrites par cinq modèles de lissage	68

Figure 3.9	Chaleur isostérique nette d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau d'équilibre	9 69
Figure 3.10	Entropie différentielle d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau d'équilibre	70
Figure 3.11	Variation de l'enthalpie d'adsorption en fonction de l'entropie de désorption des feuilles de menthe (Théorie de compensation enthalpie/entropie)	71
Figure 3.12	Feuilles de menthe fraîche	72
Figure 3.13	Organigramme des traitements avant séchage.....	73
Figure 3.14	Essais de reproductibilité de la cinétique de séchage des feuilles de menthe Photo d'une feuille de Menthe fraîche et séchée.....	78 79
Figure 3.15		
Figure 3.16	Evolution au cours du temps de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant.....	79
Figure 3.17	Evolution au cours du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant	80
Figure 3.18	Evolution de la vitesse de séchage des feuilles de menthe en fonction de leurs teneurs en eau. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant.	80
Figure 3.19	Evolution, en fonction du temps, de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.....	82
Figure 3.20	Evolution, en fonction du temps, de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. $D_m = 0,070 \text{ kg s}^{-1}$. Influence la température de l'air asséchant.....	82
Figure 3.21	Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.....	83
Figure 3.22	Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage	

	des feuilles de menthe. $D_m = 0,070 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.	83
Figure 3.23	Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. $T_{reg} = 40^\circ\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant.....	84
Figure 3.24	Courbe caractéristique de séchage des feuilles de menthe.....	85
Figure 3.25	Teneur en eau réduite prédite par le modèle Logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite mesurée des feuilles de menthe	87
Figure 3.26	Evolution en fonction du temps de la teneur en eau réduite des feuilles de menthe prédite par le modèle logarithmique. Influence de la température de l'air asséchant.....	88
Figure 3.27	Galerie d'images 2D de feuilles de menthe en fonction du temps de séchage pour différentes températures de l'air asséchant.....	89
Figure 3.28	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.....	89
Figure 3.29	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.....	90
Figure 3.30	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $T_{reg} = 50^\circ\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant.....	91
Figure 3.31	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $T_{reg} = 50^\circ\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant	91
Figure 3.32	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.....	92
Figure 3.33	Evolution en fonction de la teneur en eau réduite	

	expérimentale de la surface réduite ($(A-A_0 / A_0)$ (équation polynômiale caractéristique)	93
Figure 3.34	Evolution au cours du temps du rapport logarithmique des grandeurs mesurées. Influence de la température de l'air asséchant.....	95
Figure 3.35	Evolution en fonction de la température de l'air asséchant du coefficient logarithmique de diffusion effectif	96
Figure 4.1	Evolution horaire du flux solaire direct.....	99
Figure 4.2	Evolution horaire du flux solaire diffus	99
Figure 4.3	Evolution horaire de la température de l'air ambiant.....	100
Figure 4.4	Evolution horaire de l'humidité relative de l'air ambiant ...	101
Figure 4.5	Evolution mensuelle de la vitesse du vent (m/s).	104
Figure 4.6	Evolution de la durée de séchage en fonction du débit massique d'air asséchant.	104
Figure 4.7	Evolution de la durée de séchage en fonction de la masse des feuilles de menthe.	104
Figure 4.8	Evolution de la durée de séchage en fonction de la température de l'air asséchant	105
Figure 4.9	Évolution du rendement de l'insolateur en fonction du débit d'air massique. Influence de l'aire de captation	106
Figure 4.10	Évolution mensuelle du rendement d'évaporation Influence du débit massique d'air asséchant	106
Figure 4.11	Evolution mensuelle du taux de couverture solaire. Influence du débit massique d'air asséchant	108
Figure 4.12	Evolution de la couverture solaire en fonction de l'aire de captation. Influence du débit massique d'air asséchant.....	109
Figure 4.13	Evolution du taux de couverture solaire en fonction du débit massique d'air asséchant. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant	109
Figure 4.14	Evolution de la couverture solaire maximale en fonction de la température de l'air asséchant. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant	110
Figure 4.15	Evolution de la couverture solaire maximale en fonction	

	de la masse de feuilles de menthe. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant	110
Figure 5.1	Evolution du délai d'amortissement en fonction de l'aire des insolateurs. Influence du prix de vente d'un kg de menthe sèche	122
Figure 5.2	Evolution du délai d'amortissement en fonction du débit d'air asséchant. Influence du taux de recyclage	122
Figure 5.3	Evolution du flux financier net en fonction de la surface des insolateurs. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant.....	123
Figure 5.4	Temps de retour de l'investissement du système de séchage en fonction du taux d'utilisation	124
Figure 5.5	Détermination du débit optimal d'air asséchant	127
Figure 5.6	Relation entre la couverture solaire et la variable Z pour le séchage des feuilles de menthe sans recyclage	128
Figure 5.7	Fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z pour plusieurs taux de recyclage de l'air asséchant.	129
Figure 5.8	Fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z*	130
Tableau 1.1	Valeurs des constantes géométriques en fonction de la géométrie du produit.....	40
Tableau 3.1	Menthe.....	59
Tableau 3.2	Valeurs standards des activités de l'eau (a_w) des six sels saturés utilisés pour la détermination des courbes de sorption	62
Tableau 3.3	Chaleur isostérique de désorption et d'adsorption	70
Tableau 3.4	Valeurs de la température isocinétique et de l'énergie libre lors de l'adsorption et de la désorption	71
Tableau 3.5	Dimensions de feuilles de menthe	77
Tableau 3.6	Valeurs des grandeurs caractéristiques de l'air asséchant pour chaque test expérimental	78
Tableau 3.7	Moyenne des coefficients des modèles décrivant la loi de	

	séchage des feuilles de menthe. $D_m=0,035 \text{ kg s}^{-1}$	86
Tableau 3.8	Moyenne des coefficients des modèles décrivant la loi de séchage des feuilles de menthe pour $D_m = 0,070 \text{ kg.s}^{-1}$	86
Tableau 3.9	Retrait de feuille de menthe pour différentes températures de l'air asséchant.....	92
Tableau 3.10	Constantes A, B1 et B2 du modèle de retrait (équation 3 .10).....	93
Tableau 3.11	Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion	95
Tableau 5.1	Données utilisées dans les calculs.....	121
Tableau 5.2	Équations de régression de la couverture solaire et de la variable Z pour différents aire d'insolateur	128
Tableau 5.3	Équations de régression de la fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z pour plusieurs taux de recyclage de l'air asséchant	129

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Symbole	Nom, unité
Lettre latine	
A	: Aire, m ²
A1, A2	: Constantes géométriques, (-)
A,B1,B2	: Coefficient de régression polynomiale
Ac	: Aire total des insolateurs, m ²
a _w	: Activités de l'eau, %
C	: Coût, DA
C ¹	: Coûts ou dépenses à la fin de la première année, DA
C _p	: Chaleur massique à pression constante de l'air, J.kg ⁻¹ K ⁻¹
D _{eff}	: Coefficient de diffusion effectif, m ² s ⁻¹
D _h	: Diamètre hydraulique, (m)
e	: Epaisseur, m
f	: Fraction solaire
f*	: Vitesse de séchage normée, -
Fa	: Flux de trésorerie actuel
Fn	: Flux de trésorerie future
Gz	: Nombre de Graetz
H	: Hauteur, m
hc,j-k	: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre les milieux j et k (W m ⁻² K ⁻¹)
hcv,f-pr	: Coefficient volumique de transfert de chaleur par convection (W.m ⁻³ . K ⁻¹)
hd,j-k	: Coefficient de transfert de chaleur par conduction entre les milieux j et k (W.m ⁻² . K ⁻¹)
H _r	: Humidité relative, %
hr,j-k	: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les milieux j et k (W m ⁻² K ⁻¹)
J	: Fraction de la quantité de chaleur économisée, %
J ₀	: Fonction de Bessel d'ordre zéro, (-)
K _{ii}	: Coefficients phénoménologiques, (-)

K _{ij}	:	Coefficient de couplage, (-)
L	:	Longueur, (épaisseur réduit), m
l	:	Largeur, m
L _v	:	Chaleur latente d'évaporation, J kg ⁻¹
M, m	:	Masse, kg
Nu	:	Nombre de Nusselt
O _c	:	Taux d'occupation, %
p	:	Périmètre, m
P	::	Puissance, W
P _a	:	Pression, (kPa)
P _{em}	:	Pouvoir évaporatoire moyen
P _o	:	Porosité, %
Q _{st}	:	Chaleur isostérique molaire de sorption, J mol ⁻¹
Q	:	Quantité d'énergie, J
q _{st}	:	Chaleur de sorption molaire, kJ mol ⁻¹
R ²	:	Coefficient de détermination
Re	:	Nombre de Reynolds
R	:	Constante des gaz parfaits (8,314 J mol ⁻¹ K ⁻¹)
S	:	Surface m ² , volume réduit (-)
t	:	Temps, s
T	:	Température, K
T _β	:	Température isocinétique, K
T _R	:	Taux de recyclage de l'air asséchant
V	:	Vitesse, m s ⁻¹
X(t)	:	Teneur en eau moyenne à l'instant t, kg d'eau/kg MS
X* _{exp}	:	Teneur en eau réduite expérimentale
X _e	:	Teneur en eau d'équilibre, kg d'eau/kg MS
X _i	:	Teneur en eau initiale, kg d'eau/kg MS
Z	:	Paramètre adimensionnel, (-)

Symboles grecs

α	:	Coefficient d'absorption
α _d	:	Coefficient de diffusion thermique, m ² s ⁻¹
ΔG _β	:	Energie libre de Gibbs (J mol ⁻¹)
ΔS	:	Entropie différentielle de sorption (J mol ⁻¹ K ⁻¹)

ε_p	:	Précision de calcul, %
η	:	Rendement
λ	:	Conductivité thermique, $W m^{-1}K^{-1}$
ν	:	Viscosité cinématique de l'air, $m^2.s^{-1}$
σ_σ	:	Densité de flux de chaleur de la source du milieu j, $W m^{-2}$
ϕ	:	Diamètre, m
Ω	:	Taux d'actualisation des valeurs monétaires (%)
ω	:	Taux, %

Indices

o	:	Initial
t	:	Total
ads	:	Adsorption
am	:	Ambiant
ap	:	Appoint
aux	:	Auxiliaire
c	:	Insolateur
c	:	Convection
c1 :c5	:	Numéro de claie
ciel	:	Ciel
cr	:	Critique
d	:	Conduction
des	:	Désorption
e, i	:	Extérieur, intérieur
ec	:	entrée insolateur
eq	:	Equilibre
ev	:	Evaporation
f	:	Fluide
h	:	Humide
i, f	:	Initial, final
is	:	Isolant
M	:	Mélange
p	:	Absorbeur
p	:	Pertes

pf	:	Produit frais
pr	:	Produit
r	:	Rayonnement
recy	:	Recyclage
retrait	:	Retrait lors du séchage
reg	:	Consigne
s	:	Séchage
sc	:	Sortie insolateur
so	:	Solaire
ss	:	sortie séchoir
u	:	Utile
vp	:	Vapeur d'eau
v	:	Vitre
vent	:	Vent
w	:	Paroi
	:	
	:	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Algérie, la menthe (*MENTHA SPICATA*) est abondante et disponible tout au long de l'année. Ses importantes propriétés nutritionnelles grâce au menthol qu'elle contient en font un produit très utilisé dans la confiserie, la fabrication pharmaceutique, la boisson, etc. Le séchage solaire de feuilles de menthe est une méthode traditionnelle très répandue de conservation permettant de pallier sa surproduction pendant certaines périodes de l'année, de les valoriser et de les rendre disponibles tout au long de l'année.

Le séchage de cette plante au soleil conduit à un produit dont la qualité n'est pas conforme à la norme commerciale. Aussi, est-il nécessaire de développer un système de séchage solaire de technologie simple énergétiquement économique qui permet d'obtenir des feuilles de menthe séchées de bonne qualité.

L'objet de ce travail est une contribution à l'étude d'un séchoir solaire modulaire indirect partiellement solaire à convection forcée pour feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*). Notre manuscrit comporte cinq chapitres et huit annexes (A-H).

Le premier chapitre présente quelques rappels bibliographiques sur la théorie du séchage et les séchoirs solaires.

La modélisation du fonctionnement du système de séchage modulaire composé d'un insolateur plan à air, d'une enceinte de séchage et d'une source d'énergie d'appoint est exposée dans le deuxième chapitre. Les équations de transferts sont déduites de bilans thermique et massique établis pour chaque composant de l'insolateur et du séchoir. Ces équations sont résolues par un schéma implicite aux différences finies et la méthode "Diabolo-Sablier". Le programme informatique que nous avons élaboré en Fortran permet de déterminer principales grandeurs caractéristiques du séchage telles que la température de l'air asséchant, la couverture solaire, les rendements de l'insolateur et du séchoir et le taux de couverture solaire.

Le troisième chapitre est consacré à une étude expérimentale dans laquelle nous déterminons les isothermes de sorption, la courbe caractéristique de séchage des feuilles de menthe. Les coefficients de diffusion et l'énergie d'activation sont déduits des mesures de la vitesse de séchage effectuées pour

plusieurs valeurs de la température et du débit de l'air asséchant. La démarche suivie est fondée sur la prise en compte du retrait lors du séchage des feuilles de menthe.

Le chapitre quatre est dédié aux résultats du comportement thermique et massique du système de séchage. Nous analysons l'influence du débit d'air asséchant et du taux de recyclage de l'air asséchant sur la durée de séchage, les rendements de l'insolateur et du séchoir et le taux de couverture solaire. Les calculs sont effectués pour les conditions climatiques de Bouzaréah Alger (Algérie) en utilisant la notion de journée type.

Le cinquième chapitre est consacré à une analyse technico-économique sommaire du séchoir modulaire à chauffage partiellement solaire. Cette analyse est basée sur le calcul de la valeur de l'aire de l'insolateur pour laquelle les coûts du séchoir modulaire et de son fonctionnement sont optimaux. La durée de séchage est prise égale à la durée d'insolation de la journée considérée, et nous établissons des abaques de dimensionnement de ce système de séchage. La méthode de dimensionnement est basée sur la recherche de corrélations exprimant le taux de couverture solaire et la fraction d'énergie économisée en fonction de variables adimensionnelles caractéristiques des quantités de chaleur mises en jeu lors du séchage.

La conclusion générale fait la synthèse des principaux résultats de notre étude numérique et expérimentale sur le séchage de menthe dans un séchoir modulaire et indirect à chauffage partiellement solaire et présente quelques perspectives à ce travail.

Afin de ne pas trop alourdir le texte, nous reportons en annexe quelques exemples de séchoirs solaires, les principales propriétés de l'air humide, quelques modèles de cinétique de séchage, quelques notions sur les isothermes de sorption et la modélisation du comportement énergétique d'un système de séchage. Une annexe est consacrée au protocole expérimental retenu pour mener à bien l'étude expérimentale et une autre aux organigrammes de programmation.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

Le séchage thermique est un processus complexe faisant appel à des phénomènes simultanés de transfert de masse et de chaleur. Il permet la conservation de denrées agro-alimentaires, par diminution de leur teneur en eau, jusqu'à des valeurs résiduelles qui autorisent son stockage dans une ambiance donnée.

Dans ce chapitre, nous procédons à quelques rappels sommaires sur la théorie du séchage, les séchoirs solaires, les insolateurs à air et sur la modélisation du séchage de produits agroalimentaires. Ensuite, nous présentons les principaux modèles de séchage.

1.2. Rappels sur les mécanismes du séchage

1.2.1. Notions fondamentales

L'eau dans un corps poreux se présente sous trois formes:

- Eau libre : Elle peut être extraite sans apport d'énergie
- Eau liée: Elle ne peut être extraite qu'avec un apport d'énergie suffisant pour rompre les liaisons entre cette eau et le solide.

La plupart des solides changent de comportement au cours du séchage. Aux fortes teneurs en eau, ils sont non hygroscopiques et deviennent hygroscopiques aux faibles teneurs en eau.

Un solide est considéré non-hygroscopique si à l'équilibre avec le milieu dans lequel il est placé la tension de vapeur du liquide dont il est imprégné est maximale pour une température donnée. Tout se passe comme si le produit est recouvert d'un film d'eau libre qui s'élimine facilement tant que la quantité d'eau qui migre de l'intérieur vers sa surface sous l'action des forces de capillarité et de diffusion est suffisante pour compenser l'évaporation à sa surface.

Un solide est considéré hygroscopique lorsque l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle de vapeur d'eau est, pour la température considérée, inférieure à la pression de vapeur saturante à la surface du solide. Dans ces corps, les forces de capillarité ont tendance à retenir l'eau en

phase liquide. Ces corps ne peuvent être séchés complètement à l'instar des solides non-hygroscopiques.

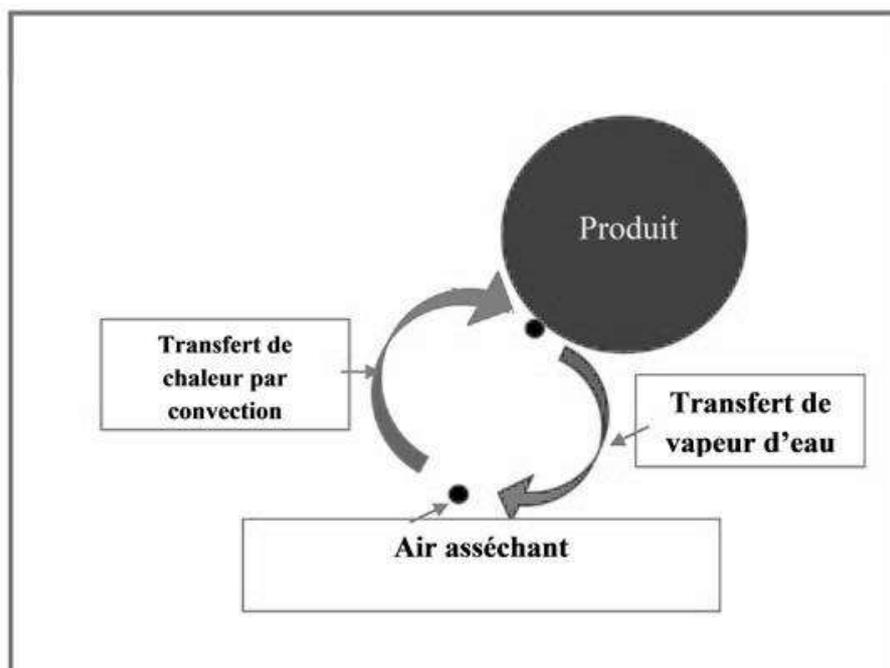


Figure 1.1 : Représentation schématique des échanges de matière et de chaleur lors du séchage par convection [1].

1.2.1.1 Phases de séchages

Le séchage de produits hygroscopiques comporte trois phases :

- Une phase de mise en température du produit. La température du produit augmente jusqu'à atteindre une valeur pour laquelle la diffusion de l'eau libre est possible.
- Une phase de vitesse de séchage à vitesse constante,
- Une phase de séchage à vitesse décroissante.

La phase de séchage à vitesse constante est observée lorsque la teneur en eau à la surface du produit est élevée et que la diffusion de l'eau libre de l'intérieur vers sa surface est suffisamment rapide pour compenser l'évaporation. Durant cette phase, la chaleur latente de vaporisation est entièrement prélevée par l'air asséchant. Le séchage s'effectue à enthalpie constante. Aussi, la température du produit est constante et égale à celle de l'air asséchant. Lorsque l'eau à la surface du produit n'est plus, au cours du séchage, renouvelée assez rapidement par un apport de l'eau de l'intérieur, les phénomènes de diffusion limitent cette migration

et la vitesse de séchage décroît jusqu'à ce que la teneur en eau du produit soit égale à la teneur en eau d'équilibre de l'air asséchant. La durée de la phase de séchage à vitesse décroissante est toujours supérieure celle à vitesse constante [2] [3].

Au cours du séchage, le produit est le siège de divers phénomènes très complexes tels que le rétrécissement, les réactions biochimiques etc. La figure (1.2) illustre les principaux phénomènes physico-chimiques et biochimiques permettant d'apprécier un processus de séchage.

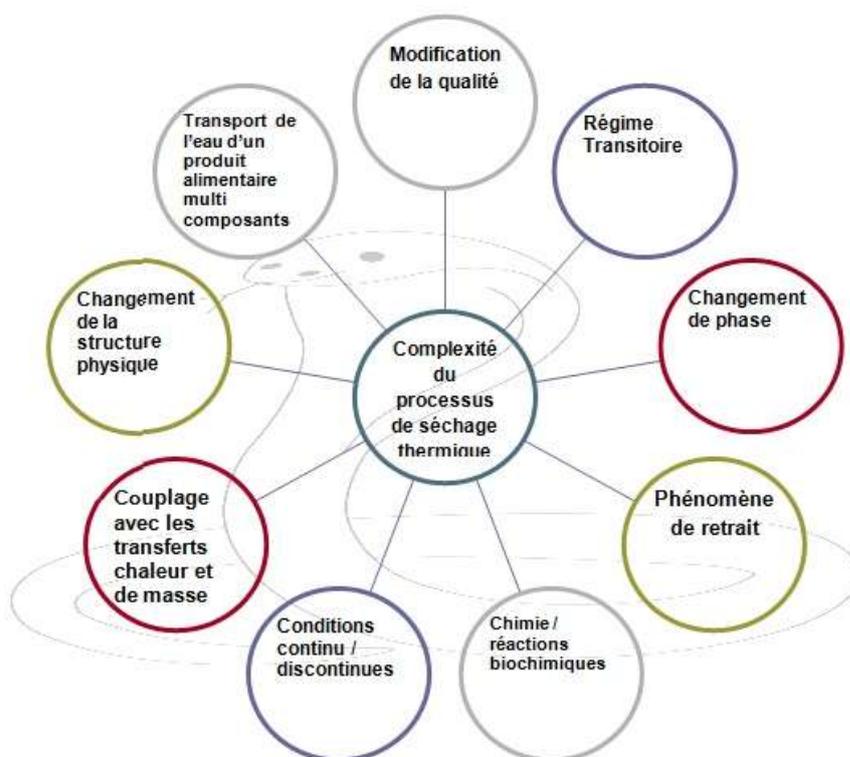


Figure 1.2 : Complexité du processus de séchage des produits alimentaires.

1.2.1.2. Isothermes de sorption

Les travaux relatifs aux isothermes de sorption des produits agroalimentaires, notamment ceux cultivés en Algérie, sont rares. La connaissance de la teneur en eau d'équilibre d'un produit à sécher est d'une part, nécessaire aux modèles de séchage et d'autre part, permet de déterminer les conditions hygrothermiques pour le stockage des produits agroalimentaires [4] [5] [6]. Les isothermes d'adsorption/désorption sont déterminées, pour une même température de l'air dans lequel le produit est placé, en faisant varier l'humidité relative de l'air. L'isotherme de désorption, est la courbe déterminée en

déshydratant un produit humide [7] [8] [9]. L'isotherme d'adsorption, obtenue en réhydratant un produit sec, permet d'une part, de prévoir l'influence de la variation de l'humidité relative de l'ambiance de stockage du produit sur la stabilité hygroscopique et d'autre part, d'estimer la quantité d'eau qui serait adsorbée pendant le stockage du produit dans une ambiance donnée. Le phénomène d'hystérésis indique que pour une même humidité relative de l'ambiance dans laquelle le produit est disposé, la teneur en eau d'équilibre du produit lors de la désorption n'est pas égale à celle lors de l'adsorption, explique la différence entre les courbes d'adsorption et de désorption. Plusieurs travaux décrivent les techniques et les méthodes retenues pour la détermination des isothermes de désorption et d'adsorption de nombreuses denrées alimentaires [10]. Nous présentons quelques compléments d'informations sur les isothermes de sorption en annexe E.

1.2.1.3. Phénomène de Retrait (séchage)

La teneur en eau initiale maximale de fruits et légumes varie entre 50% et 80% [11]. Celle des PAM est relativement élevée ; elle atteint environ 80%. La teneur en eau finale des PAM après séchage est inférieure à 10%. Elles sont, par conséquent, extrêmement périssables. Plusieurs d'enzymes et micro-organismes provoquent des modifications chimiques dans les PAM qui se développent rapidement, en présence d'eau dans le produit [11]. Le marché de produits PAM de qualité exige que les propriétés sensorielles ou organoleptiques du produit séché soient maintenues à un niveau élevé proche du produit frais. Une connaissance approfondie des paramètres responsables de la diminution de la qualité du produit au cours du séchage revêt donc une importance majeure. En effet, le séchage est basé sur la réduction de la teneur en eau d'un produit à sécher jusqu'à l'équilibre entre le transfert d'eau ou vapeur d'eau du produit et l'environnement asséchant. Ce transfert dépend respectivement de la teneur en eau et de la température de l'air asséchant (Ruiz-Lopez et al, 2007) [12]. Cependant, lors d'un séchage convectif par des conditions de l'air asséchant contrôlées, les feuilles de PAM changent non-seulement de couleur et de masse, mais aussi souvent de dimensions. Les altérations de la surface ou le retrait causé par le séchage n'est pas en générale bien maîtrisé et ne doit pas être négligé, car très souvent le retrait excessif du produit provoque une dégradation de la qualité

[11]. Le dommage causé par le séchage de PAM constitue, dans la plupart des cas, un problème d'une ampleur considérable. On peut supposer qu'une feuille de PAM subit une contraction uniformément répartie sur la surface. Ainsi, sa forme ne change pas durant le processus du séchage. Cependant, une feuille n'a pas une structure homogène; elle est composée de tissus ou d'éléments de caractéristiques différentes: épiderme, mésophile et veines. En particulier, l'épiderme et les veines jouent un rôle important dans le renforcement de la structure d'une feuille de PAM. Par conséquent, des changements de forme ou une réduction des dimensions des feuilles pendant le séchage sont possibles. Il en résulte une déformation structurelle significative de la forme et de la taille de la feuille de PAM lors du séchage. En outre, lorsque l'eau est éliminée de la surface du produit, la surface des tissus cellulaires et les parois des pores remplis d'eau subissent une pression qui provoque un déplacement de toute la matrice solide vers son centre. Cette contraction provoque des changements structurels [13] et des fissurations drastiques peuvent se développer à sa surface en raison de contraintes mécaniques et de déformations au sein de la structure. Ce retrait, appelé retrait de séchage, joue un rôle important dans l'aspect de la forme du produit. Il influence sur la vitesse de séchage [14] [15]. A ce niveau, pour mieux comprendre et modéliser le mécanisme du transport ou de déplacement de l'eau et de la chaleur pendant le séchage, en tenant compte de la déformation du produit, diverses approches de modélisation du retrait de différentes denrées agroalimentaires sont proposées dans la littérature [15] [16] [17]. La plupart des travaux de modélisation du retrait au séchage sont basés sur des corrélations entre la variation de la masse volumique, la surface réduite qui est estimée en fonction de la teneur en eau réduite, comme ceux proposés par Ratti et al. [16]. Ainsi, ils ont constaté que le volume réduit de produits agroalimentaires lors du séchage dépend principalement de sa teneur en eau, de sa géométrie et de sa composition ainsi que des paramètres de l'air asséchant. Manalu et al. [17], ont analysé le retrait lors du séchage en couche mince de tranches de curcuma. L'unité de séchage utilisée est équipée d'un système de visualisation 2D et d'un logiciel d'analyse d'image, Les variations temporelles de la surface tranches de curcuma ont été mesurées toutes les 5 minutes pendant le séchage. Ils ont montré l'existence d'une relation quasi linéaire entre le retrait et la teneur en eau. En outre, la température de l'air asséchant n'a pas d'effet significatif sur le retrait

lors du séchage. Par contre, le coefficient de diffusivité effective de l'eau du produit dépend fortement du retrait lors du séchage. Après une recherche bibliographique intensive, nous n'avons pas trouvé de travaux expérimentaux et de modélisation numérique sur le retrait lors du séchage de plantes.

1.2.2. Procédés de séchage

Le séchage conventionnel, dont la quantité de chaleur nécessaire au processus de séchage est produite par la combustion de bois, ou un dispositif électrique ou encore la combustion de combustibles fossile dans des fours, est coûteux. En outre, les gaz de combustion sont une source de pollution de l'environnement.

Le séchage traditionnel est soumis à la variabilité et l'imprévisibilité du temps. Le séchage partiellement solaire permet de sécher les produits agroalimentaires avec plus d'efficacité que le séchage traditionnel et à un coût inférieur à celui du séchage conventionnel. C'est le mode, le plus simple et le plus accessible aux populations.

1.2.3. Séchage traditionnel

Les produits, exposés directement au flux solaire, sont soumis aux aléas climatiques et à la pollution environnementale. En outre, les températures élevées qu'ils peuvent atteindre au cours de la journée provoquent une photo-oxydation des vitamines photosensibles et des composés phénoliques notamment pour les plantes aromatiques et médicinales.

1.2.4. Séchoirs solaires

Les séchoirs solaires peuvent être regroupés en deux types définis d'une part, par le mode de circulation de l'air asséchant et d'autre part, par l'exposition ou pas du produit à sécher au rayonnement solaire. Ainsi, il y a :

- Les séchoirs solaires dits passifs: le mouvement d'air s'effectue par convection naturelle.
- Les séchoirs solaires à convection forcée dits actifs : l'écoulement de l'air à travers le séchoir est assuré par un ventilateur. Il apporte des améliorations au séchage solaire, essentiellement en durée de séchage.

On distingue quatre types de séchoirs solaires

1.2.4.1. Séchoirs solaires directs

Les produits à sécher sont exposés directement au rayonnement solaire. Quelle que soit le type de séchoir, la mise en œuvre du séchage solaire en mode direct par convection naturelle reste limitée, car le débit d'air asséchant est faible et donc non adapté au séchage [18] [19]. Le séchage n'est pas uniforme et la qualité du produit séché est détériorée par les surchauffes superficielles dues à l'exposition excessive du produit au soleil qui engendrent la formation d'une croûte à la surface du produit [20] [21]. Ces surchauffes peuvent être limitées par l'effet cheminée qui permet d'accroître la vitesse de l'air asséchant.

1.2.4.2. Séchoirs solaires indirects

Dans ce type de séchoirs, les produits ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ces séchoirs sont généralement modulaires et comportent un insolateur à air destiné à chauffer l'air asséchant qui circule par convection naturelle ou par convection forcée à travers l'insolateur et le séchoir. Le séchage par convection forcée réduit la durée de séchage et permet de contrôler le processus de séchage [22].

1.2.4.3. Séchoirs mixtes

Dans ces séchoirs, la quantité de chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire capté par les produits et l'air préchauffé dans des insolateurs [20].

1.2.4.4. Séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour maintenir la température de l'air asséchant égale à une valeur de consigne tout au long du séchage. Ces séchoirs, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle ou à des applications commerciales pour lesquelles le séchage ne doit pas dépendre des conditions climatiques. Ce type de séchoir semble être bien adapté au séchage continu de denrées agro-alimentaires. Plusieurs combinaisons de types de séchage et de modes de séchage sont possibles conduisant éventuellement à six configurations possibles, qui sont repris dans la figure (1.3.)

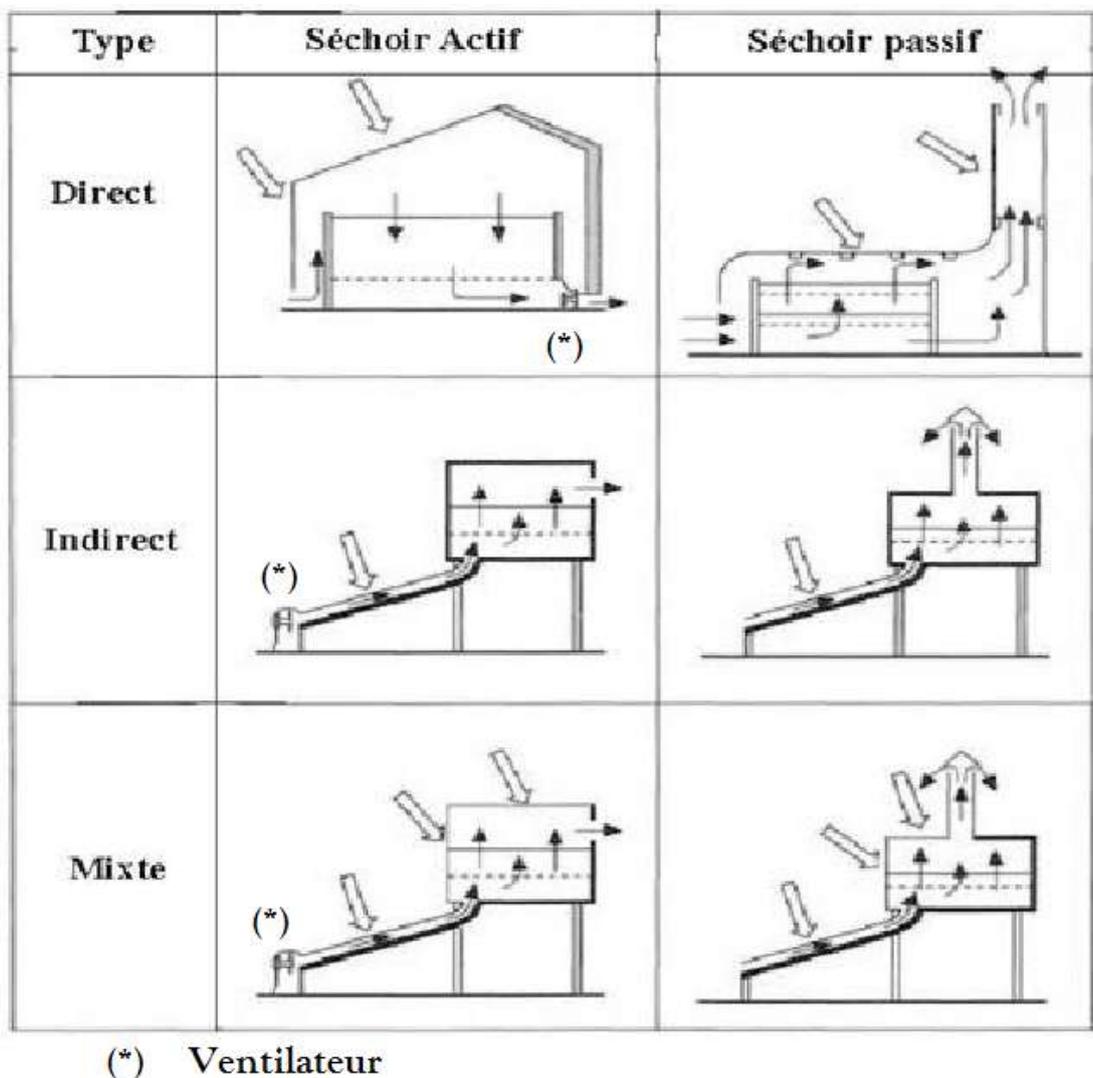


Figure 1.3 : Présentation de différents types et mode de fonctionnement de séchoirs solaires [23].

La performance thermique de l'insolateur joue un rôle capital dans l'amélioration de la performance du système de séchage. Par la suite, nous présentons les principales fonctions de l'insolateur.

1.3. Insolateurs plan à air

Un insolateur plan transforme le rayonnement solaire en chaleur transférée par conduction convection au fluide caloporteur [23]. Les éléments de base qui composent un insolateur plan à air sont :

- La couverture transparente,
- L'absorbeur,
- L'isolation latérale et arrière,
- Le caisson (coffret).

Lors de son passage dans l'insolateur, le fluide caloporteur (air) s'échauffe par conduction - convection avec l'absorbeur. Les scénarios d'écoulement de l'air dans l'insolateur (figure 1.4) et le nombre de couverture définissent le type d'insolateur: Insolateur à simple passe et à double vitrage, insolateur multi passes et à simple vitrage.

1.3.1. Couverture transparente

Une couverture efficace doit minimiser l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire afin que la plus grande quantité de flux solaire soit captée par l'absorbeur.

Divers matériaux (verre, matière plastique) sont utilisés pour la fabrication des couvertures transparentes. Les couvertures en matière plastique réduisent les coûts, mais leurs propriétés radiatives se détériorent assez rapidement au cours du temps. Les couvertures en plastique renforcée par des fibres de verre n'améliorent pas la performance de l'insolateur mais leurs résistances aux aléas climatiques font que leurs propriétés radiatives évoluent peu au cours du temps. La couverture en verre combine de bonnes propriétés radiatives et une durée de vie élevée. Les déperditions peuvent être réduites par un double vitrage et les propriétés radiatives des couvertures peuvent être améliorées par l'utilisation de verres sélectifs (le verre blanc antireflet à faible teneur en fer) qui réduisent la réflexion et augmentent la transmission du flux solaire.

1.3.2. Absorbeur

L'absorbeur convertit le flux solaire en chaleur. Il est composé de matériaux bon conducteur de chaleur tels que l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium et le cuivre [23].

L'augmentation de la température de l'absorbeur engendre un transfert de chaleur par conduction à travers l'absorbeur, par convection avec l'air et par rayonnement avec la face intérieure de la couverture. Pour accroître l'effet de serre entre la couverture et l'absorbeur, différents procédés ont été élaborés. Ainsi, les revêtements sélectifs, les alliages métalliques au chrome, le chrome noir et les revêtements obtenus au plasma et ceux par PVD (Physical Vapor Deposition) tel que le CERMET (céramiques à base d'oxydes métalliques), augmentent l'émissivité dans les longueurs d'onde du rayonnement thermique [23]. La position de l'absorbeur contribue à l'augmentation des transferts de chaleur avec le fluide caloporteur. Ainsi, il peut être fixé à l'isolant ou positionné de telle sorte qu'il délimite avec la couverture deux canal dans lesquels le fluide caloporteur s'écoule (figure 1.4).

L'augmentation de la surface d'échange de l'absorbeur contribue d'une part, à accroître le flux solaire absorbé et d'autre part, les échanges de chaleur par conduction-convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (figure 1.4).

1.3.3. Isolation

L'isolation joue un rôle très important sur la performance thermique de l'insolateur. Sa fonction consiste à minimiser les déperditions thermiques à l'avant et à l'arrière de l'insolateur. Les déperditions thermiques à l'arrière des insolateurs plans sont réduites grâce à l'utilisation de divers matériaux isolants tels que la laine de verre, les mousses polymériques, la laine minérale et les matériaux à base de composés organiques tels que la laine de mouton, les fibres de bois et les fibres végétales en général [23]. Les déperditions à l'avant peuvent être réduites par une couche d'air confinée entre la couverture transparente et l'absorbeur puis par des gaz inertes et enfin le vide.

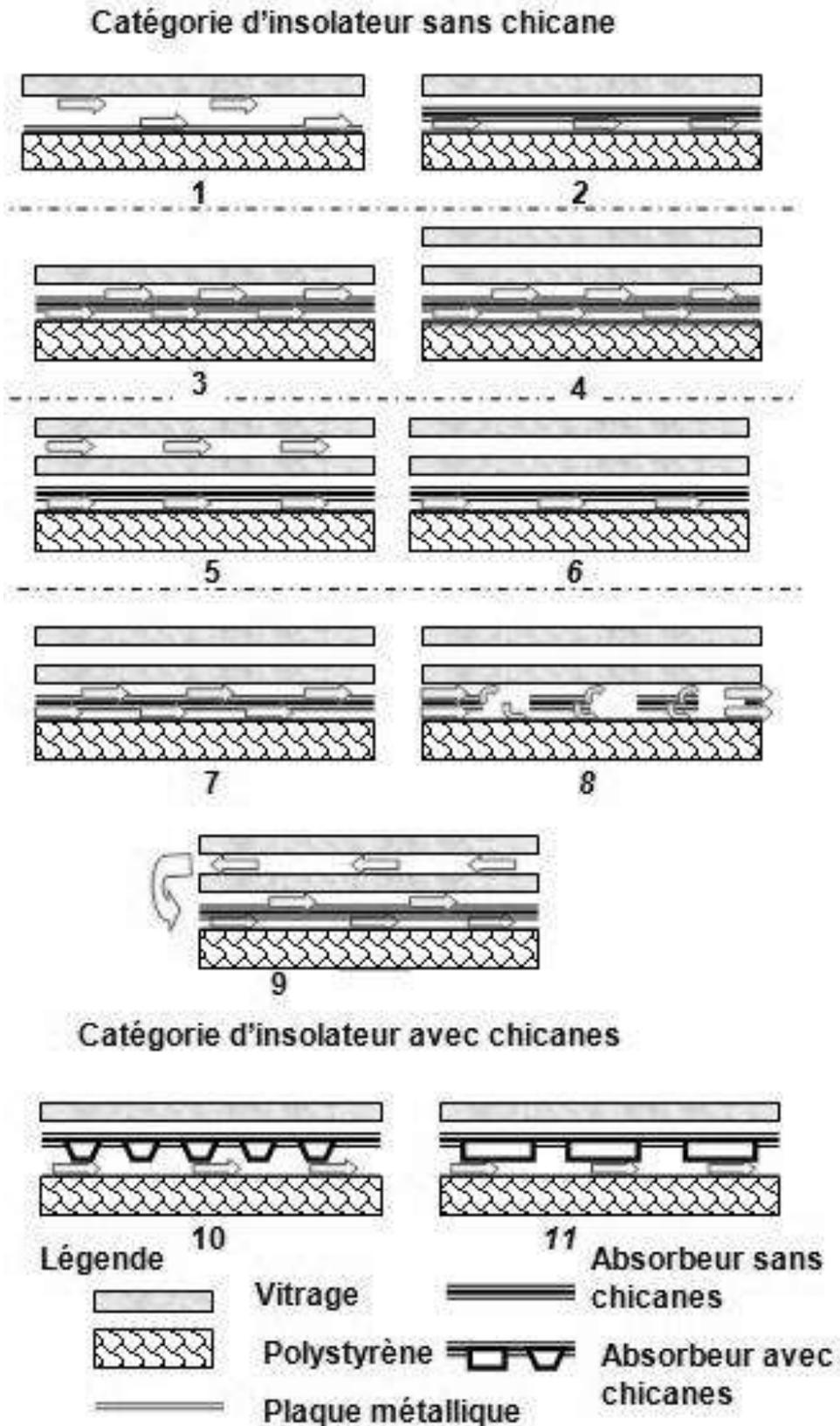


Figure 1.4 : Différents types d'insolateurs [24].

1.4. Rappels bibliographiques

La littérature relative aux séchoirs solaire et aux insolateurs est abondante. Aussi, nous nous limiterons dans la suite à quelques rappels non exhaustifs des travaux sur les systèmes de séchage solaire.

En ce qui concerne les travaux théoriques et numériques, PRATATO et al. [25] ont développé des outils simples de dimensionnement de séchoirs solaires pour le séchage de feuilles de caoutchouc naturel. Les conditions de séchage sont supposés constantes au cours du séchage. Ces outils ont été élaborés grâce à des simulations numériques qui ont conduit à l'élaboration de relations reliant la fraction de chaleur économisée à l'aire de captation de l'insolateur. Ces relations couplées à une analyse économique permettent de déterminer l'aire de captation optimale de l'insolateur. Une modélisation d'un séchoir solaire indirect à convection forcée pour écorces d'oranges associée à une analyse paramétrique montre que l'aire de l'insolateur et le débit d'air asséchant jouent un rôle prépondérant sur le processus de séchage [26]. Dans cette étude, les équations de transfert, basées sur le modèle Hottel Bliss Whillier (Hottel & Whillier 1955, Bliss, 1959) pour l'insolateur et déduites de bilans thermique et massique pour chaque composant du séchoir, sont résolues avec un schéma numérique implicite et la méthode Diabolo-Sablier. La modélisation a été validée par une comparaison entre les résultats numériques et ceux obtenus en soufflerie à atmosphère contrôlée. Simate [27] a analysé l'influence du mode de séchage (mixte et indirect) sur le séchage à convection naturelle de maïs. Pour les deux modes de séchage les équations de transferts, basées sur les bilans thermiques établis pour les composants de l'insolateur, sont résolues en utilisant une procédure itérative. Les résultats numériques sont comparés avec ceux des expériences effectuées en laboratoire en utilisant un simulateur de flux solaire. Pour une même capacité de séchage, la plus petite aire de l'insolateur est obtenue pour le mode mixte de séchage. La modélisation d'un séchoir solaire indirect à séchage discontinu pour produits agricoles, composé d'un insolateur plan à air et d'une source de chauffage d'appoint a montré que l'augmentation de la température de l'air asséchant et de l'aire de l'insolateur réduit considérablement la durée de séchage [28]. Dans cette étude, les équations de transfert, déduites des bilans thermiques et de masse établis sur chaque composant de l'insolateur et de l'enceinte de séchage, ont été résolues en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel. Le

coefficient de diffusion est déduit des données expérimentales et exprimé en fonction de la température et de la vitesse de l'air asséchant. Un autre type de séchoir modulaire est celui faisant l'objet de l'étude de [29]. Les insolateurs plans à air sont disposés sur le toit d'un bâtiment dans laquelle le séchoir est placé. Les équations de transfert, déduites à partir de bilans thermiques et de masse établis sur les composants de l'insolateur et de l'enceinte de séchage, ont été résolues en utilisant le schéma des différences finies et la méthode de Runge Kutta d'ordre 4. L'aire des insolateurs est optimisée au moyen d'un modèle économique. Janjai et al. [30] ont procédé à une étude d'un séchoir solaire modulaire pour fleurs de type d'hibiscus (rosella flowers) et pour piments. Les insolateurs dans lesquels l'air asséchant est préchauffé sont intégrés à la toiture d'un bâtiment. Les équations de transfert basées sur des bilans thermique et massique établis sur les composants du séchoir ont été résolues en utilisant un schéma numérique implicite aux différences finies et la méthode d'élimination de Gauss-Jordan. Il est montré que la durée de séchage est, comparée à celle d'un séchage traditionnel, considérablement réduite et que le produit séché conserve ses qualités gustatives. En outre, le rendement sur le capital investi démontre que l'utilisation de ce type de séchoir est rentable.

En ce qui concerne les travaux expérimentaux, citons celui de Sarsavadia [31] sur le séchage par convection forcée de tranches d'oignons dans un séchoir partiellement solaire dans lequel l'air asséchant à la sortie du séchoir est partiellement recyclé avec l'air chauffé par l'insolateur plan à air. Pour un débit d'air asséchant, la part de la quantité de chaleur d'origine solaire de la quantité totale de chaleur nécessaire au séchage diminue avec l'augmentation de la température de l'air asséchant et augmente avec la vitesse de l'air asséchant.

Palsing. et al. [32] ont reporté une étude sur un séchoir solaire direct conçu de telle sorte que son inclinaison, par rapport à l'horizontale, puisse varier afin de capter un maximum du flux solaire et également fonctionner en mode indirect. Le séchage s'effectue en convection naturelle et peut se dérouler aussi bien en mode continu qu'en mode semi-continu. Les mesures des principales grandeurs caractéristiques du séchage de fenugrec telles que le flux solaire incident sur la couverture du séchoir, la température de l'air asséchant et la perte de poids du produit ont montré, qu'en mode discontinu, l'efficacité thermique du séchage diminuait pendant les journées successives de séchage.

Les insolateurs à air ont fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et numériques. Aussi nous nous limiterons quelques à travaux en rapport avec l'insolateur retenu dans le système de séchage qui fait l'objet de ce travail. Il a été montré que le rendement des insolateurs plans à air à double passe est supérieur de 10 % à 15 % à celui d'un insolateur à simple passe [33]. En outre, l'état de surface de l'absorbeur joue un rôle fondamental sur l'augmentation de la température de l'air à traversée de l'insolateur. En effet, une étude comparative de la température de l'absorbeur d'un insolateur plan à simple passe, de celle d'un insolateur plan à air et de celle d'un insolateur dont l'absorbeur est une plaque métallique nervurée fonctionnant soit en convection naturelle, soit en convection forcée a montré que la valeur la plus élevée du coefficient transfert de chaleur par convection entre l'absorbeur et l'air est obtenue pour l'absorbeur constitué d'une plaque nervurée. Ce résultat rejoint celui d'Abdi et Aït Messaoudène [34] qui ont montré que le rendement journalier d'un insolateur dont l'absorbeur est une plaque de forme convexe est supérieur à celui constitué d'une plaque concave (figure 1.5).

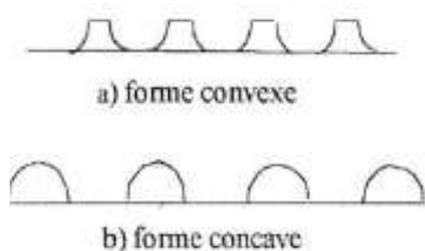


Figure 1.5 : Plaques absorbantes [24].

1.5. Analyse technico-économique et dimensionnement des systèmes de séchage

Pour assurer le développement des systèmes de séchage solaire, les études thermo-énergétiques sont généralement complétées par des analyses de faisabilités technico-économiques [35]. Les modèles d'analyse technico-économiques doivent être adaptés à chaque type de séchoir afin de prendre en compte leurs spécificités. Ainsi, pour un système de séchage solaire pour fruits et légumes à usage domestique dont la durée de vie est estimée à 20 ans, la période d'amortissement est de l'ordre de 6 mois [36]. Pour une même durée de vie, la période d'amortissement d'un séchoir solaire hybride pour le séchage de tomates dans la région du Sahara algérien septentrional est de 1,27 an [37].

L'optimisation d'un séchoir solaire pour céréales, assimilées à un milieu poreux, a mis en évidence les principaux paramètres qui influencent le coût de séchage, à savoir : la période d'utilisation annuel du séchoir, le cout spécifique de l'insolateur, le débit d'air asséchant et l'aire des insolateurs [38]. L'optimisation de ce système de séchage est basée sur la recherche des conditions de séchage (débit d'air asséchant, température de l'air asséchant, etc.) pour lesquelles la couverture solaire est maximale. Une comparaison des performances d'un séchoir solaire modulaire passif pour maïs fonctionnant en mode mixte (le produit est à la fois soumis au flux solaire et à un écoulement d'air) ou indirect (le produit n'est pas soumis au flux solaire) a montré qu'une longueur d'insolateur égale à 1,8 m est suffisante pour assurer le séchage de 90 kg de produit pour un séchoir fonctionnant en mode mixte [39]. Elle passe à 3,34 m pour un séchoir fonctionnant en mode indirect. Pour le séchoir fonctionnant en mode mixte, le coût énergétique du séchage est réduit de 26 % par rapport à celui du séchoir indirect. Une analyse technico-économique d'un séchoir solaire modulaire pour denrées agroalimentaires fonctionnant en convection forcée, basée sur la minimisation des coûts de séchage, a permis de déterminer l'aire optimale des insolateurs [40]. Ainsi, pour cette aire, les rendements moyens de l'insolateur et du séchoir sont respectivement égaux à 44 % et 16 % et la couverture solaire moyenne est de 33% pour une utilisation annuelle de 303 jours du séchoir. Il ressort de ces quelques travaux que l'analyse technique d'un projet de séchoir au moment de son étude s'attache à identifier et analyser en détail notamment, la qualité du site sélectionné; le type des équipements choisis, la performance thermique et l'investissement. Elle va ainsi permettre d'identifier les valeurs optimales des paramètres retenus comme indicateurs techniques (température, débit, taux de recyclage et l'humidité relative de l'air asséchant, coût de l'énergie d'appoint, etc.) pour réaliser une analyse technico-économique du fonctionnement du système de séchage.

1.6. Principaux modèles de séchage

Les modèles de séchage sont classés selon deux types :

1.6.1. Modèles distribués

Ils sont basés sur les équations qui régissent les transferts couplés de chaleur et de masse aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du produit. Ils permettent de déterminer les distributions de température et de la teneur en eau au sein du produit. A titre d'exemple, citons le modèle général des équations de Luikov dont les équations de transfert sont basées sur la deuxième loi de diffusion de Fick ou de leur forme modifiée [41].

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}X + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}X + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31}X + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P \end{cases} \quad (1.1)$$

où, K_{11} , K_{22} , K_{33} sont les coefficients phénoménologiques, K_{12} , K_{13} , K_{21} , K_{23} , K_{31} , K_{32} les coefficients de couplage entre les teneurs en eau, la température et la pression de vapeur d'eau dans le produit [42]. Lorsque les effets de la pression sur les transferts de chaleur et de masse dans le produit peuvent être négligés par rapport à ceux de la température et de la teneur en eau, les équations ci-dessus conduisent aux équations de Luikov :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}X + \nabla^2 K_{12}T \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}X + \nabla^2 K_{22}T \end{cases} \quad (1.2)$$

- Modèles à paramètres localisés : Dans ces modèles, la distribution de température est uniforme et égale à celle de l'air asséchant. Avec cette hypothèse, les équations de Luikov s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}X \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{22}T \end{cases} \quad (1.3)$$

Le coefficient phénoménologique K_{11} est connu comme le coefficient de diffusivité effective (D_{eff}) et K_{22} représente le coefficient de diffusivité thermique (α_d). Pour des valeurs constantes de D_{eff} et α_d , les équations (1.3) et (1.4) peuvent être réarrangées comme suit:

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial X}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_d \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \end{cases} \quad (1.4 \text{ a-b})$$

Où, $a_1 = 0$ pour des géométries planes, $a_1 = 1$ pour les formes cylindriques et $a_1=2$ pour les formes sphériques [43].

Pour une plaque de dimension infinie, une sphère ou un cylindre de longueur infinie, la résolution de l'équation (1.4 a) conduit à une solution qui peut s'écrire comme suit [43] :

$$X^* = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} \exp \left[- \frac{(2i-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{A_2} \right] \quad (1.5)$$

géométrie du produit	A_1	A_2^*
Plaque infinie	$8/\pi^2$	$4L^2$
Sphère	$6/\pi^2$	$4r^2$
plaque finie en 3D	$(8/\pi^2)^3$	$1/(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)$

Tableau 1.1 : Les valeurs des constantes géométriques en fonction de la géométrie du produit.

* L est la moitié de l'épaisseur de la tranche du produit considéré si le séchage se produit des deux côtés, ou L est l'épaisseur de la tranche.

Si le séchage se produit à partir d'un seul côté, la résolution de l'équation (1.4 a) conduit à :

$$X^* = A_1 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{J_0^2} \exp\left[-\frac{J_0^2 D_{eff} t}{A_2}\right] \quad (1.6)$$

Pour des géométries multidimensionnelles telles que celles d'un produit sous forme parallélépipédique la règle de Newman peut être appliquée [44]. Les valeurs des constantes géométriques sont présentées dans le tableau (1.1).

La teneur en eau (X^*) est déterminée en fonction des conditions extérieures. Si l'humidité relative de l'air asséchant est constante pendant le processus de séchage, X^* , est déduite de l'équation (1.6). Si l'humidité relative de l'air asséchant varie au cours du séchage engendrant ainsi une variation de la teneur en eau d'équilibre, la teneur en eau est alors déterminée à partir de l'équation (1.7) [45].

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (1.7)$$

$$X^* = \frac{X(t)}{X_0} \quad (1.8)$$

Dans la phase de séchage à vitesse constante, la teneur en eau X^* est identique à la teneur en eau normalisé X^* .

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (1.9)$$

Les différents modèles semi-théoriques sont présentés en annexe C.

1.6.2. Modèles de séchage en couches minces

Le séchage en couche mince est adapté aux produits (fruits, légumes, légumineuses et poissons) et aux milieux poreux (maïs, blé, céréales, épices) disposées en monocouche sur des claies balayés par un air asséchant [46].

Les modèles de séchage en couches minces sont très utilisés en raison de leurs facilités de mise en œuvre. Ils nécessitent moins de données, contrairement aux modèles distribués qui requièrent la connaissance des coefficients phénoménologiques et de couplage [47] [48].

Les équations qui régissent le processus de séchage n'admettent pas de solution analytique. Aussi, la modélisation du séchage d'un produit fait souvent appel à des relations semi-empiriques déduites d'études expérimentales. Certains modèles sont basés sur la résistance interne au transfert de masse [49] [50] [51] [52], d'autres sur la résistance externe au transfert de vapeur d'eau entre le produit et l'air asséchant [53] [54] [55] [48]. Le domaine de validé de ces modèles empiriques de séchage limitent fortement leurs utilisations [56].

1.7. Conclusion

Ces quelques rappels bibliographiques sur le séchage de produits agro-alimentaires, et la présentation de quelques types de séchoir solaire montrent, à notre connaissance, que peu de séchoirs modulaires pour plantes médicinales ont fait l'objet d'études théorique et expérimentales. Le chapitre suivant concerne la modélisation et la simulation d'un séchoir modulaire partiellement solaire fonction en convection forcée.

CHAPITRE 2

MODELISATION DU SYSTEME DE SECHAGE

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons un prototype de séchoir solaire et son fonctionnement. Ce séchoir a été conçu et réalisé (voir Annexe G pour plus de détails), suite à une étude effectuée au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) sur le séchage des produits aromatiques et médicinales (PAM). Nous présentons ensuite les équations qui régissent les transferts dans l'insolateur et le séchoir puis nous rappelons les expressions des coefficients de transfert de chaleur et de masse mis en jeu dans les équations de transfert. Nous présentons l'organigramme de calcul et nous définissons les paramètres mis en jeu dans le fonctionnement du système de séchage.

2.2. Description

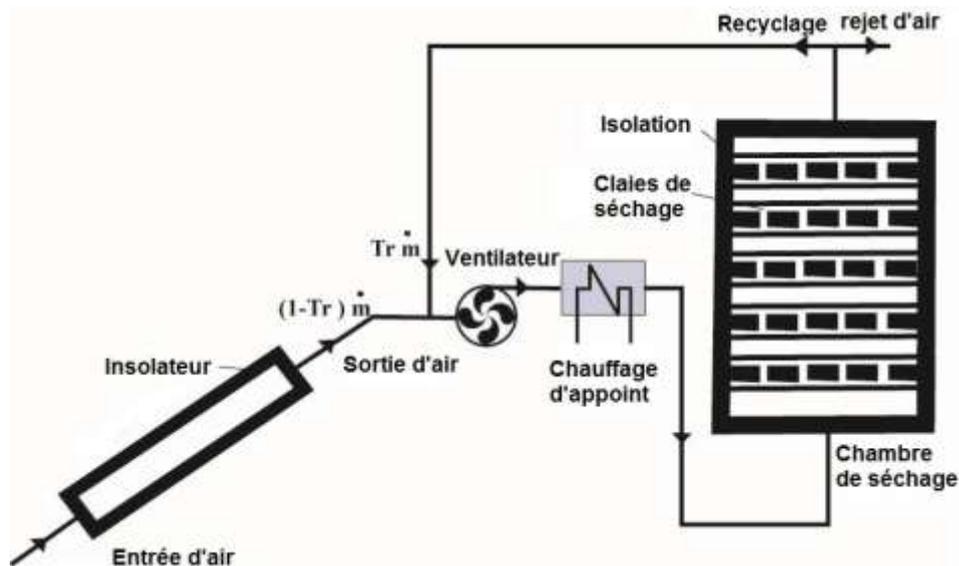


Figure 2.1 : Représentation schématique du système de séchage [57].

Le système de séchage est composé d'une armoire dans laquelle sont disposées cinq claies, un insolateur, un ventilateur et une source de chauffage auxiliaire avec un régulateur de température (figure.2.1.).

- Insolateur : c'est un insolateur plan à air (Long = 2 m, Larg = 1 m), incliné d'un angle ($\beta = 40^\circ$) par rapport à l'horizontale. Il comporte en partant de la

face avant: une couverture externe constituée d'un vitrage, d'épaisseur $e_v=4$ mm, d'un absorbeur en tôle galvanisé noircie d'épaisseur (1,5 mm). Les distances entre l'absorbeur et la couverture et l'absorbeur et l'isolant sont égales à (0,025 m). L'air caloporteur circule par convection forcée au dessous de l'absorbeur. La face arrière et les faces latérales sont isolées par de la mousse de polyuréthane d'épaisseur $e_{is}=0.04$ mm.

- Armoire de séchage : l'armoire de séchage est une enceinte parallélépipédique ($L_s = 0,93$ m, $l_s = 0,65$ m, Hauteur = 1,9 m) dont les parois sont constituées de mousse de polyuréthane expansée pris en sandwich entre deux tôles d'acier; les épaisseurs de l'isolant et des tôles sont respectivement égales à 0,06 m et 1,5 mm. Les produits à sécher sont placées sur des claies, distance de 0,2 m, coulissantes sur des rails. Le fluide asséchant, sortant de l'insolateur, est admis par le bas du séchoir à la température T_{sc} .

2.3. Principe de fonctionnement

L'air chaud fourni par l'insolateur est véhiculé à travers une canalisation de section circulaire ($\phi = 90$ mm) à la partie inférieure de la chambre de séchage et s'écoule par convection forcée vers la partie supérieure du séchoir. La température de l'air est ajustée à une température constante T_{reg} , avec la source de chauffage conventionnel. Lorsque l'humidité relative de l'air à la sortie de l'enceinte de séchage est faible, l'air fourni par l'insolateur est mélangé avec une partie de l'air asséchant sortant du séchoir.

2.4. Modélisation

2.4.1. Hypothèses générales

Nous posons les hypothèses simplificatrices suivantes couramment admises:

- Les différents milieux solides sont à une température uniforme dans le plan perpendiculaire à l'écoulement de l'air;
- La voûte céleste se comporte comme un corps noir;
- La température du sol est égale à la température ambiante;
- L'air est parfaitement transparent au rayonnement solaire et son inertie thermique est négligeable;
- Le séchage se déroule sans réaction chimique;

- Les pertes thermiques dans les conduits de liaison sont négligées;
- Les propriétés thermiques de l'air et du produit sont constantes dans la gamme de température considérée;
- Les feuilles du produit à sécher sont à une température et à une teneur en eau uniformes ;
- Le vent est supposé souffler parallèlement aux faces de l'insolateur.

2.4.2. Méthodologie

L'insolateur et le séchoir sont décomposés en tranche fictives perpendiculaires à la direction de l'écoulement d'air. Sur la base des hypothèses ci-dessus; les équations régissant les transferts de chaleur et de masse dans l'insolateur et la chambre de séchage sont déduites de la méthode nodale et d'un bilan énergétique établi pour les divers composants d'une tranche fictive de l'insolateur ou du séchoir, considérée comme une entité indépendante des autres.

De façon, générale, la variation instantanée de la quantité de chaleur dans une tranche du modèle d'insolateur et de l'armoire de séchage est égale à la somme algébrique des flux de chaleur échangés dans cette tranche. Elle s'écrit :

$$m_j C_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial t} = \sigma_{sj} + \sum_{k=1}^n S_{j-k} \left(h_{r,j-k} + h_{c,j-k} + h_{d,j-k} \right) (T_k - T_j) \quad (2.1)$$

Avec $h_{r,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les milieux j et k ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

$h_{c,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre les milieux j et k ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

$h_{d,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par conduction entre les milieux j et k ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

σ_{sj} : Densité du flux de chaleur absorbé par le milieu j (W.m^{-2})

S_k : Aire de la surface d'échange du milieu k relative à une tranche de l'insolateur ou de l'armoire de séchage de (m^2)

Nous allons par la suite appliquer l'équation (2.1) aux différents milieux du système de séchage (voir annexe F pour plus de détails).

2.4.3. Equations de transferts

- Insolateur

L'application de l'équation (1) aux divers milieux de l'insolateur conduit aux systèmes d'équations suivants :

Vitrage

- Face externe

$$m_v C p_v \left(\frac{\partial T_{ve}}{\partial t} \right) = \alpha_v \rho_s S_v + h_{r,ve-ciel} S_v \triangleq (T_{ciel} - T_{ve}) + h_{r,ve-sol} S_v (T_{sol} - T_{ve}) + h_{c,ve-a} S_v \triangleq (T_{am} - T_{ve}) + h_{d,ve-vi} S_v (T_{vi} - T_{ve}) \quad (2.2)$$

- Face interne

$$m_v C p_v \left(\frac{\partial T_{vi}}{\partial t} \right) = h_{r,vi-p} S_v (T_p - T_{vi}) + h_{d,vi-ve} S_v (T_{ve} - T_{vi}) + h_{d,p-vi} S_v (T_p - T_{vi}) \quad (2.3)$$

Air stagnant

$$T_{f_gap} = \frac{T_{vi} + T_p}{2} \quad (2.4)$$

Absorbeur

$$m_p C p_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial t} \right) = \tau_v \tau_a \alpha_p \rho_s S_p + h_{r,p-vi} S_p (T_{vi} - T_p) + h_{r,p-isi} S_p (T_{isi} - T_p) + h_{c,p-f} S_p (T_f - T_p) + h_{d,p-vi} S_p (T_{vi} - T_p) \quad (2.5)$$

Air

$$\dot{m}_f C p_f (T_f - T_f^*) = S_{f-p} h_{c,f-p} (T_p - T_f) + S_{f-insi} h_{c,f-insi} (T_{isi} - T_f) \quad (2.6)$$

Isolant

- Face interne

$$m_{is} C p_{is} \left(\frac{\partial T_{isi}}{\partial t} \right) = h_{r,isi-p} S_{is} (T_p - T_{isi}) + h_{c,isi-f} S_{is} (T_f - T_{isi}) + h_{d,isi-ise} S_{is} (T_{ise} - T_{isi}) \quad (2.7)$$

- Face externe

$$m_{is} C p_{is} \left(\frac{\partial T_{ise}}{\partial t} \right) = h_{r,ise-sol} S_{is} (T_{sol} - T_{ise}) + h_{c,ise-a} S_{is} (T_{am} - T_{ise}) + h_{d,ise-isi} S_{is} (T_{isi} - T_{ise}) \quad (2.8)$$

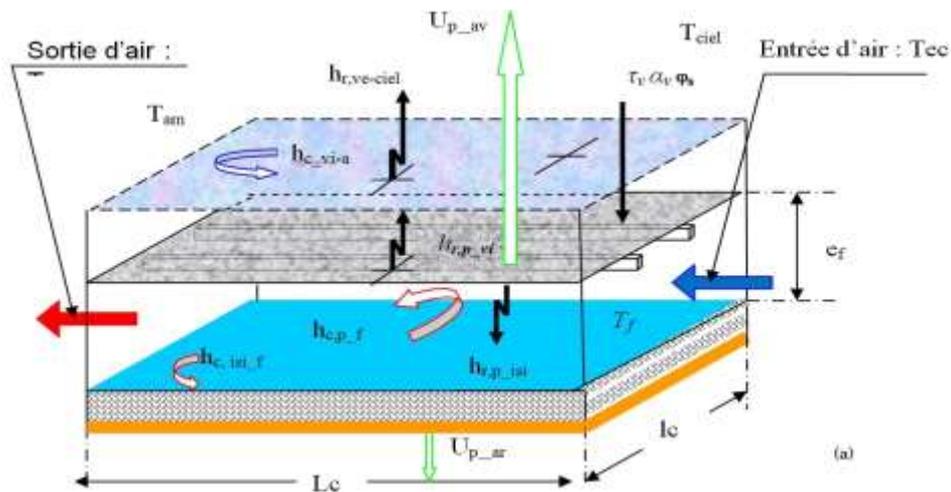


Figure 2.2 (a) : Représentation schématique de l'insolateur et des coefficients de transferts

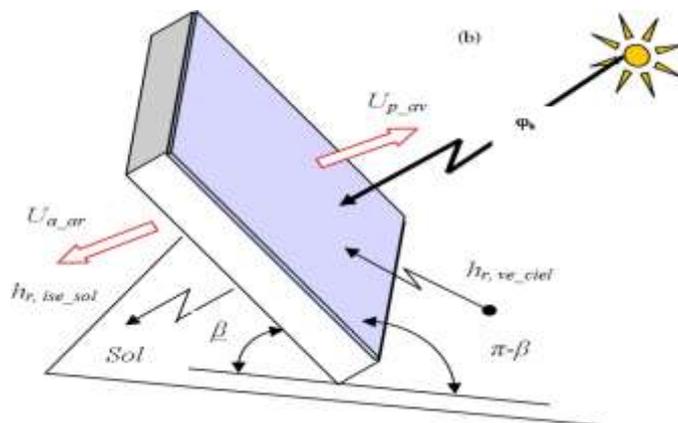


Figure 2.2 (b) : Représentation schématique de l'insolateur et des coefficients de transferts.

Armoire de séchage

De façon similaire à l'insolateur, l'application de l'équation (1) conduit à :

Air

$$\dot{m}_f C_{pf} (T_f(j) - T_f(j-1)) = P_{ev} + h_{c,f-pr} e_{pr} S_{pr} (T_f(j) - T_{pr}(j)) + h_{c,f-wi} S_w (T_f(j) - T_{wi}(j)) \quad (2.9)$$

j : numéro de la tranche

Paroi

- Face interne

$$m_w C_{pw} \left(\frac{\partial T_{wi}}{\partial t} \right) = h_{c,wi-f} S_w (T_f - T_{wi}) + h_{d,wi-we} S_w (T_{we} - T_{wi}) \quad (2.10)$$

- Face externe

$$m_w C_{pw} \left(\frac{\partial T_{we}}{\partial t} \right) = h_{r,we-ciel} S_w (T_{ciel} - T_{we}) + h_{r,we-sol} S_w (T_{sol} - T_{we}) + h_{d,we-wi} S_w (T_{wi} - T_{we}) + h_{c,we-a} S_w (T_{am} - T_{we}) \quad (2.11)$$

Produit

$$m_{pr} C_{p_{pr}} \left(\frac{\partial T_{pr}}{\partial t} \right) = h_{cv,pr-f} e_{pr} S_{pr} (T_f - T_{pr}) - P_{ev} \quad (2.12)$$

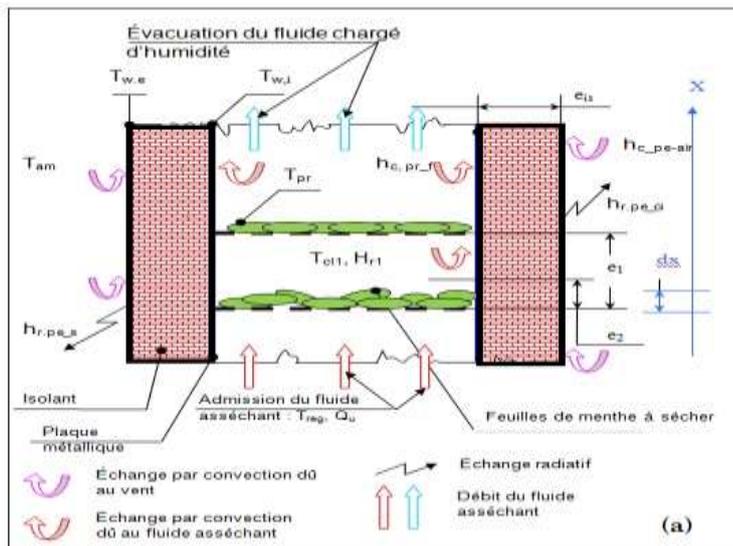


Figure 2.3 (a et b) : Coupe transversale de l'armoire de séchage et présentation des différents coefficients de transfert et disposition de feuilles de menthe

2.5. Coefficients de transfert de chaleur

2.5.1. Coefficients de transfert de chaleur par conduction

Pour une configuration plane

$$h_d = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (2.13)$$

2.5.2. Coefficients de transfert de chaleur par convection

- Effet du vent

Parmi les relations permettant le calcul du coefficient d'échange de chaleur entre une paroi plane et l'air en mouvement sous l'action du vent, nous avons choisi celle proposé par Adams [23].

$$h_{c_vent} = 5,67 + 3,86 V_{vent} \quad (2.14)$$

- Coefficients de transfert de chaleur par convection forcée

Le coefficient d'échange par convection forcée est défini par :

$$h_c = \frac{Nu \lambda_f}{D_H} \quad (2.15)$$

Avec

$$D_H = \frac{4S}{p} \quad (2.16)$$

Les trois groupements adimensionnels suivants permettent de caractériser les échanges thermiques par convection forcée :

$$Gz = Re Pr \frac{D_H}{L} \quad (2.17)$$

$$\text{Avec } Pr = \frac{\mu_a C_{pa}}{\lambda_a} \quad (2.18)$$

$$Re = \frac{V_f D_H}{\nu_f} \quad (2.19)$$

La littérature reporte pour le nombre de Nusselt de nombreuses corrélations parmi lesquelles nous avons choisi:

Insolateur (Entre les faces des parois de l'absorbeur et de l'isolant et l'air caloporteur)

- Régime laminaire ($Re < 2100$)

$$Nu = 3,66 + 0,085 \frac{Gz}{1 + 0,047 Gz^{2/3}} \quad Gz < 100 \quad (2.20)$$

$$Nu = 1,86 Gz^{1/3} + 0,87 (1 + 0,015 Gz^{1/3}) \quad Gz > 100 \quad (2.21)$$

- Régime transitoire ($2100 < Re < 10000$)

$$Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left[1 + (D_H / L)^{2/3} \right] \quad (2.22)$$

- Régime turbulent ($Re > 10000$)

$$Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0,33} \quad (2.23)$$

Armoire de séchage :

Entre les faces de la paroi interne de l'armoire de séchage et l'air asséchant :

- Régime laminaire $Re < 10^5$

$$Nu = 0,66 P_r^{1/3} Re_{wi}^2 \quad (2.24)$$

- Régime turbulent $Re > 10^5$

$$Nu = 0,0366 P_r^{1/3} Re_{pi}^{4/5} \quad (2.25)$$

- Coefficient de transfert de chaleur entre l'air asséchant et le produit

$$h_{cv, f - pr} = 8,69 \cdot 10^4 \dot{m}_f^{1.3} \quad (2.26)$$

Les feuilles de menthe disposées sur la claie sont assimilables à un milieu poreux. La vitesse à la traversée de la couche de feuille de menthe est donnée par l'expression suivante :

$$V_{pr} = \frac{V_f}{P_o} \quad (\text{a}) ; \quad P_o = \frac{V_{total} - V_{tot-feuilles}}{V_{total}} \quad (\text{b}) \quad (2.27\text{a,b})$$

$$\text{Avec : } V_{total} = L_{cl} \cdot l_{cl} \cdot ep_f, \quad V_{tot-feuilles} = N_T \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot ep_f$$

l_1, l_2, ep_f : longueur, largeur et épaisseur d'une feuille de menthe,

N_T : nombre totale de feuille de mentale sur une claie.

La porosité P_o de ce milieu est définie par le rapport entre le volume du parallélépipède formé par la claie et l'épaisseur de la couche de feuilles de menthe diminué du volume total des feuilles de menthe disposées sur une claie et le volume de ce parallélépipède.

2.5.3. Coefficients de transfert de chaleur par rayonnement

$$h_{r,i-j} = \sigma I_{i-j} (T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2) \quad (2.28)$$

$$\text{Entre l'isolant et l'absorbeur: } \mathfrak{F}_{p-isi} = \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{is}} - 1 \right]^{-1} \quad (2.29)$$

$$\text{Entre la couverture et l'absorbeur: } \mathfrak{F}_{p-vi} = \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (2.30)$$

$$\text{Entre la couverture et la voûte céleste: } \mathfrak{F}_{v-ciel} = \frac{1}{2} \varepsilon_v (1 + \cos \beta) \quad (2.31)$$

$$\text{Entre l'isolant de l'insolateur et le sol : } \mathfrak{F}_{is-sol} = \frac{1}{2} \varepsilon_{is} (1 - \cos \beta) \quad (2.32)$$

$$\text{Entre la couverture et le sol } \mathfrak{F}_{ve-sol} = \frac{1}{2} \varepsilon_v (1 - \cos \beta) \quad (2.33)$$

$$\text{Entre la face externe de l'armoire de séchage et le sol : } \mathfrak{F}_{we-sol} = \varepsilon_w \quad (2.34)$$

$$\text{Entre la face externe de l'armoire de séchage et la voûte céleste:} \quad (2.35)$$

$$\mathfrak{F}_{r,we-ciel} = \varepsilon_w$$

Pour évaluer la température équivalente, T_{ciel} assimilé à un corps noir, nous utilisons la relation suivante proposée par SWINBANK [58].

$$\text{Température équivalente de la voûte céleste } T_{ciel} = 0,0552T_{am}^{1,5} \quad (2.36)$$

Avec T_{am} : température ambiante (K)

2.6. Paramètres mis en jeu dans le fonctionnement du système de séchage

2.6.1. Insolateur

- La densité du flux solaire absorbé par la vitre :

$$\varphi_v = \varphi_{dir} \alpha_{dir,v} + \varphi_{dif} \alpha_{dif,v} \quad (2.37)$$

- La densité du flux solaire absorbé par l'absorbeur :

$$\varphi_p = \alpha_p \frac{\varphi_{dir} \tau_{dir} + \varphi_{dif} \tau_{dif}}{1 - (1 - \alpha_p) \tau_{dir}} \quad (2.38)$$

Pour ne pas alourdir le texte, nous renvoyons le lecteur à l'annexe B pour la détermination des différents coefficients d'absorption et de transmission qui dépendent des propriétés physiques et optiques du matériau.

La quantité globale de chaleur solaire (Q_{so}) captée, pendant une période de temps donnée, par la surface A_c de l'insolateur est déterminée à partir de l'expression suivante :

$$Q_{so} = \int_0^{t_s} \varphi_{so} A_c dt \quad (2.39)$$

La quantité de chaleur (Q_u) emportée par l'air sortant des insolateurs est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$Q_u = \int_0^t \dot{m}_f \cdot C p_f \cdot (T_{sc} - T_{ec}) \cdot dt \quad (2.40)$$

2.6.2. Armoire de séchage

Le pouvoir évaporatoire moyen (P_{em}) est la quantité moyenne d'eau évaporée lors du séchage. Si M_i et M_f désignent les masses du produit respectivement avant et après l'opération de séchage et t_s représente la durée de cette opération en heures. Il vérifie l'expression suivante :

$$P_{em} = \frac{m_i - m_f}{t_s} \text{ (kg / h)} \quad (2.41)$$

La chaleur latente massique d'évaporation de l'eau libre ne dépend que de la température de la surface du produit. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_v = 2.54.10^6 - 2909.9 T_{vp} \quad (2.42)$$

La masse d'eau évaporée par unité de temps \dot{m}_{eau} et la chaleur latente massique d'évaporation de l'eau du produit L_v étant connues; le flux massique d'eau évaporé (\dot{m}_{ev}) s'écrit :

$$- \dot{m}_{ev} = L_v \dot{m}_{eau} \quad (2.43)$$

$$- \text{Quantité de chaleur d'évaporation : } Q_{ev} = \int_0^{t_s} \dot{m}_{ev} . dt \quad (2.44)$$

- Quantité de chaleur nécessaire au séchage :

$$- Q_L = \int_0^{t_s} \dot{m}_f . C_{pf} . (T_{reg} - T_{ss}) . dt \quad (2.45)$$

- Quantité de chaleur récupérée par le recyclage d'une partie de l'air sortant du séchoir :

$$- Q_{rec} = T_R \int_0^{t_s} \dot{m}_f C_{pf} (T_{ss} - T_{am}) dt \quad (2.46)$$

- Avec : T_R : taux de recyclage de l'air asséchant

- Quantité de chaleur rejetée dans l'ambiance :

$$Q_{rec} = (1 - T_R) \int_0^{t_s} \dot{m}_f C_{pf} (T_{ss} - T_{am}) dt \quad (2.47)$$

- Quantité de chaleur fournie par la source auxiliaire:

$$Q_{aux} = \int_0^{t_s} \dot{m}_f C_{p_f} (T_{reg} - T_m) dt \quad (2.48)$$

T_m : Température de mélange d'air de l'insolateur et du recyclage

Pour calculer la quantité de chaleur fournie par la source auxiliaire, le bilan enthalpique a été établi pour le mélange d'air chauffé provenant de la sortie de l'insolateur et l'air recyclé à partir de la sortie de la chambre de séchage. En supposant que le mélange s'effectue de façon adiabatique, il vient :

$$- \dot{m}_m h_m(T_m, w_m) = \dot{m}_c h_c(T_{sc}, w_c) + \dot{m}_{rec} h_{rec}(T_{rec}, w_{rec}) \quad (2.49)$$

Soit :

$$T_m = \frac{\dot{m}_c h_c T_{sc} + \dot{m}_{rec} h_{rec} T_{rec}}{\dot{m}_c h_c + \dot{m}_{rec} h_{rec}} = \frac{(1-T_R) h_c T_{sc} + T_R h_{rec} T_{rec}}{(1-T_R) h_c + T_R h_{rec}} \quad (2.50)$$

Avec : $h_c = 0,24 + 0,46W_c$ et $h_{rec} = 0,24 + 0,46W_{rec}$

-

- Quantité de chaleur totale fournie au séchoir :

$$Q_t = \int_0^{t_s} \dot{m}_f C_{p_f} (T_{reg} - T_{am}) dt \quad (2.51)$$

- Quantité de chaleur perdue par l'armoire de séchage :

$$Q_p = Q_t - Q_{ev} \quad (2.52)$$

2.7. Rendements

- Rendement thermique de l'insolateur : $\eta_c = \frac{Q_u}{Q_s} 100$ (2.53)

- Rendement de séchage : $\eta_s = \frac{Q_{ev}}{Q_u + Q_{aux}}$ (2.54)

- Rendement total d'évaporation : $\eta_{ev-t} = \frac{Q_{ev}}{Q_t}$ (2.55)

- Rendement d'évaporation : $\eta_{ev} = \frac{Q_{ev}}{Q_l}$ (2.56)

2.8. Autres grandeurs caractéristiques du fonctionnement de séchoir

- Taux de couverture solaire : $f = \frac{Q_u}{Q_u + Q_{aux}}$ (2.57)

- Rendement de séchage : $\eta_s = \frac{Q_{ev}}{Q_u + Q_{aux}}$ (2.58)

- Fraction de la quantité de chaleur totale captée par l'insolateur.

- $f' = \frac{Q_u}{Q_t}$ (2.59)

- Taux de couverture conventionnelle : $\omega_{aux} = \frac{Q_{aux}}{Q_{aux} + Q_u} 100$ (2.60)

- Fraction de la quantité de chaleur totale fournie par la source

auxiliaire : $\omega'_{aux} = \frac{Q_{aux}}{Q_t}$ (2.61)

- Fraction de la quantité de chaleur économisée : $J = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_t}$ (2.62)

- Taux de la quantité chaleur de chaleur recyclée: $\omega_{rec} = \frac{Q_{rec}}{Q_t} 100$ (2.63)

- Taux de la quantité chaleur rejetée : $\omega_r = \frac{Q_r}{Q_t} 100$ (2.64)

2.9. Discrétisation des équations

Les équations (2.2 - 2.8 et 2.9 - 2.12) sont discrétisés par une méthode implicite aux différences finies. Cette méthode, basée sur un développement en série de Taylor, permet de transformer ces équations en un système d'équations algébriques.

Insolateur

- Face externe du vitrage

$$m_v C p_v \left(\frac{T_{ve}^{t+\Delta t}(j) - T_{ve}^t(j)}{\Delta t} \right) = \alpha_v \varphi_v S_v + h_{r,ve-ciel} S_v (T_{ciel} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) +$$

$$+ h_{r,ve-sol} S_v (T_{sol} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) + h_{c,ve-a} S_v (T_{am} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) + h_{d,ve-vi} S_v (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_{ve}^{t+\Delta t}(j)) \quad (2.65)$$

- Face interne du vitrage

$$m_v C p_v \left(\frac{T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{r,vi-p} S_v (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j)) +$$

$$+ h_{c,vi-p} S_v (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{d,vi-ve} S_v (T_{ve}^{t+\Delta t}(j) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j)) \quad (2.66)$$

Air stagnant

$$T_{f-gap}^{t+\Delta t}(j) = \frac{T_{vi}^{t+\Delta t}(j) + T_p^{t+\Delta t}(j)}{2} \quad (2.67)$$

Absorbeur

$$m_p C p_p \left(\frac{T_p^{t+\Delta t}(j) - T_p^t(j)}{\Delta t} \right) = \tau_v \tau_a \alpha_p \varphi_s S_p + h_{r,p-vi} S_p (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_p^{t+\Delta t}(j)) +$$

$$h_{r,p-isi} S_p (T_{isi}^{t+\Delta t}(j) - T_p^{t+\Delta t}(j)) + h_{c,p-vi} S_p (T_{vi}^{t+\Delta t}(j) - T_p^{t+\Delta t}(j)) + h_{c,p-f} S_p (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_p^{t+\Delta t}(j)) \quad (2.68)$$

Air

$$\dot{m}_f C p_f (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j-1)) = h_{c,f-p} S_p (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j)) +$$

$$+ h_{c,f-isi} S_{is} (T_{isi}^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j)) \quad (2.69)$$

- Face interne de l'isolant

$$m_{is} C p_{is} \left(\frac{T_{isi}^{t+\Delta t}(j) - T_{isi}^t(j)}{\Delta t} \right) = h_{r,isi-p} S_{is} (T_p^{t+\Delta t}(j) - T_{isi}^{t+\Delta t}(j)) +$$

$$+ h_{c,isi-f} S_{is} (T_f^{t+\Delta t}(j) - T_{isi}^{t+\Delta t}(j)) + h_{d,isi-ise} S_{is} (T_{ise}^{t+\Delta t}(j) - T_{isi}^{t+\Delta t}(j)) \quad (2.70)$$

- Face externe de l'isolant

$$\begin{aligned}
m_{is} C_{p_{is}} \left(\frac{T_{ise}^{t+\Delta t}(j) - T_{ise}^t(j)}{\Delta t} \right) &= h_{r,ise-sol} S_{is} \left(T_{sol} - T_{ise}^{t+\Delta t}(j) \right) \\
+ h_{c,ise-a} S_{is} \left(T_m - T_{ise}^{t+\Delta t}(j) \right) &+ h_{d,ise-isi} S_{is} \left(T_{isi}^{t+\Delta t}(j) - T_{ise}^{t+\Delta t}(j) \right)
\end{aligned} \tag{2.71}$$

Armoire de séchage

Air

$$\begin{aligned}
\dot{m}_f C_{p_f} \left(T_f^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j-1) \right) &= P_{ev} + h_{cv,f-pr} S_{pr} e_{pr} \left(T_{pr}^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j) \right) + \\
+ h_{c,f-wi} S_w \left(T_{wi}^{t+\Delta t}(j) - T_f^{t+\Delta t}(j) \right)
\end{aligned} \tag{2.72}$$

- Paroi interne

$$\begin{aligned}
m_w C_{p_w} \left(\frac{T_{wi}^{t+\Delta t}(j) - T_{wi}^t(j)}{\Delta t} \right) &= h_{c,wi-f} S_w \left(T_f^{t+\Delta t}(j) - T_{wi}^{t+\Delta t}(j) \right) + \\
+ h_{d,wi-we} S_w \left(T_{we}^{t+\Delta t}(j) - T_{wi}^{t+\Delta t}(j) \right)
\end{aligned} \tag{2.73}$$

- Paroi externe

$$\begin{aligned}
m_w C_{p_w} \left(\frac{T_{we}^{t+\Delta t}(j) - T_{we}^t(j)}{\Delta t} \right) &= h_{r,we-ciel} S_w \left(T_{ciel} - T_{we}^{t+\Delta t}(j) \right) + h_{r,we-sol} S_w \left(T_{sol} - T_{we}^{t+\Delta t}(j) \right) + \\
+ h_{c,we-a} S_w \left(T_a - T_{we}^{t+\Delta t}(j) \right) &+ h_{d,we-wi} S_w \left(T_{wi}^{t+\Delta t}(j) - T_{we}^{t+\Delta t}(j) \right)
\end{aligned} \tag{2.74}$$

Produit

$$m_{pr} C_{p_{pr}} \left(\frac{T_{pr}^{t+\Delta t}(j) - T_{pr}^t(j)}{\Delta t} \right) = S_{pr} h_{cv,pr-f} e_{pr} \left(T_f^{t+\Delta t}(j) - T_{pr}^{t+\Delta t}(j) \right) - P_{ev} \tag{2.75}$$

2.10. Méthodologie numérique

Les systèmes d'équations algébriques (2.65 - 2.75) sont écrits sous la forme matricielle $[A] \vec{X} = \vec{B}$ et résolus par la méthode DIABLO SABLIER couplée à un calcul itératif parce que les coefficients de transfert; notamment ceux par rayonnement, sont fonction des températures des différents milieux qui sont à l'instant $t + \Delta t$ des inconnues. Ainsi, pour mener à bien ces calculs, les coefficients de transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont calculés à l'instant $t + \Delta t$ en attribuant aux températures des différents milieux considérés une valeur arbitraire prise égale à la température ambiante. La résolution de ces systèmes d'équations algébriques conduit à de nouvelles valeurs de la température des milieux considérés. Les valeurs sont comparées aux valeurs arbitraires; si l'écart relatif entre les valeurs calculées et les valeurs arbitraires est supérieure à une précision donnée ($\varepsilon_p = 5.10^{-2}$), les valeurs des températures calculées remplacent la valeur arbitraire et la procédure de calcul décrite ci-dessus est reprise jusqu'à ce que la précision souhaitée soit atteinte. La température de l'air dans la tranche considérée est ensuite calculée et est considérée comme égale à la température de l'air à l'entrée de la tranche suivante. La procédure de résolution est décrite par les organigrammes H1 et H2, présentés dans l'annexe H

2.11. Conclusion

Après avoir décrit le mode de fonctionnement du séchoir modulaire, nous avons établie les équations qui régissent des transferts dans l'insolateur et l'armoire de séchage puis défini certaines grandeurs caractéristiques qui permettent de décrire le comportement thermique et dynamique du séchoir. Ensuite, nous avons présenté la méthode numérique retenue pour résoudre ces équations. Dans le chapitre suivant, nous présentons la partie expérimentale sur le séchage solaire de feuilles de Menthe (MENTHA SPICATA) et nous établissons notamment la courbe caractéristique de séchage du produit.

CHAPITRE 3

ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous élaborerons une « carte d'identité » caractérisant les feuilles de menthe composée de ses propriétés thermodynamiques, des conditions optimales de séchage et de stockage. Enfin, nous analysons des résultats de la cinétique et du retrait lors du séchage afin d'établir les caractéristique de séchage des feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*) dans la modélisation développé au chapitre 2. L'une des finalités de cette modélisation est de mieux appréhender les paramètres liés au séchage et de prédire le comportement thermique et dynamique d'un système de séchage modulaire en vue d'une optimisation du séchage des feuilles de la menthe dans le séchoir solaire modulaire.

3.2. Menthe



Figure 3.1: Photo de feuilles et de fleurs de menthe (*MENTHA SPICATA*) [59]

Définition	La menthe verte (<i>Mentha spicata</i> L.) est une plante vivace de la famille des Lamiacées (labiacées, labiées), du genre <i>Mentha</i> cultivée comme plante aromatique.
Variétés courantes	Menthe frisée ou menthe crépue, Menthe poivrée, Menthe nana, MENTHA SPICATA, Menthe à feuilles rondes, Menthe verte, Menthe douce, Menthe en épi....
Localisation	Lieux humides, ensoleillés à semi-ombragés
Description	Plante vivace herbacée très courante dans les jardins. Elle peut atteindre 60 cm de hauteur. Elle est pourvue de stolons qui assurent sa multiplication, ce qui peut la rendre envahissante. Le feuillage est habituellement vert profond mais les jeunes feuilles sont généralement plus claires. Ces feuilles sont dites lancéolées et leurs bords sont en dents de scie; elles portent des glandes sécrétant une essence, le menthol, dans une bonne proportion. Les fleurs sont généralement rosées, voire blanches, se réunissent en épi et apparaissent en été.
Usage	Utilisée en tisane et en infusion, la menthe a une place de choix dans la culture orientale. En effet, le fameux thé à la menthe est concocté en laissant infuser environ 100 feuilles de menthe fraîche par litre. Elle est également utilisée dans de nombreuses applications culinaires, comme les sauces, ainsi que dans des préparations asiatiques. Comme toutes les menthes, elle a des propriétés aromatiques (toniques, fortifiantes) et des propriétés digestives (combat les lourdeurs, les ballonnements, les gaz). Antispasmodique, la menthe était considérée autrefois comme une panacée grâce à l'action bactéricide du menthol.
Parties utilisées	Les feuilles principalement.

Tableau 3.1 : Menthe [44]

3.3 Etude hygroscopique des feuilles de menthe menthe (MENTHA SPICATA)

3.3.1 Matériel

Les feuilles de menthe sont cultivées sur place dans la région d'Alger. Chaque plante possède des caractéristiques qui lui sont propres. Le dispositif expérimental utilisé dans les expériences de sorption est présenté dans les figures (3.2) et (3.3). Nous avons à notre disposition 3 bains thermo statés (étuve) muni d'un régulateur de température (30 °C , 40 °C et 50 °C) qui contiennent une série de six bocaux de un litre remplis au quart environ de solutions de sels saturés comportant un porte échantillon sur lequel est placé $0,3 \pm 0,005$ g de feuille de menthe.

3.3.2 Mode opératoire

Nous avons opté pour la méthode gravimétrique statique pour déterminer les isothermes d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe. Cette méthode est basée sur l'utilisation de solutions de sels saturées qui maintiennent constante l'humidité relative. Les sels utilisés sont KOH, $(MgCl_2, 6H_2O)$, K_2CO_3 , $NaNO_3$, KCl et $(BaCl_2, 2H_2O)$ (tableau 3.2). Ces sels ont des activités de l'eau variant de 0,05 à 0,9 [45].

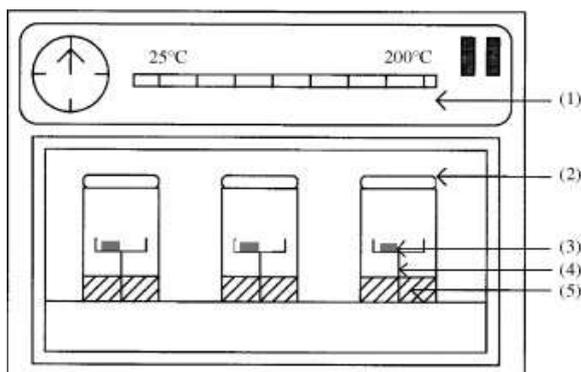


Figure 3.2: Dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption - méthode statique gravimétrique : (1) Étuve Thermostatique, (2) bocal contenant du sel, (3) échantillon, (4) porte-échantillon, (5) solution saturée de sel. [60]

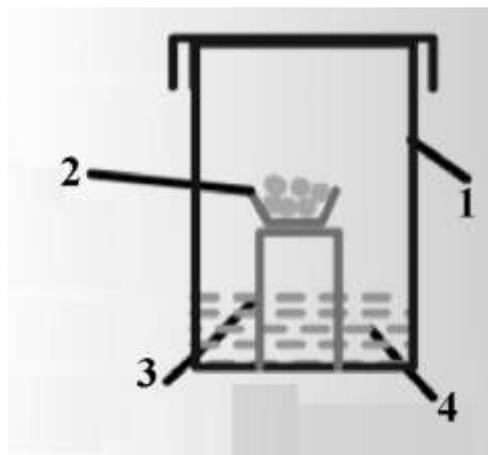


Figure 3.3: Bocal d'échantillon (1) bocal à fermeture étanche, (2) : béccher contenant le produit, (3): porte-échantillon (tube en PVC), (4) : solution saline. . [60]

3.3.3 Préparation des échantillons

On réalise deux expériences qui dépendent de la nature de l'échantillon initial :

- la désorption : l'échantillon initial n'a subi aucun traitement préalable, le produit va perdre de l'eau, (utilisation de la menthe fraîche)
- l'adsorption : l'échantillon initial est placé à l'étuvage pendant 6 h à 105°C pour perdre la totalité de l'eau libre, le produit absorbe de l'eau pendant l'expérience.

On lance deux expériences qui vont durer environ 10 jours pour la désorption et 12 jours pour l'adsorption (On effectue les mesures jusqu'à l'équilibre hygroscopique).

Solutions salines	Activités 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

Tableau : 3.2: Valeurs standards des activités de l'eau (a_w : définie en annexe D) des six sels saturés utilisés pour la détermination des courbes de sorption [61].

3.3.4 Protocole expérimental

Nous pesons tous les 48 heures les échantillons contenus dans les bocaux jusqu'à l'obtention de l'équilibre thermodynamique. Nous calculons ainsi la teneur en eau à l'équilibre pour chaque humidité relative. Il est à noter que la moisissure se forme sur les échantillons pour les humidités élevées: KCl et BaCl₂. La mesure à l'équilibre ne doit pas prendre en compte ces corps étrangers.

3.3.5 Précision sur les mesures effectuées

La détermination des isothermes de sorption nécessite la connaissance de trois grandeurs : la température, l'humidité relative et la teneur en eau. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre de précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pour les sels utilisés, l'incertitude sur l'humidité relative est comprise entre 0,5 et 1,5%. Enfin, la balance qui permet de peser chaque échantillon, a une précision de $\pm 0,001\text{g}$.

3.4 Résultats expérimentaux

Nous obtenons trois isothermes de désorption et trois isothermes d'adsorption. Celles-ci ont une allure sigmoïdale de type II (voir annexe E, typologie des courbes de sorption) comme celles présentées communément par les produits agroalimentaires et les plantes aromatiques et médicinales.

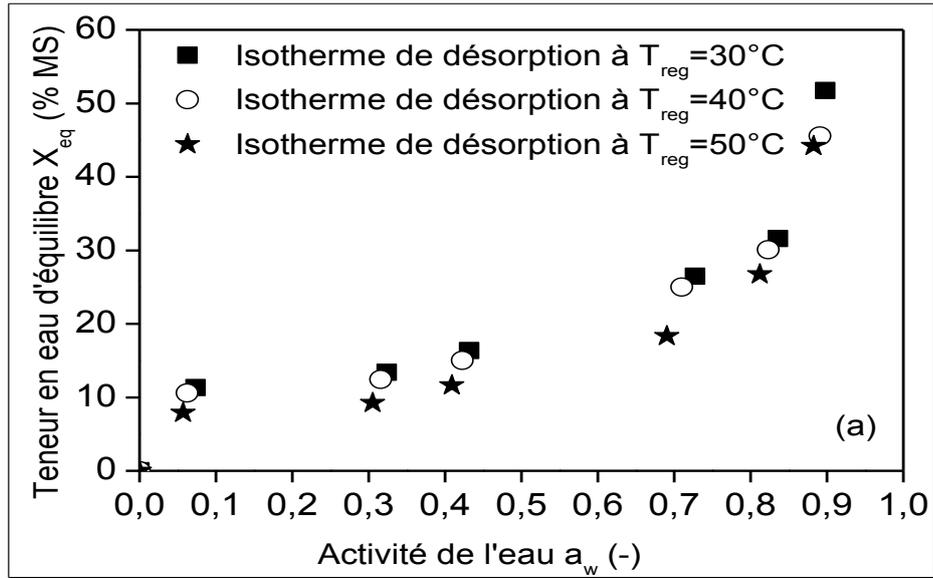


Figure 3.4 (a) : Isothermes de désorption des feuilles de menthe

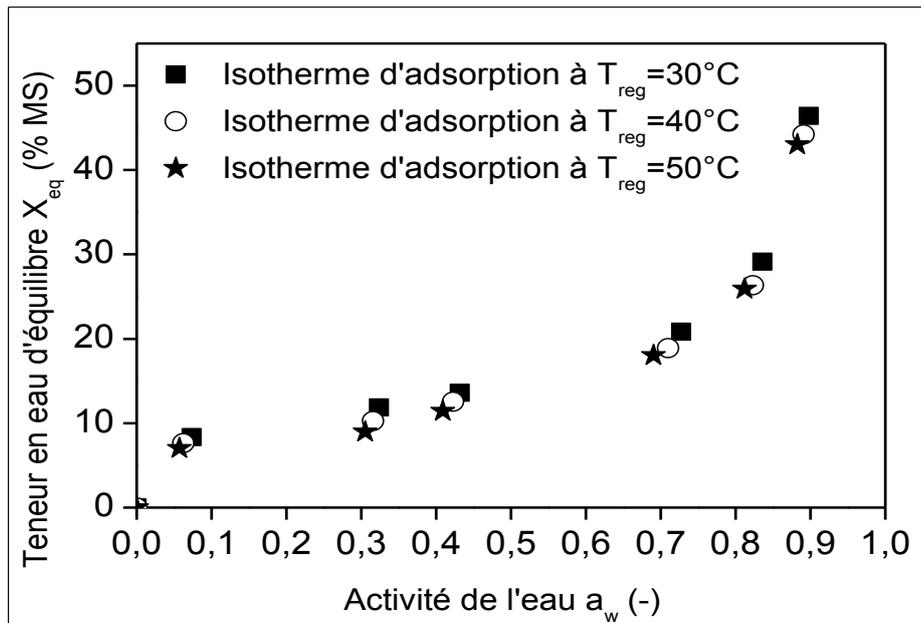


Figure 3.4 (b) : Isothermes d'adsorption des feuilles de menthe

Les courbes obtenues montrent que pour une même activité de l'eau, la teneur en eau d'équilibre augmente quand la température diminue.

3.4.1 Phénomène d'Hystérésis

Le phénomène d'hystérésis est observé pour les isothermes de sorption-désorption des feuilles de menthe à 40 °C (figure 3.5). Les feuilles de menthe présentent un phénomène d'hystérésis de type H2 (annexe E).

En effet, les courbes de désorption et d'adsorption de ces produits montrent que pour une même valeur de l'activité de l'eau, la teneur en eau de désorption est supérieure à celle d'adsorption. Pour une même humidité relative constante, la teneur en eau de désorption est supérieure à celle de l'adsorption. Ici, cette différence s'accroît lorsque l'humidité relative augmente. Cette caractéristique est plus ou moins visible chez toutes les plantes aromatiques et médicinales (voir annexe E pour plus de détails sur la typologie des courbes de sorption). Différentes hypothèses sont émises pour expliquer le phénomène d'hystérésis. L'une d'elle est une analogie avec une éponge. En effet, lorsque l'on essaye de mouiller en totalité une éponge, il est nécessaire de l'écraser pour vider les pores de l'air qu'elles emprisonnent. Il en est ainsi chez les feuilles de menthe. Lorsque les pores ne contiennent plus d'eau, l'adsorption ne permet pas de récupérer la totalité de l'eau initiale (car celle-ci emprisonne de l'air dans les pores).

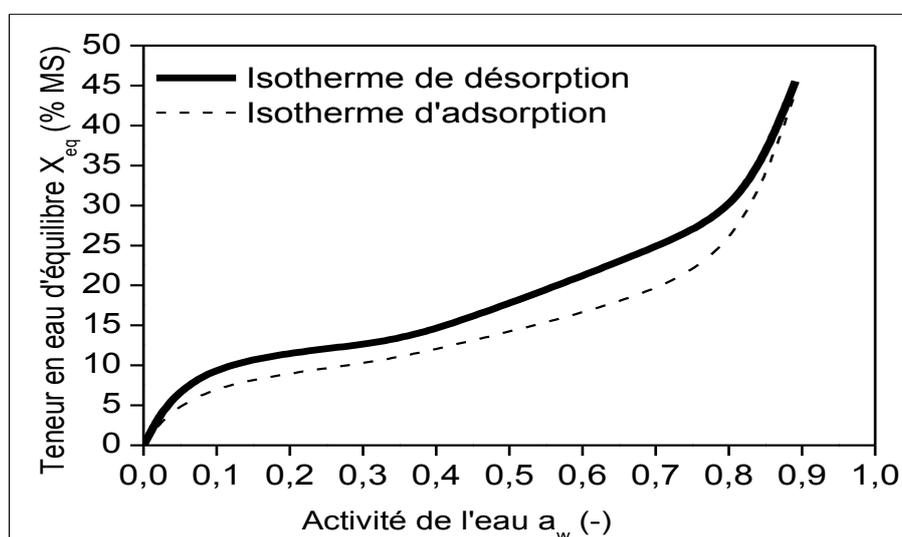


Figure 3.5 : Hystérésis entre les isothermes d'adsorption et de désorption des feuilles de la menthe (MENTHA SPICATA) à 40 °C

3.4.2 Conditions optimales de conservation des feuilles de menthe

L'étude des isothermes de sorption nous permet de connaître l'humidité relative optimale d'équilibre pour la conservation d'un produit ainsi que la teneur

en eau d'équilibre à atteindre en fin de séchage. L'ensemble des points expérimentaux sont rassemblés sur un même graphique, on peut alors modéliser l'isotherme de sorption par un polynôme du 3ème degré de l'activité de l'eau (a_w). Une partie proche de l'horizontalité correspond à la zone de meilleure stabilité du produit.

On cherche le point d'inflexion sur la partie horizontale de la courbe modélisée des isothermes de sorption (figure 3.6) pour déterminer les conditions optimales de séchage. A cet endroit, une faible variation de l'humidité relative donnera lieu à une variation de la teneur en eau infime.

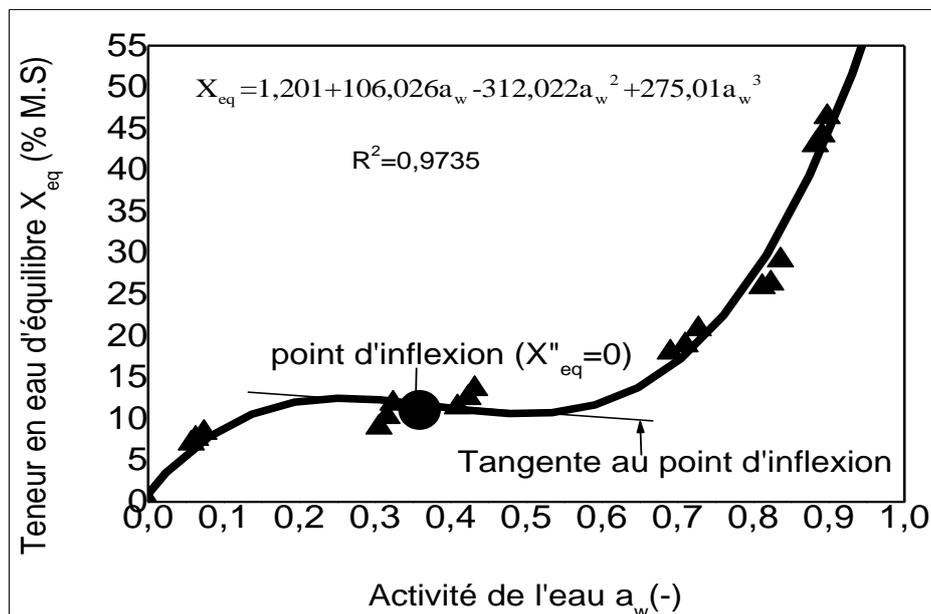


Figure 3.6 : Courbe montrant l'activité optimale de l'eau de conservation de la menthe (MENTHA SPICATA)

Condition optimale de conservation de la menthe

$$X_{eq} = 1,201 + 106,026a_w - 312,022a_w^2 + 275,01a_w^3 \quad (3.1)$$

Cette courbe fournit deux indications sur les feuilles de Menthe :

- L'humidité relative optimale d'équilibre (il faut se situer près de cette valeur d'humidité relative pour conserver le produit sans détérioration)

$$a_w = 0,359 \quad (3.2)$$

- La teneur en eau d'équilibre à obtenir en fin de séchage.

$$X_{eq} = 1,191 + 105,926(0.36) - 311,679(0.36)^2 + 274,99(0.36)^3 \quad (X_{eq} \cong 11,9 \%) \quad (3.3)$$

3.5. Modélisation des isothermes de sorption

Dans ce travail, nous avons étudié en détail cinq modèles mathématiques utilisés pour modéliser les isothermes de sorption des feuilles de Menthe (MENTHA SPICATA). Afin de déterminer le meilleur modèle (les modèles de corrélation sont présentés en annexe E), il nous faut calculer et comparer des paramètres statistiques pour chaque modèle. Le principe de la méthode des moindres carrés est appliqué à chaque modèle par rapport aux paramètres à identifier. Le coefficient de corrélation reste le premier critère d'ajustement. L'algorithme de Levenberg-Marquardt utilisé par les logiciels CurveExpert V.3.1 et Origin V.8.0 propose le choix de l'erreur systématique moyenne ESM et de l'erreur relative moyenne EMR pour critères d'ajustement.

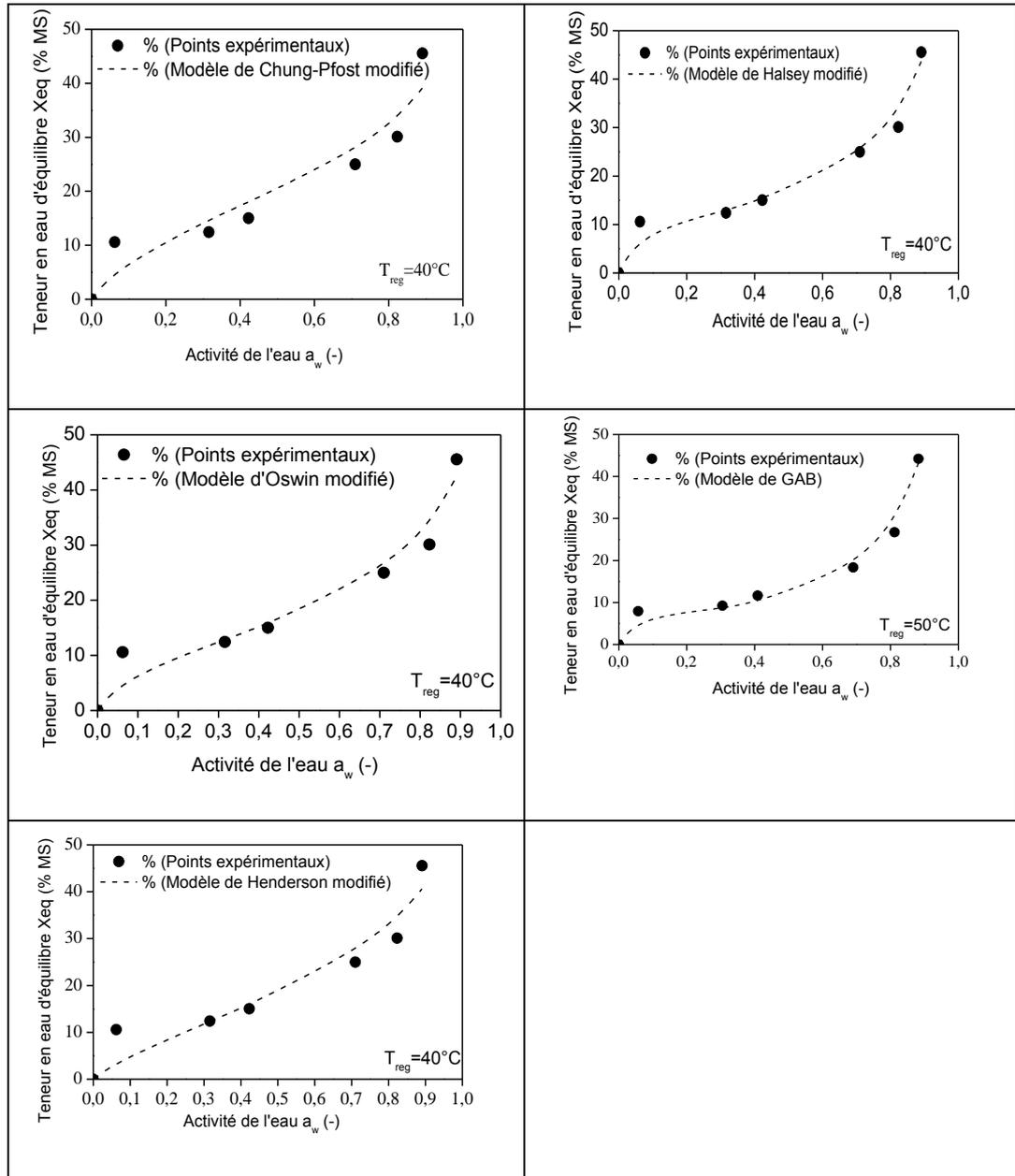


Figure 3.7 : Isothermes de désorption des feuilles de la menthe (MENTHA SPICATA) décrites par cinq modèles de lissage.

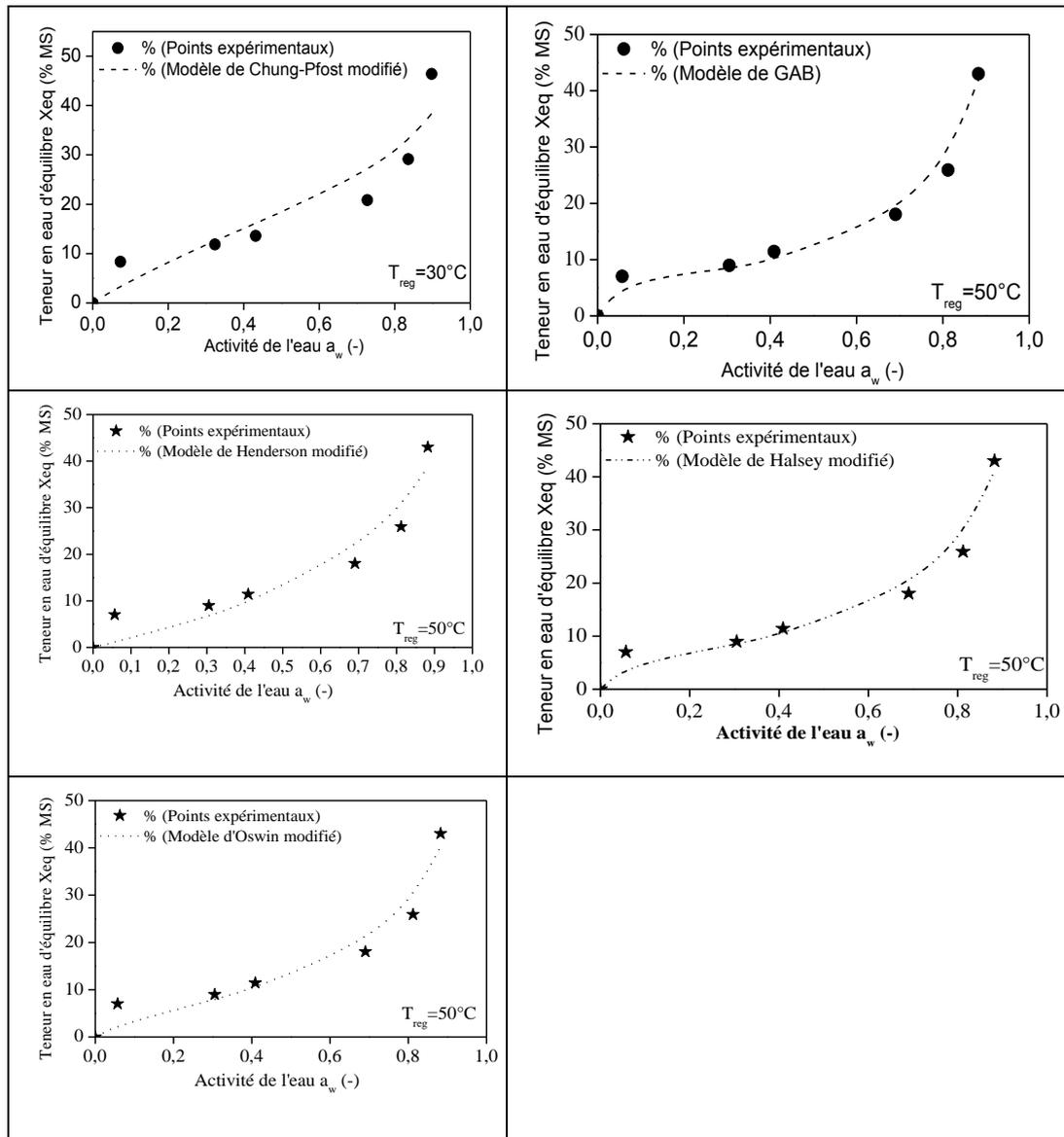


Figure 3.8 : Isothermes d'adsorption des feuilles de la menthe décrites par cinq modèles de lissage

Une simple analyse des cinq modèles mathématiques montre que le modèle de (GAB) optimise bien le lissage des points expérimentaux. C'est donc l'équation de GAB que nous utiliserons pour modéliser les isothermes de désorption des feuilles de menthe. Ce modèle repose sur une théorie de l'adsorption multimoléculaire localisée homogène.

3.6. Propriétés thermodynamiques

L'exploitation des isothermes de sorption nous permet de déterminer certaines propriétés thermodynamiques du produit ; à savoir la chaleur

isostérique ou enthalpie différentielle de sorption, l'entropie différentielle de sorption, la température isocinétique.

3.6.1 Chaleur isostérique

L'évolution en fonction de la teneur en eau d'équilibre de la chaleur d'adsorption et de celle de désorption des feuilles de menthe est représentée sur la figure (3.9). Cette figure montre que la chaleur isostérique de sorption est élevée lorsque la teneur en eau d'équilibre est faible (< 8 à 15%). La chaleur isostérique est plus importante pour les faibles teneurs en eau, ce qui illustre la forte liaison de l'eau avec le substrat. La quantité de chaleur nécessaire à la désorption est supérieure à celle de l'adsorption. A des teneurs en eau d'équilibre faibles, il faudra donc fournir moins d'énergie aux feuilles de menthe pour adsorber de l'eau que pour en perdre.

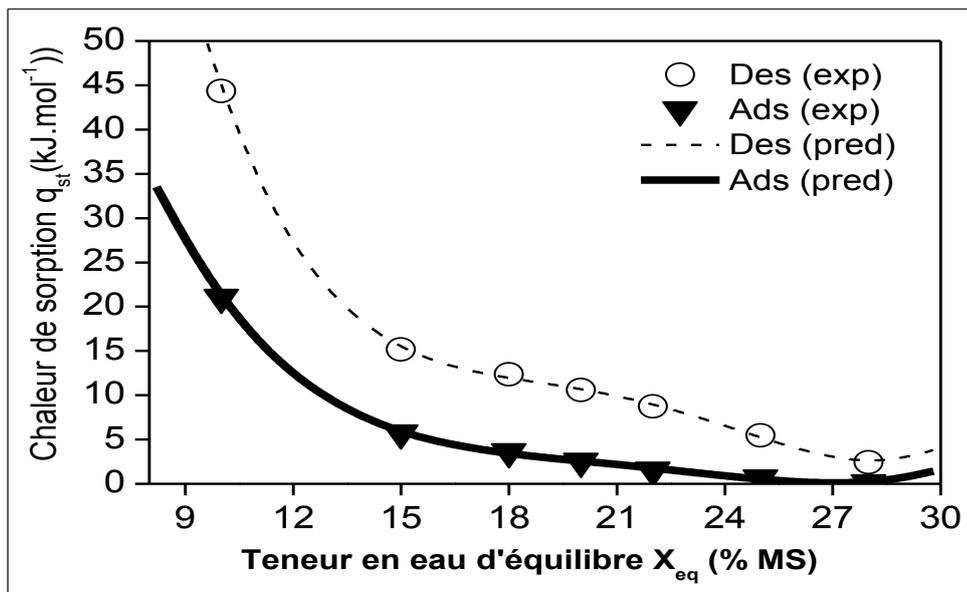


Figure 3.9 : Chaleur isostérique nette d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les expressions de la chaleur isostérique de désorption et d'adsorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre sont données par les fonctions polynômiales suivantes:

Menthe	Fonctions polynômiales	R^2
Désorption	$q_{st} = 428,981 - 79,035X_{eq} + 5,615X_{eq}^2 - 0,176X_{eq}^3 + 0,002X_{eq}^4$	0.983
Adsorption	$q_{st} = 193,584 - 34,595X_{eq} + 2,385X_{eq}^2 - 0,074X_{eq}^3 + 8,476 \cdot 10^{-4}X_{eq}^4$	0.978

Tableau 3.3 : Chaleur isostérique de désorption et d'adsorption

3.6.2 Entropie différentielle de sorption de feuilles de menthe

La figure 3.10 illustre l'entropie différentielle d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau d'équilibre

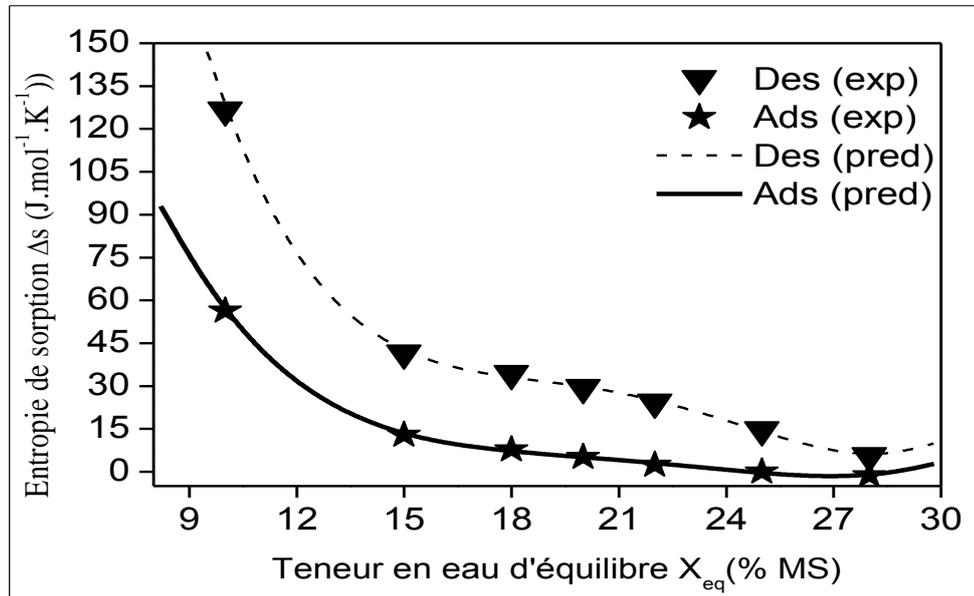


Figure 3.10 : Entropie différentielle d'adsorption et de désorption des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

3.6.3 Théorie de compensation

Ayant déterminé la chaleur isostérique et l'entropie de sorption pour différentes teneurs en eau d'équilibre, il nous suffit alors de trouver la relation linéaire qui les lie. La figure (3.11) montre la variation de l'enthalpie d'adsorption en fonction de l'entropie de désorption de la menthe (Théorie de compensation enthalpie/entropie).

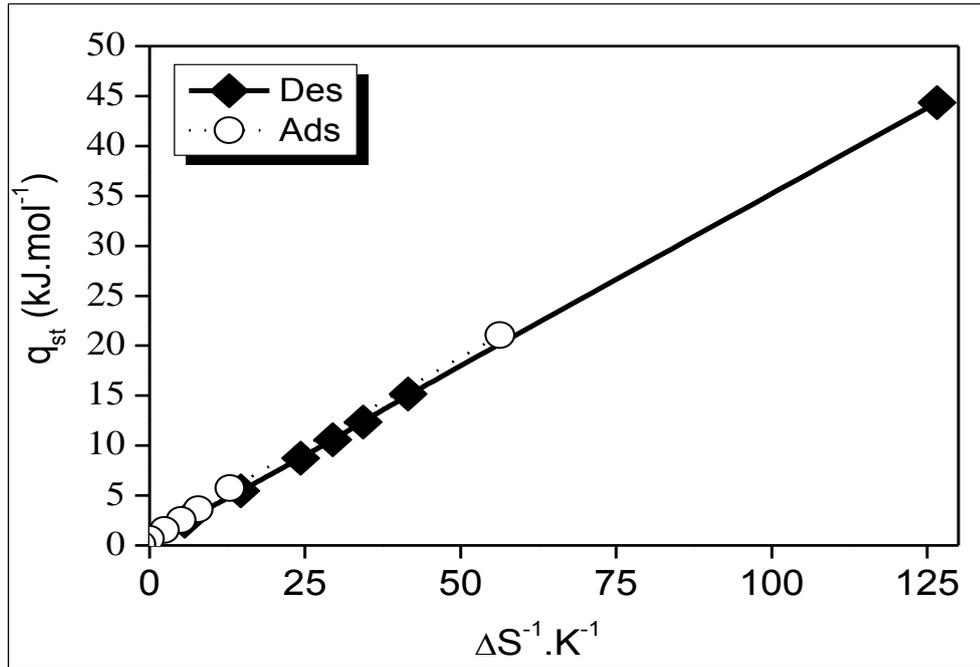


Figure 3.11 : Variation de l'enthalpie d'adsorption en fonction de l'entropie de désorption des feuilles de menthe (Théorie de compensation enthalpie/entropie)

	T_{β} (K) (désorption)	T_{β} (K) (adsorption)	ΔG_{β} (J.mol ⁻¹) (désorption)	ΔG_{β} (J.mol ⁻¹) (adsorption)
Menthe	346,91	362,01	438,01	736,03

Tableau 3.4 : Valeurs de la température isocinétique et de l'énergie libre lors de l'adsorption et de la désorption

La température isocinétique est la température à laquelle toutes les réactions procèdent au même taux. L'énergie libre de Gibbs nous donne une information sur le processus de sorption (celui-ci est spontané si $\Delta G_{\beta} < 0$). Dans le cas des feuilles de menthe, la sorption n'est pas spontanée. On peut calculer la température harmonique moyenne des expériences :

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{T}} \quad (3.4)$$

Ici, $n=3$ et $T=30, 40$ et 50°C (soit $303\text{ K}, 313\text{ K}$ et 323 K) d'où, $T_{hm}=313\text{ K}$.

On a $T_{hm} < T_{\beta}$, donc ce sont les considérations enthalpiques qui influent sur la réactivité.

3.7. Influence du retrait durant le séchage

Après avoir obtenu expérimentalement les isothermes de sorption/désorption de feuilles de menthe, nous déterminons l'évolution de la teneur en eau réduite, de la vitesse de séchage, de la forme et des dimensions des feuilles de menthe lors du séchage, le coefficient de diffusivité effective. Nous élaborons des relations empiriques, pour exprimer le de retrait au cours du séchage entre les feuilles fraîches et ces mêmes feuilles après le séchage, en fonction de leur teneur en eau, de la durée de séchage, etc.

3.7.1. Préparation des échantillons

Une botte de menthe fraîche (200 g), achetée au marché local a été nettoyée en enlevant les tiges et les déchets indésirables, comme indiqué dans l'organigramme du processus (figure 3.13). L'excès d'eau est éliminé à l'aide de serviettes en papier, les feuilles endommagées ou de couleur noire sont enlevées. Les feuilles de menthe ont été uniformément réparties en couches minces sur la claie du séchoir. Pour l'étude du retrait lors du séchage, nous avons choisi un échantillon composé de (12) feuilles de menthe qui pèse environ 5g (figure 3.12), L'épaisseur des feuilles de menthe a été mesurée en utilisant un micromètre mécanique (précision : 0,01 mm).



Figure 3.12 : Feuilles de menthe fraîche.

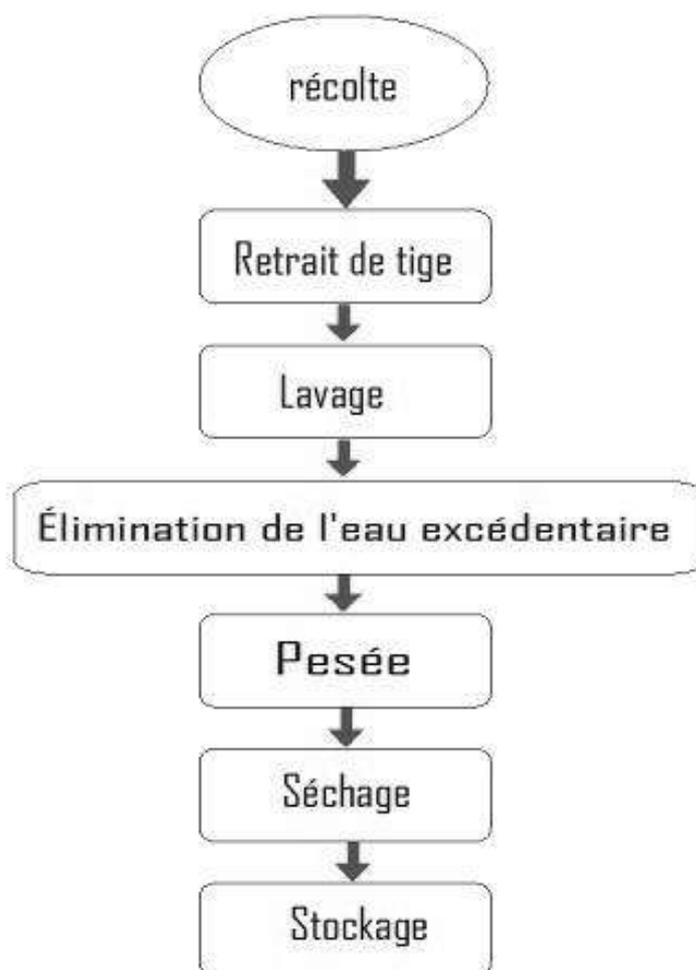


Figure 3.13 : Organigramme des traitements avant séchage.

3.7.2. Etude expérimentale

Nous allons désormais nous intéresser au séchage de feuilles de menthe. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, il est nécessaire de fournir une énergie (de la chaleur) au produit pour qu'il perde de l'eau. Il existe différentes techniques de séchage, dans le cas idéal pour obtenir de meilleurs résultats il faut utiliser un séchoir à conditions contrôlés (température et débit de l'air asséchant, humidité relative de l'air ambiant), mais vu l'indisponibilité de ce type de dispositifs nous avons opté pour le séchoir solaire à convection forcée réalisé au CDER, (séchage par entraînement d'air chaud) (voir annexe G, séchoir solaire modulaire réalisé au CDER). Le séchage d'une couche mince de feuille de menthe dans ce séchoir modulaire a été utilisé également pour mesurer les effets du séchage sur le retrait en surface et la détermination de la relation entre le retrait en surface et la teneur en eau des feuilles de menthe. Un système d'acquisition d'images comprenant un

appareil photo USB, d'un ordinateur portable Acer et de logiciels a été mis au point pour capturer et traiter les images. Tous les paramètres liés à la forme (surface, périmètre, les diamètres majeur et mineur des feuilles de menthe) sont déterminés à partir des photos obtenues avec l'appareil photo numérique et traitées par le logiciel de traitement d'images. Dans chaque expérience, 12 feuilles de menthe ont été placée sur un tissu perforé de couleur blanc attaché à une claie dans la chambre de séchage pour enregistrer le retrait de séchage en enregistrant des photos. Pendant le séchage, l'échantillon a été contrôlé en permanence et les images des feuilles de menthe ont été capturées par un appareil photo numérique de précision. Une fois le séchage terminé, la valeur des surfaces liée à la forme a été déterminée par des logiciels de traitement d'images (Photoshop et ImageJ).

3.7.3. Protocole expérimental

- Les feuilles de menthe (environ 20 grammes) sont déposées sur une claie suspendue par un fil à une balance de précision.
- Nous avons utilisé un chauffage d'appoint électrique pour réguler la température de l'air asséchant à l'entrée du séchoir.
- Pour suivre la perte de poids du produit au cours du séchage, nous avons effectué les mesures de poids chaque 10 minutes puis 20 minutes et 30 minutes à l'aide d'une balance de précision 0,01g.
- Nous avons mesuré l'humidité relative de l'air à l'extérieur du séchoir pour chaque test à l'aide d'un hygromètre de sensibilité $\pm 2\%$.
- Nous réalisons l'opération de séchage pour 3 températures 40 °C, 50 °C et 60 °C et deux débits d'air asséchant: $0,035 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
- L'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction du produit pour assurer une meilleure stabilité des conditions de séchage
- Pour déterminer la masse sèche M_s , le produit séché est ensuite introduit dans une étuve réglée à 105 °C jusqu'à déshydratation maximale du produit. La teneur en eau du produit à un instant t est calculée par la relation :

$$X(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (3.5)$$

- L'expérience de séchage est arrêtée lorsque trois mesures successives de la masse de la claie affichent une différence de l'ordre de 0,01 g.
- Les tests de séchage ont été visualisés au cours du séchage par un appareil photographique et 6 LED connectés à un ordinateur portable Acer Intel Pentium, 4 Go de RAM, Disque Dur 1 To, Windows 8.

Il faut savoir que l'expérience de séchage est terminée lorsque nous avons atteint la teneur en eau finale X_f du produit déterminée grâce aux isothermes de sorption (ici, $X_f \approx 12\%$ (voir paragraphe conditions optimales de conservation)). Il s'agit d'une valeur pour laquelle le produit garde ses huiles essentielles et les réactions de dégradation de la couleur et des arômes sont ralenties. La durée de séchage est donc le temps nécessaire pour sécher le produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée.

3.7.4. Paramètres mesurés et images photos

- Mesure des températures

A l'aide d'un thermocouple Chromel-Alumel (type K) de diamètre $d=1$ mm et de précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$, la température à l'entrée de la chambre de séchage est mesurée durant toute l'expérience de séchage. Les essais sont réalisés pour quatre températures d'air asséchant 40°C , 50°C , 60°C , 70°C . Le choix de ces températures est dû à plusieurs raisons. Pour des températures inférieures à 40°C . Il faut plus de dix huit heures pour que le produit soit totalement séché. Puisque nous nous intéressons à exploiter l'énergie solaire, le séchage dans ce domaine de température est exclu à cause de la durée d'ensoleillement qui est inférieure à la durée nécessaire de séchage. Pour des températures supérieures à 60°C , le produit séché devient brun ce qui caractérise plusieurs dégradations au niveau des constituants majeurs du produit séché (colorant, arômes, sucres, etc.).

- 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 à touches sensibles de précision $\pm 2\%$, calibrée pour des ambiances à humidité réduite ce qui permet de mesurer directement l'humidité moyenne de l'air.

- 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 $\pm 0,2 \text{ m.s}^{-1}$.

- Acquisition des photos de feuilles de menthe

Les photos ont été réalisées avec un appareil photo canon EOS 7d mark II Professional, caractéristiques (Type CMOS 22,4 × 15 mm, Environ 20,9 millions de pixels, Système EOS de nettoyage intégré).

3.7.5. Modélisation du retrait lors du séchage

Le retrait est défini comme une réduction de la taille du volume, de la surface ou de l'épaisseur du produit (feuille de menthe).

Le volume du retrait (volume réduit) du produit séché est formulé comme suit [53].

$$S = \frac{V}{V_0} \quad (3.6)$$

Dans cette étude, le retrait du produit est supposé uniforme (isotrope) de sorte que la diminution de l'épaisseur soit proportionnelle à la réduction des dimensions de la surface.

Les relations entre la surface, l'épaisseur et le volume réduit sont :

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^{3/2} \quad (3.8)$$

Le retrait est supposé idéale (total), c'est-à-dire la diminution du volume subie par le produit est proportionnelle ou égale au volume de l'eau évaporé, ce qui explique que le volume réduit est une fonction linéaire de la teneur en eau réduite.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = A + B_1 X + B_2 X^2 \quad (3.9)$$

En combinant les équations (3.7), (3.8) et (3.9), nous obtenons l'équation (3.10); cette équation est utile pour calculer la longueur du rétrécissement d'une feuille de menthe.

$$L(M) = L_0(A + B_1 X + B_2 X^2) \quad (3.10)$$

3.8. Résultats et discussion

L'épaisseur et la surface moyennes sont respectivement égales à 0,025 mm et 7,037 cm² (tableau 3.5). Un logiciel de traitement d'image obtenue par un appareil photo numérique (canon EOS 7d mark II Professional) a été utilisé pour déterminer les caractéristiques des surfaces des feuilles de menthe. L'épaisseur de ces feuilles est plus ou moins constante, mais la surface spécifique varie entre 4,885 cm² et 9,506 cm² en raison de la largeur et de la forme ovale de ces feuilles. La longueur moyenne des feuilles de menthe a été utilisée pour déterminer le coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation des feuilles de menthe lors d'un séchage convectif.

Echantillon	Epaisseur (cm)	Surface (cm ²)
1	0.028	5,994
2	0.024	9,506
3	0.026	7,442
4	0.028	8,218
5	0.026	6,847
6	0.027	7,03
7	0.025	7,678
8	0.024	4,885
9	0.023	5,098
10	0.026	6,992
11	0.026	7,055
12	0.025	7,708
moyenne	0.025	7,037

Tableau 3.5 : Dimensions de feuilles de menthe

3.8.1. Cinétiques de séchage

Les expériences de séchage se sont déroulées pendant les mois de Juin/Juillet 2008 pour les feuilles de la menthe, Les courbes sont obtenues avec une bonne reproductibilité des expériences (figure 3.14).

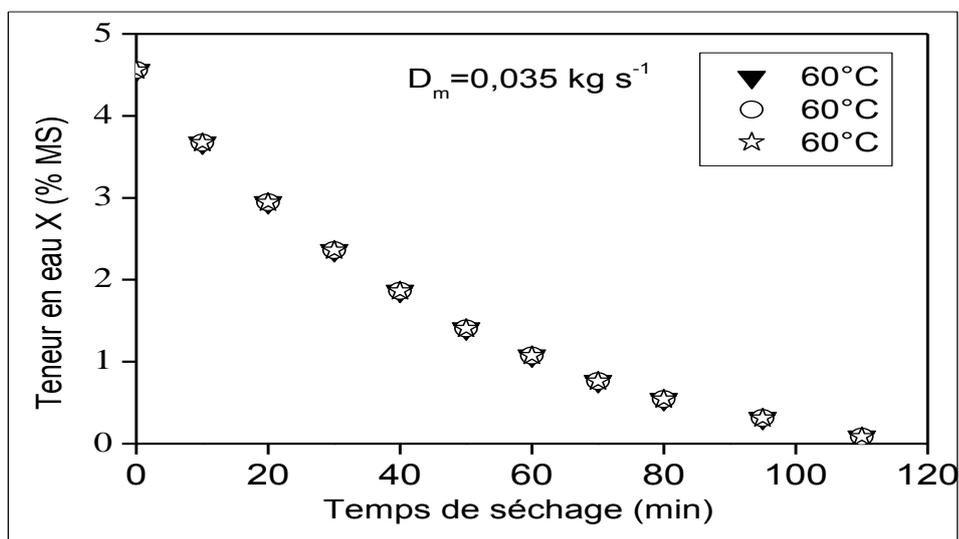


Figure 3.14 : Essais de reproductibilité de la cinétique de séchage des feuilles de menthe

Nous commençons d'abord par donner les conditions expérimentales dans lesquelles nous avons opéré. Ces conditions sont présentées dans le tableau (3.6). La figure (3.15) montre le produit frais et celui séché à 50°C.

Test	D_m (kg s^{-1})	$T_{\text{reg}} \pm 0.1^\circ\text{C}$	$H_r \pm 2\%$	t (min)
1	0.035	40	50-40	365
2	0.035	50	40-30	225
3	0.035	60	30-25	110
4	0.035	70	25-20	60
5	0.07	40	50-40	257
6	0.07	50	40-30	182
7	0.07	60	30-25	60
8	0.07	70	25-20	40

Tableau 3.6 : Valeurs des grandeurs caractéristiques de l'air asséchant pour chaque test expérimental



Figure 3.15 : Photo d'une Feuille de Menthe fraîche et séchée.

Les courbes de séchage recherchées décrivent l'évolution, en fonction du temps, de la teneur en eau du produit X ou de la vitesse de séchage ($-dX/dt$) ou de la teneur en eau X. Ainsi, pour déterminer la courbe caractéristique de séchage (C.C.S.), nous analysons d'une part, l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps et d'autre part, l'influence de quelques paramètres de l'air asséchant (vitesse et température) sur la courbe de séchage. Les figures (3.16), (3.17) et (3.18) représentent les courbes de perte de poids (courbes de séchage) pour plusieurs valeurs de la température et du débit massique de l'air asséchant. On constate que les paramètres aérothermiques ont une influence déterminante sur l'allure de séchage.

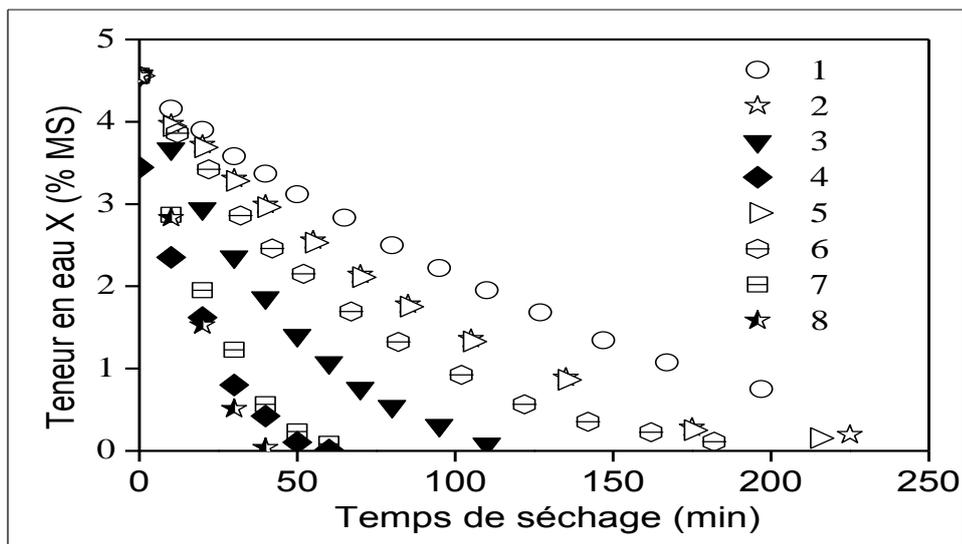


Figure 3.16 : Evolution au cours du temps de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant

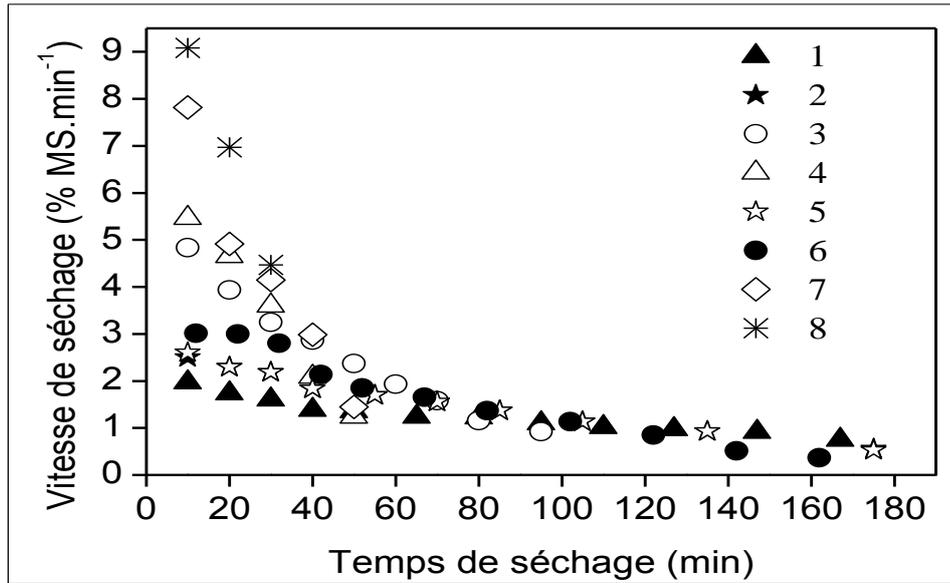


Figure 3.17: Evolution au cours du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant

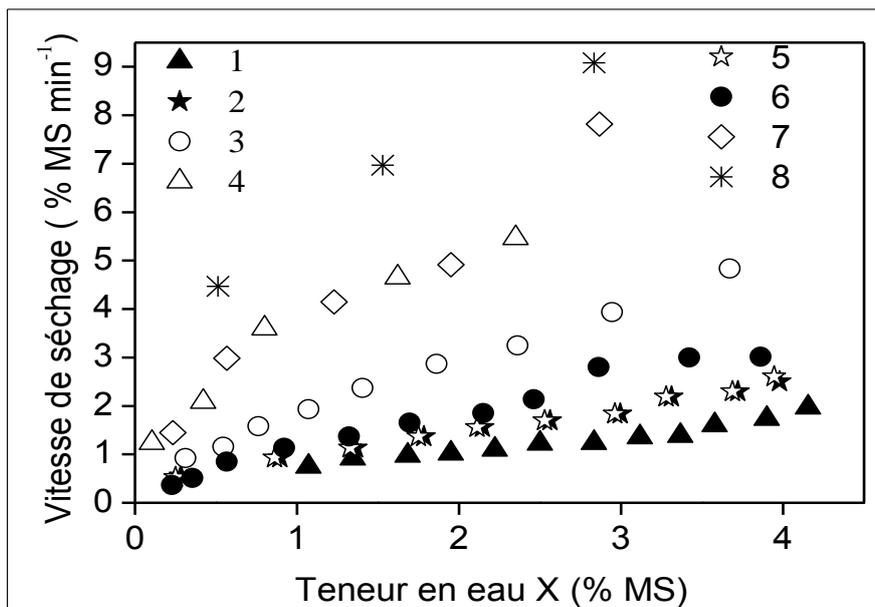


Figure 3.18 : Evolution de la vitesse de séchage des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau. Influence de la température et du débit massique de l'air asséchant

3.8.2. Influence de la température de l'air asséchant

Pour étudier l'influence de la température de l'air asséchant sur la cinétique de séchage de la menthe, nous avons procédé à des essais expérimentaux en

faisant varier la température de l'air asséchant de 40 °C à 70 °C tout en maintenant son débit massique constant ($Dm = 0,035 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0,07 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

Les figures (3.19), (3.20), (3.21) et (3.22), décrivent respectivement l'évolution, en fonction du temps, de la teneur en eau et de la vitesse de séchage pour différentes températures et différents débits massiques d'air asséchant. Ces courbes montrent à l'évidence que pour nos conditions expérimentales, il n'existe pas de phase de séchage à allure constante.

À la lumière de ces résultats, la température de l'air asséchant semble bien être le paramètre le plus influent sur les cinétiques de séchage. Ce résultat est confirmé par les travaux de [54]. En effet, la cinétique de séchage dépend fortement de la température, pour les produits présentant une grande résistance interne à la migration de l'eau, ce qui est le cas des produits biologiques. La variation de la température au sein du produit modifie l'activité de l'eau dans celui-ci, et exerce aussi une influence sur d'autres facteurs comme la chaleur d'évaporation de l'eau liquide qui varie en fonction de la température. Dans ce cas, la mesure de la température du produit au cours du séchage peut apporter des informations afin de comprendre les modifications de la cinétique de séchage ou encore de rendre compte du changement de la qualité du produit.

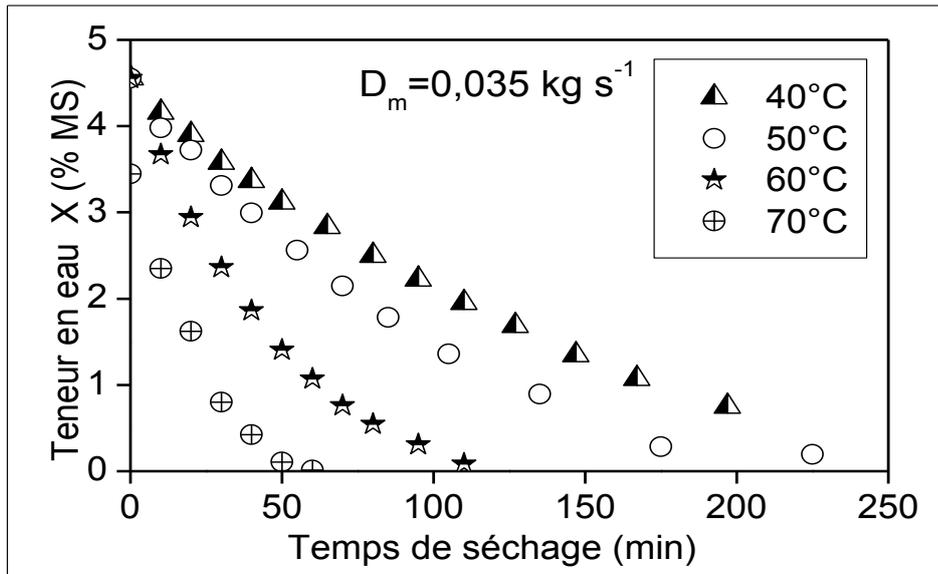


Figure 3.19 : Evolution, en fonction du temps, de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

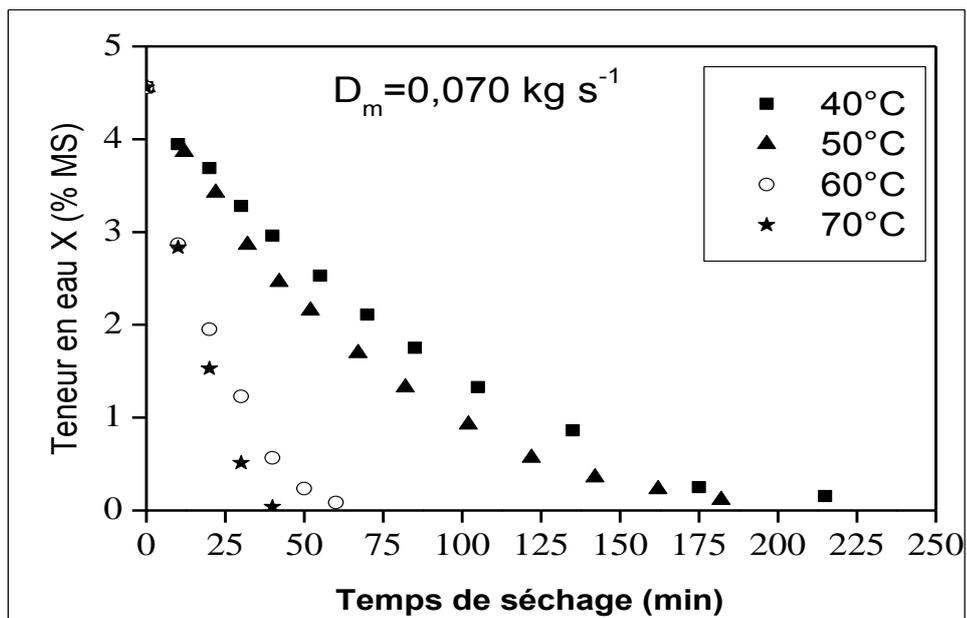


Figure 3.20 : Evolution, en fonction du temps, de la teneur en eau (base sèche) des feuilles de menthe. $D_m = 0,070 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

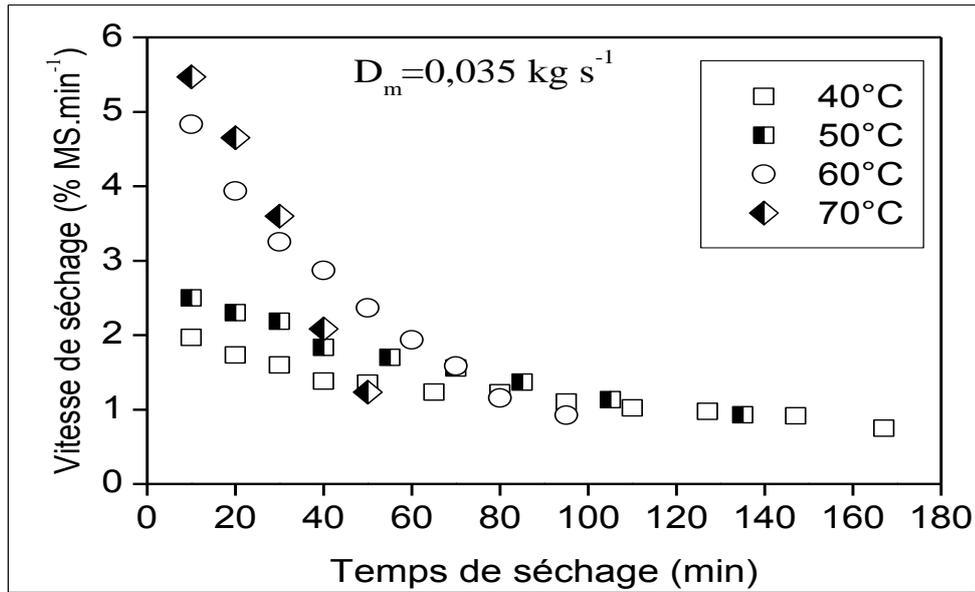


Figure 3.21 : Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

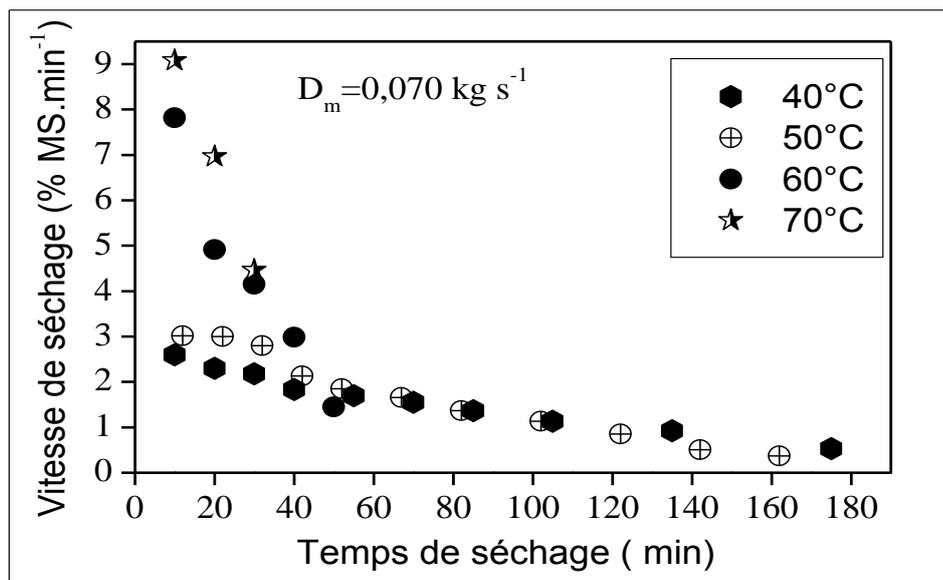


Figure 3.22 : Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. $D_m = 0,070 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

3.8.3. Influence du débit d'air asséchant

La figure (3.23) montre que l'influence du débit d'air est moins importante que celle de la température de séchage. Ce résultat s'explique par le fait que lorsque la courbe de séchage ne représente pas de phase initiale, le débit d'air

asséchant exerce une faible influence sur le processus de séchage, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de séchage [55]. Ce résultat montre alors que les transferts convectifs à l'interface air-produit ne sont plus des facteurs limitant et ce sont donc des facteurs internes qui contrôlent la vitesse de transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit.

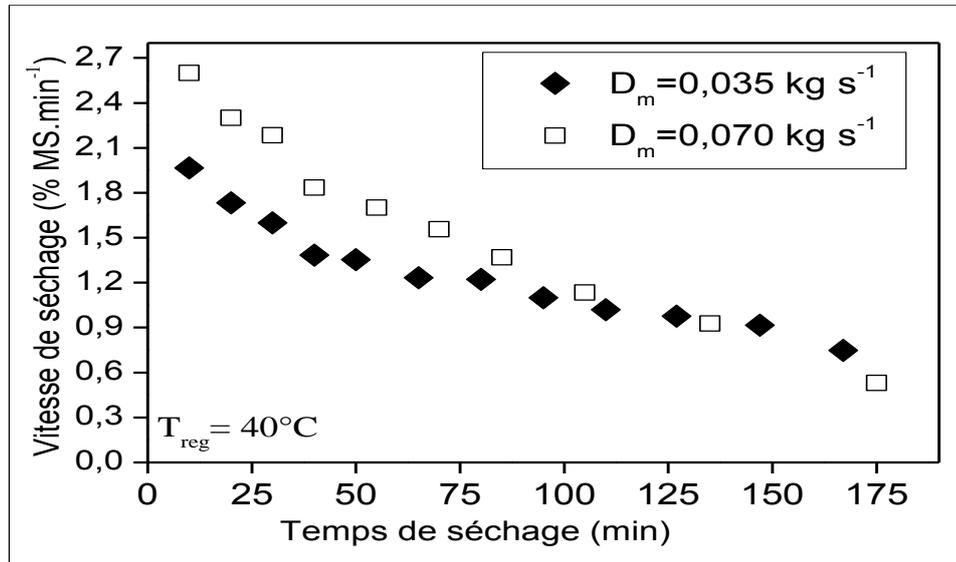


Figure 3.23 : Evolution en fonction du temps de la vitesse de séchage des feuilles de menthe. $T_{reg} = 40^{\circ}\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant.

3.8.4. Courbe caractéristique de séchage

Le but de cette partie est de synthétiser les résultats obtenus expérimentalement en déterminant, à partir des essais réalisés, une courbe caractéristique de séchage. La méthode adoptée consiste à étudier l'évolution de la vitesse de séchage normée f en fonction de la teneur en eau réduite X^* . Ceci conduit à un regroupement des différentes valeurs obtenues autour d'une courbe moyenne unique qui est la courbe caractéristique de séchage (CCS). L'équation exprimant la cinétique de séchage du produit s'écrit alors : $f^* = f(X^*)$. La teneur en eau d'équilibre X_{eq} peut se déduire de l'isotherme de sorption. La figure (3.24) représente la CCS ainsi obtenue. Le lissage de la CCS de la menthe, permet de déterminer l'équation de la vitesse de séchage sous forme d'un polynôme de degré 5 :

$$(3.11)$$

$$f^* = 2,7574X^* - 10,1434X^{*2} + 22,315X^{*3} - 22,7176X^{*4} + 8,7548X^{*5}$$

Avec $R^2 = 0,9515$ et $EST = 0,0506$.

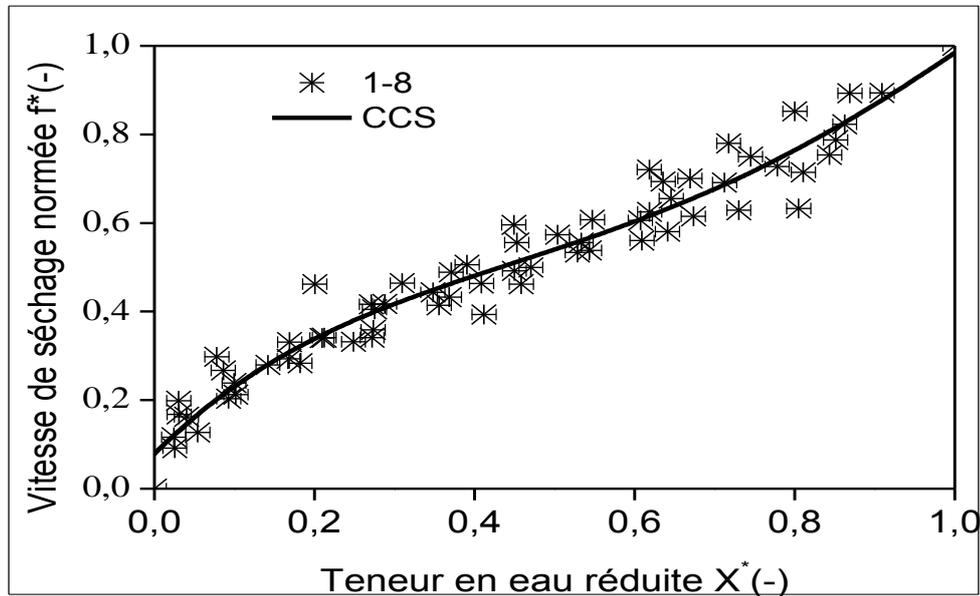


Figure 3.24 : Courbe caractéristique de séchage des feuilles de menthe obtenue pour différentes conditions de l'air asséchant

Cette courbe a un grand intérêt dans la communauté scientifique. En effet, à partir de deux paramètres, à savoir la teneur en eau initiale et d'équilibre, nous pouvons décrire la cinétique du séchage dans n'importe quelle condition de l'air asséchant. Il est très intéressant du point de vue dimensionnement des séchoirs solaires et simulation de séchage de connaître cette équation propre à chaque produit.

3.8.5. Lissage des courbes de séchage

Il est important de connaître l'évolution de la teneur en eau réduite X^* en fonction du temps de séchage de chaque expérience. Plusieurs modèles empiriques ou semi empiriques ont été développés pour décrire les cinétiques de séchage. Dans l'étude qui suit, nous avons comparé nos valeurs expérimentales à celles de 13 modèles présents dans la littérature (annexe F). Il est important de chercher l'équation empirique du modèle le plus adéquat pour chaque expérience. Les différents modèles sont comparés en s'appuyant sur leurs coefficients de corrélation (R^2) et leurs paramètres statistiques ki-carré réduite (χ^2) et l'erreur

systematique moyenne (EST). Les equations utilisees dans la modelisation empirique du sechage des feuilles de menthe sont regroupees en annexe F.

Modèle	T_{reg}	Coefficients	R^2	χ^2
Logarithmique	40°C	a=1,3009; k=0,0054; c=-0,3161	0,9996	5,16E-05
	50°C	a=1,1630; k=0,0091; c=-0,1684	0,9987	3,94E-04
	60°C	a=0,1622; k=0,0189; c=-0,1612	0,9999	2,73E-05
	70°C	a=1,4647; k=0,0249; c=-0,4649	0,9986	6,75E-04

Tableau 3.7 : Moyenne des coefficients du modèle décrivant la loi de séchage des feuilles de menthe. $D_m=0,035 \text{ kg.s}^{-1}$. Modèles de séchage appliqués à la description des courbes de séchage des feuilles de menthe (les paramètres a , b , c , k , k_0 , k_1 et n sont des constantes qui peuvent dépendre de la température)

Modèle	T_{reg}	Coefficients	R^2	χ^2
Logarithmique	40°C	a=1,1665; k=0,0077; c=-0,1781	0,9989	3,29E-04
	50°C	a=1,1489; k=0,0127; c=-0,1163	0,9997	5,55E-05
	60°C	a=1,1502 ; k=0,0258 ; c=-0,159	0,9990	2,17E-04
	70°C	a=1,5868; k=0,0133 ; c=-0,566	0,9984	3,91E-03

Tableau 3.8 : Moyenne des coefficients du modèle décrivant la loi de séchage des feuilles de menthe pour $D_m = 0,070 \text{ kg.s}^{-1}$

D'après les tableaux (3.7) et (3.8), on remarque que le modèle Logarithmique décrit au mieux la courbe de séchage de la menthe car il présente

une valeur de (R^2) proche de 1 et les valeurs de (χ^2) et (EST) voisines de 0. Ainsi, la figure (3.25) montre une bonne corrélation entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle Logarithmique. En conséquence, l'équation (3.11) décrit très bien la cinétique du séchage de la menthe. La figure (3.26) présente les teneurs en eau réduites prédites par le modèle Logarithmique en fonction de la durée de séchage pour un débit d'air constant et plusieurs températures de l'air asséchant. Les coefficients du modèle Logarithmique sont exprimés en fonction de la température d'air asséchant par les équations ci dessous:

$$X^* = a \exp(-kt) + c \quad (3.12)$$

$$a = -71,102 + 4,3811T_{reg} - 0,0735T_{reg}^2 + 4,9785T_{reg}^3 \quad (3.13)$$

$$k = 11,0766 - 0,6905 T_{reg} + 0,0140 T_{reg}^2 - 8,6810^{-5} T_{reg}^3 \quad (3.14)$$

$$c = 1,0961 - 0,1322 T_{reg} + 0,0036T_{reg}^2 - 2,8410^{-5} T_{reg}^3 \quad (3.15)$$

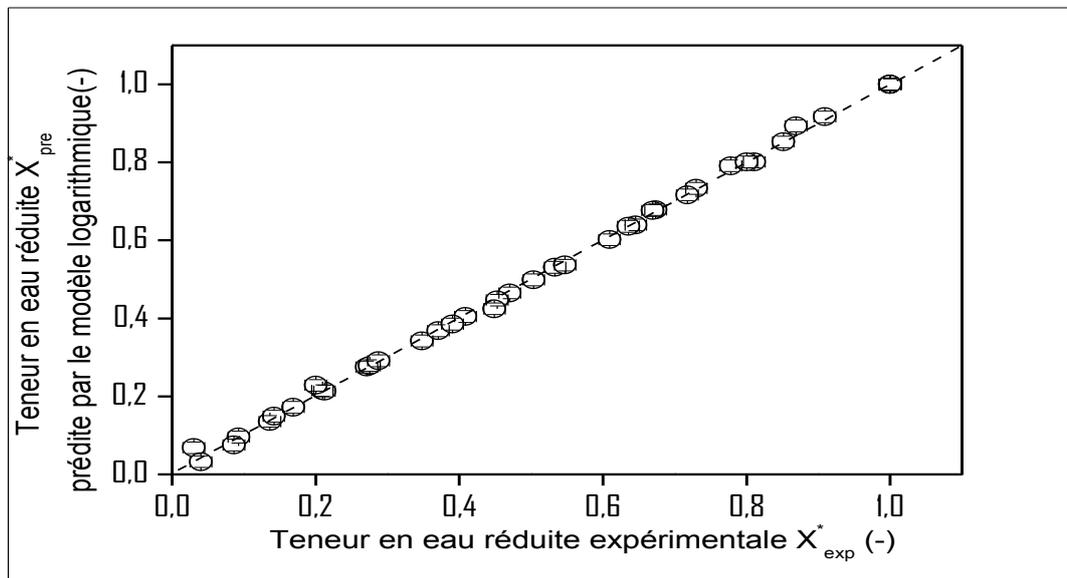


Figure 3.25 : Teneur en eau réduite prédite par le modèle Logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la menthe

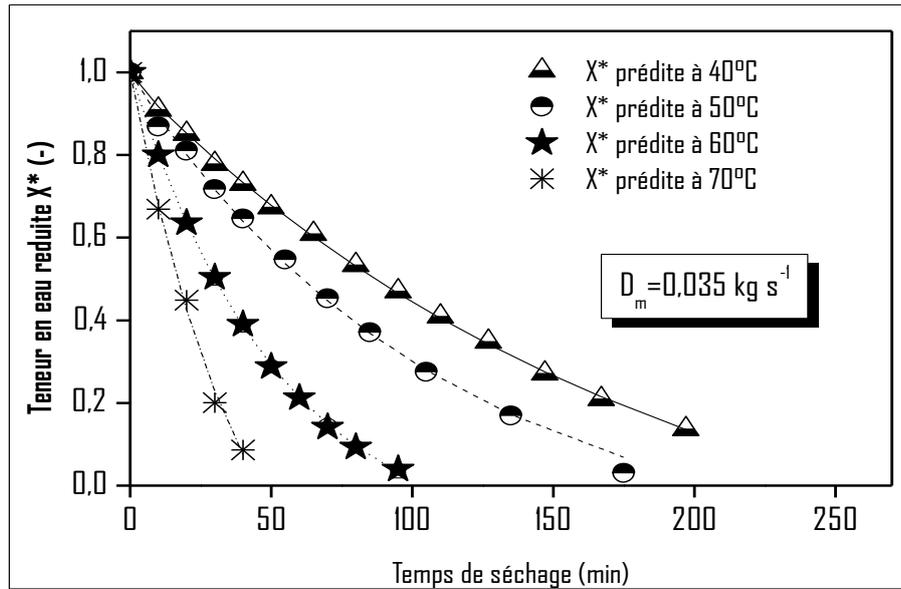


Figure 3.26 : Evolution en fonction du temps de la teneur en eau réduite des feuilles de menthe prédite par le modèle Logarithmique. Influence de la température de l'air asséchant

3.8.6. Comportement de rétrécissement pendant le séchage

La figure (3.27) montre une galerie d'images de feuilles de menthe numérotées (8,2 et 11) au cours de séchage à différentes températures. Des changements visuels évidents ont été observés dans la taille des feuilles (retrait). La figure (3.28) montre la variation de la surface réduite (A/A_0) en fonction de la durée de séchage pour différentes températures de l'air asséchant. Ces photos montrent que la surface réduite des feuilles de menthe diminue brusquement de plus en plus vite au début du séchage, ensuite plus lentement jusqu'à la fin du séchage.

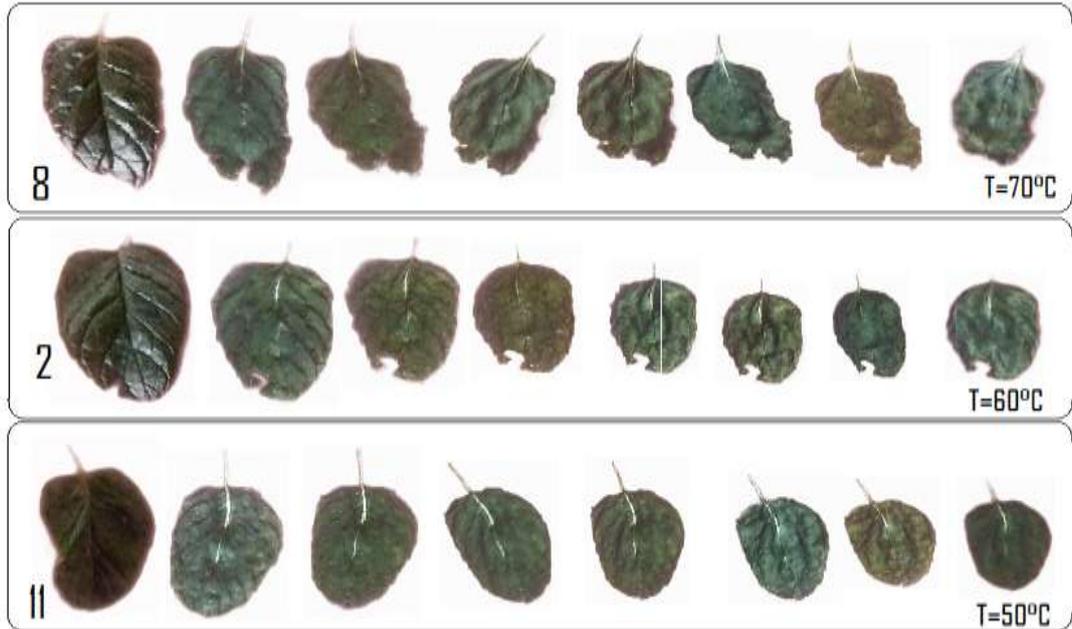


Figure 3.27 : Galerie d'images 2D de feuilles de menthe en fonction du temps de séchage pour différentes températures de l'air asséchant 50 °C, 60°C et 70 °C

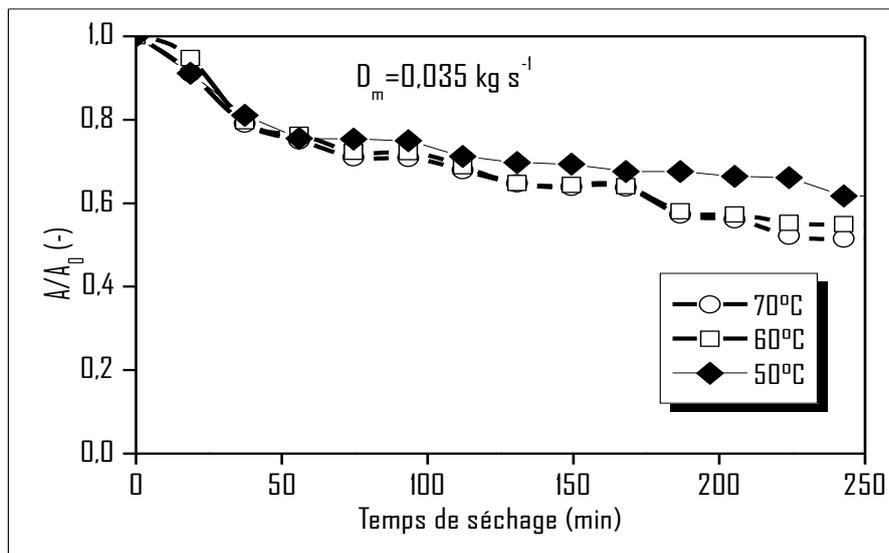


Figure 3.28 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m=0,035 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

Le rétrécissement de la surface de la feuille de menthe en fonction de sa teneur en eau réduite pour différents température de l'air asséchant est illustré par la figure (3.29). Les figures (3.30) et (3.31) montrent que la contraction de la

surface diminue au cours du temps de séchage. Les résultats du test ANOVA indiquent que la température de l'air n'a pas un effet significatif sur le retrait (valeurs $p < 0,03$). Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs chercheurs pour la pomme de terre [56], les grains de blé et le canola [57]. D'autres auteurs [58] [59] ont montré l'indépendance des caractéristiques de retrait de la température et de l'humidité relative de l'air asséchant. Le retrait de la surface ou du volume et la quantité d'eau évaporée durant le séchage aux températures asséchants étudiées sont indiqués dans le tableau (3.9). Il indique que, pour toutes les températures de l'air asséchant considérées, le pourcentage du poids de l'eau évaporée du produit est supérieur au volume de la feuille de menthe réduit par le séchage. La valeur de la diminution réduite du volume et de la surface de feuilles de menthe pour les températures de l'air asséchant retenues dans cette étude est respectivement de 51,28% à 62,08 et de 51,19 à 62,14 ; avec une valeur moyenne de 56,06% ($\pm 6,0\%$) et de 56,10 % ($\pm 5,0\%$), tandis que la teneur en eau réduite varie entre 86,3 % et 88,2 % avec une valeur moyenne de 87 ($\pm 0,1\%$).

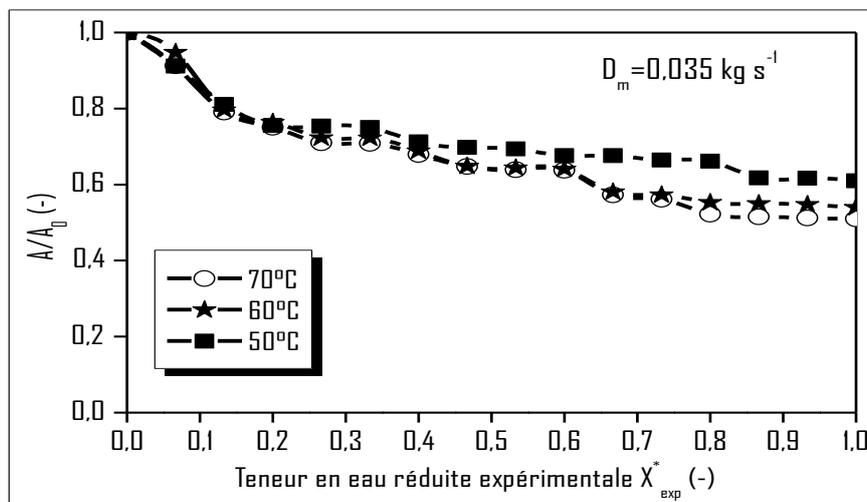


Figure 3.29 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m=0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

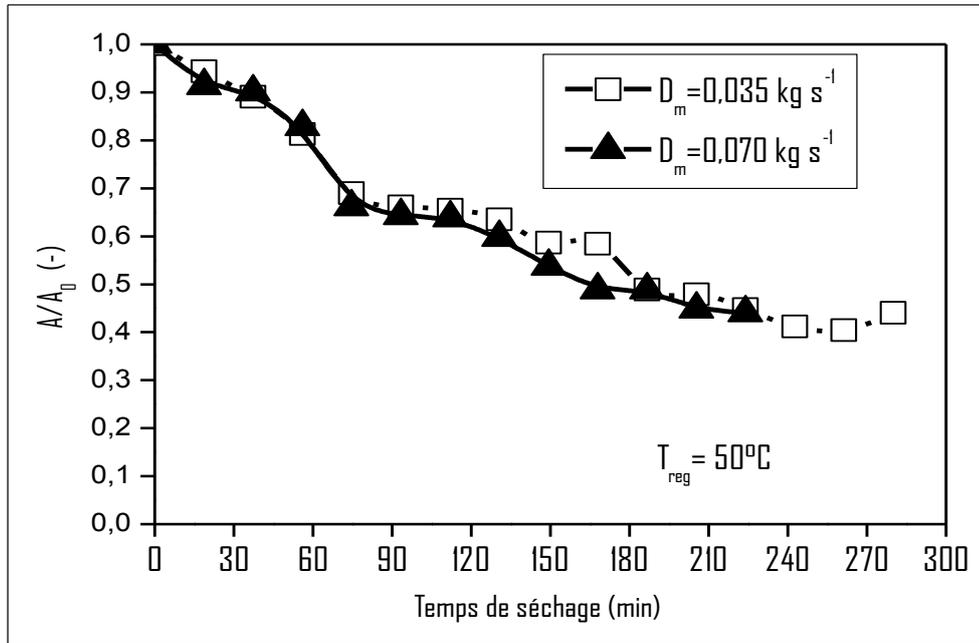


Figure 3.30 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $T_{reg}=50^\circ\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant

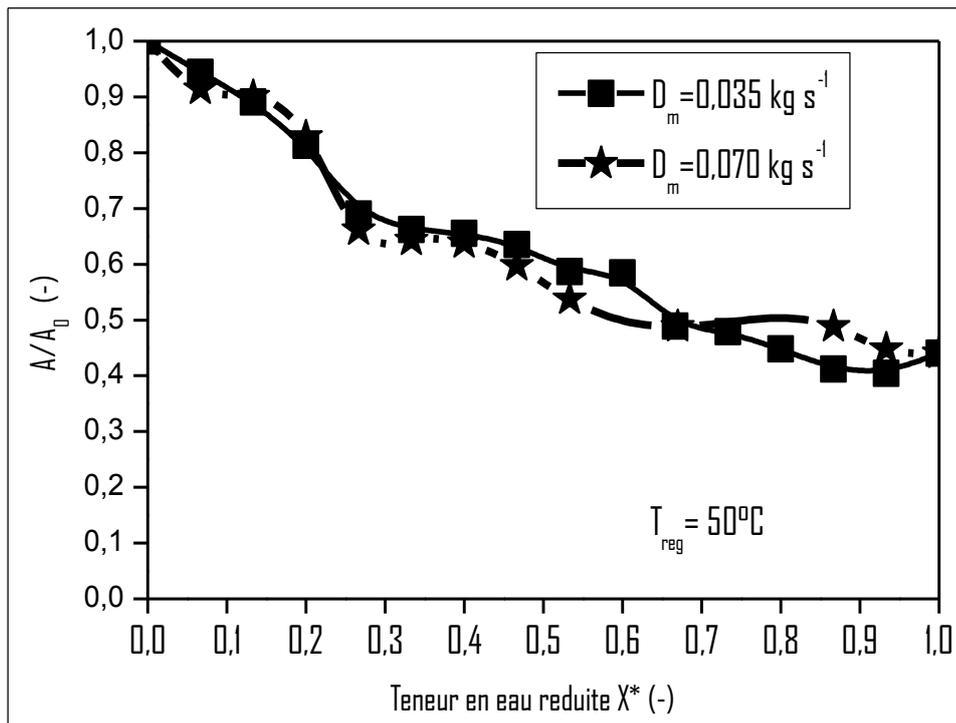


Figure 3.31 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $T_{reg}=50^\circ\text{C}$. Influence du débit d'air asséchant

Température °C	RH%	Surface (cm ²)		$A_{retrait}$ (%)	Volume (cm ³)		$V_{retrait}$ (%)	Eau évaporée (%)
		A_0	A_{end}		V_0	V_f		
50	40	7.005	4,353	62,14	0,182	0,113	62.08	86.3
60	40	9,506	5,227	54,98	0,228	0,125	54.82	88.2
70	40	4,885	2,501	51,19	0,117	0,060	51.28	86.5

Tableau 3.9 : Retrait de feuille de menthe pour différentes températures de l'air asséchant

3.8.7. Modèle de retrait de feuille de menthe

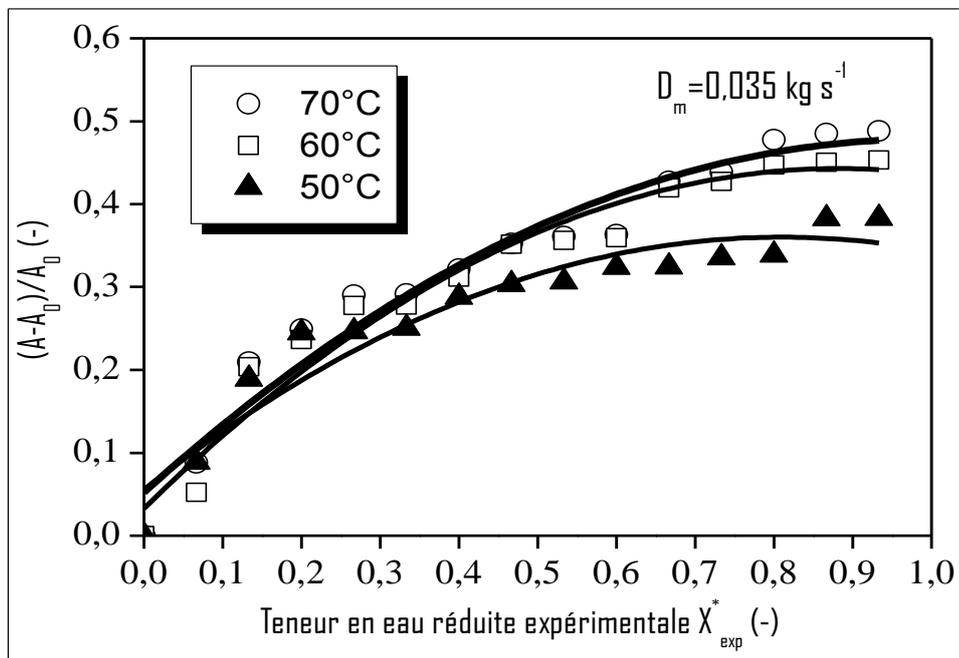


Figure 3.32 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (A / A_0). $D_m = 0,035 \text{ kg s}^{-1}$. Influence de la température de l'air asséchant.

Temp °C	A	B ₂	B ₁	R ²	SE
70	0,05228	-0,43174	0,85791	0,94751	0,02231
60	0,0329	-0,52662	0,9294	0,9521	0,02081
50	0,05556	-0,4639	0,75177	0,90626	0,02207

Tableau 3.10 : constantes A, B1 et B2 du modèle de retrait (équation 3.10)

La figure (3.32) montre l'évolution du volume réduit de feuille de menthe en fonction de la teneur en eau réduite. Les courbes de cette figure sont décrites par des polynômes de la forme $A + B_2X^2 + B_1X$. Les valeurs des constantes A, B₁ et B₂ dépendent de la valeur de la température de l'air asséchant. Elles varient entre 0,03 et 0,05 ; 0,75 et 0,92 et entre -0,43 et -0,52 comme indiqué dans le tableau (3.10)

Le polynôme $A + B_2X^2 + B_1X$ décrit les valeurs mesurées du retrait des feuilles de menthe. L'expression de ce polynôme est reportée dans l'expression (3.7). Les valeurs de A, B₁, B₂, R² et ES (l'erreur standard) sont égales à 0,06797, 0,75939, -0,39911, 0,96776 et 0,01976 respectivement.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = 0,06797 + 0,75939X - 0,39911X^2 \dots\dots\dots (3.16)$$

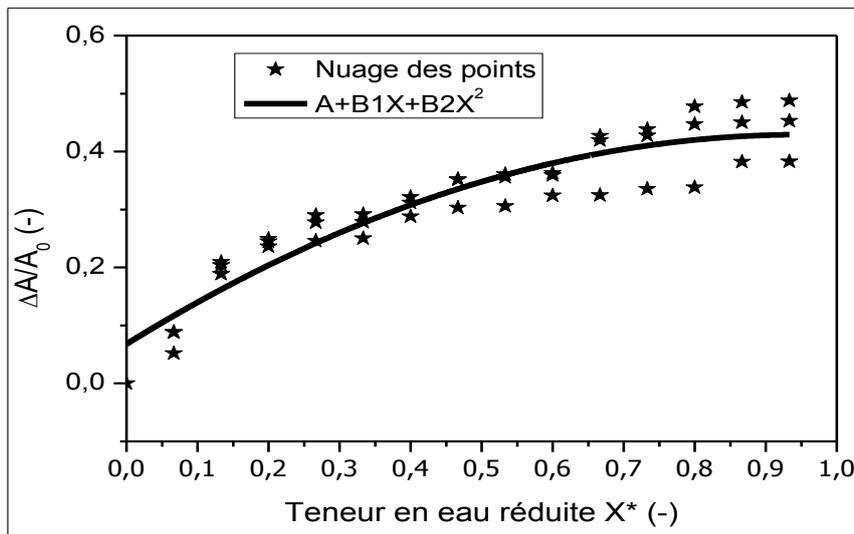


Figure 3.33 : Evolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite ((A-A₀ / A₀) (équation polynomiale caractéristique).

Plusieurs auteurs ont également décrit le comportement de retrait en fonction de la teneur en eau réduite lors du séchage convectif avec un modèle polynomiale [60] [61]. La figure (3.33) représente l'évolution en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale de la surface réduite (équation. 3.16).

3.8.8. Détermination des coefficients de diffusion

La solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par [62], dans la géométrie en feuilles en supposant la distribution initiale d'humidité uniforme, avec la simplification du mouvement d'humidité par diffusion, le rétrécissement

négligeable, les coefficients de diffusion constants et la teneur en eau réduite peut être exprimée par :

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.17)$$

Où D_{eff} est le coefficient de diffusion (m^2/s), ($n= 1, 2, 3. .$) n est le nombre de la série et L est la demi-épaisseur. Pendant de longues durées de séchage et pour une teneur en eau $X^* < 0,6$, l'équation peut être simplifiée au premier terme par une série [63]. Ainsi, l'application du logarithme népérien dans les deux membres donne l'équation suivante :

$$\ln(X^*) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3.18)$$

Le coefficient de diffusion pour chaque température de l'air asséchant été calculé en substituant les données expérimentales dans l'équation précédente. Il est déduit à partir du tracer de $\ln(X^*)$ en fonction du temps (figure 3.34). L'équation (3.18) exprimant $\ln(X^*)$ en fonction de la durée de séchage donne une ligne droite de pente :

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (3.19)$$

Les valeurs de D_{eff} pour les différentes valeurs des températures de l'air asséchant sont présentées dans le tableau (3.11). Le coefficient de diffusion des échantillons secs de la menthe aux températures 40 °C à 70 °C s'étalent dans la gamme de $1,9871 \cdot 10^{-11} m^2.s^{-1}$ à $1,4221 \cdot 10^{-10} m^2.s^{-1}$. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées dans la littérature [64] [65] [66].

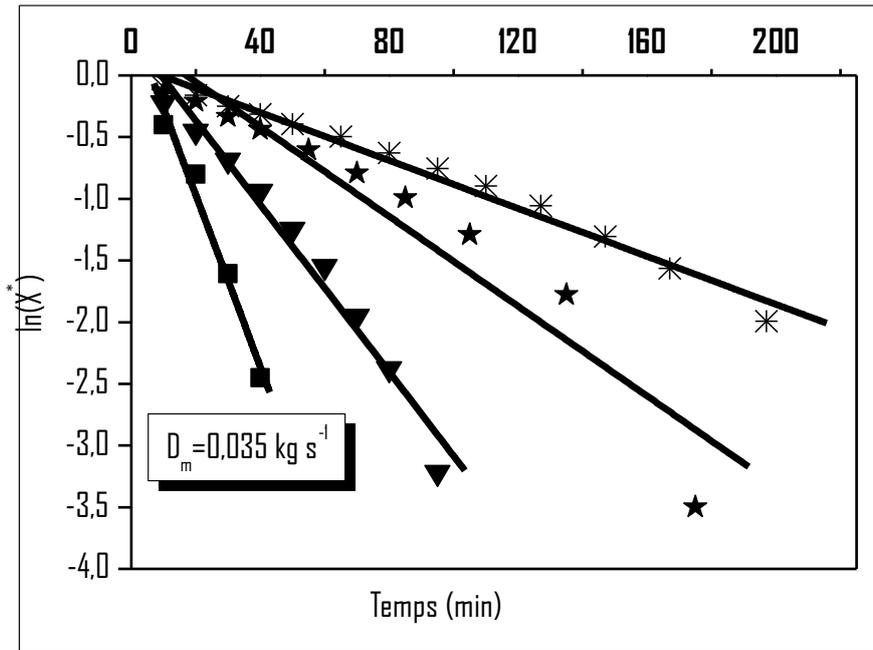


Figure 3.34 : Evolution au cours du temps du rapport logarithmique des grandeurs mesurées. Influence de la température de l'air asséchant.

Temp (°C)	Modèle	(D_{eff}) m^2/s	R^2	SE
40	Retrait	$5,2524910^{-11}$	0,989	0,0145
	Sans-retrait	$2,2797310^{-10}$	0,980	0,0156
50	Retrait	$6,419710^{-11}$	0,988	0,0156
	Sans-retrait	$2,786310^{-10}$	0,989	0,0176
60	Retrait	$1,45910^{-10}$	0,978	0,0434
	Sans-retrait	$6,332610^{-10}$	0,989	0,0165
70	Retrait	$2,801310^{-10}$	0,990	0,0267
	Sans-retrait	$1,215910^{-09}$	0,987	0,0178

Tableau 3.11 : Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion

3.8.9. Énergie d'activation

Le coefficient de diffusion est relié à la température de l'air asséchant par une loi d'Arrhenius [67] donnée par la relation suivante :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (3.20)$$

Où D_0 est la constante dans l'équation d'Arrhenius (m^2/s), E_a est l'énergie d'activation (kJ/mol), T est la température de l'air asséchant par (°C) et R est la

constante des gaz parfaits (kJ/mol. K). L'équation 16 peut être réarrangée sous la forme :

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R(T + 273,15)} \quad (3.21)$$

Les valeurs de $\ln(D_{\text{eff}})$ calculés à l'aide de l'équation 3.21 pour quatre températures sont tracés sur la figure (3.35). Cette figure est une droite limitée dans la gamme des températures considérées, indiquant la dépendance d'Arrhenius. A partir de la pente de la droite décrite par l'équation d'Arrhenius, on peut déduire que la valeur de l'énergie d'activation est de l'ordre de 51,9 kJ/mol avec prise en compte du retrait et 44,3 kJ/mol sans prise en compte du retrait.

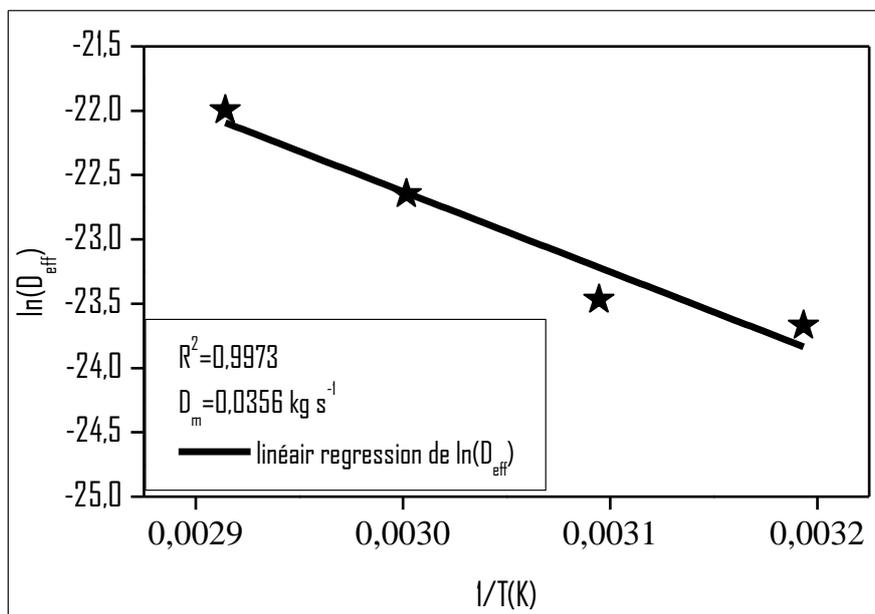


Figure 3.35 : Evolution en fonction de la température de l'air asséchant du coefficient logarithmique de diffusion effectif.

3.9. Conclusion

Le premier volet de l'étude expérimentale a permis de montrer l'importance de caractérisation des propriétés hygroscopiques de feuilles de menthe. En effet, chaque plante aromatique médicinale (PAM) possède des caractéristiques qui lui sont propres. Plusieurs paramètres rentrent en jeu dans le processus de séchage, d'où l'importance d'établir la carte d'identité qui permet de caractériser le comportement hygroscopique de chaque produit. Nous avons, par le biais de différentes caractérisations à savoir : détermination des caractéristiques

hygroscopiques des feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*), Lissage des isothermes de sorption, visualisation du phénomène d'hystérésis, détermination des conditions optimales de séchage et de stockage des feuilles de Menthe, détermination des propriétés thermodynamiques (chaleur isostérique, entropie différentielle de sorption, température isocinétique et de l'énergie libre de Gibbs).

Le deuxième volet de l'étude expérimentale nous a permis de déterminer l'évolution de la cinétique de séchage, l'élaboration de l'équation caractéristique de séchage et de la vitesse de séchage pour différentes températures et débits d'air asséchant. Un système de traitement d'image a été utilisé pour mesurer le retrait lors du séchage de feuilles de menthe. Les résultats montrent que la teneur en eau influe sur le retrait de la surface de la feuille de menthe, tandis que la température de l'air asséchant n'a pas un effet significatif sur ce phénomène de retrait lors du séchage. Un lissage de tendance polynomiale est utilisé pour représenter le retrait de la surface de la feuille de menthe, les résultats sont obtenus avec des coefficients de corrélations élevés et des erreurs de prédictions faibles. Les coefficients de diffusivités sont affectés par le retrait lors du séchage.

CHAPITRE 4

RESULTATS DE LA MODELISATION & SIMULATION DU SYSTEME DE SECHAGE

4.1. Introduction

Nous avons modélisé puis simulé, avec le code de calcul développé chapitre 2, le fonctionnement du système de séchage modulaire. Nous avons déterminé, pour la modélisation du processus de séchage, les expressions de la vitesse de séchage, la courbe caractéristique de séchage et le coefficient de diffusion effective utilisée dans les calculs déduits des résultats expérimentaux du séchage de feuilles de menthe dans un séchoir convectif indirect modulaire et à chauffage partiellement solaire. Les données climatiques sont celles de Bouzaréah, Alger (Algérie). Elles sont basées sur la notion de la journée type. Des simulations du séchage convectif de feuilles menthe (*MENTHA SPICATA*) disposées en couches minces sur les claies du séchoir ont été effectuées pour une durée de séchage égale à celle de l'ensoleillement. Nous avons étudié l'influence de divers paramètres de fonctionnement du séchoir modulaire, notamment la température, le débit de l'air asséchant et la masse du produit à sécher sur les performances thermique de l'insolateur et du séchoir. Les calculs ont été effectués pour quatre valeurs de l'épaisseur des couches de feuilles de menthe 5, 10, 15 et 20 cm.

4.2. Conditions météorologiques

Les données utilisées dans les simulations du système de séchage à chauffage partiellement solaire sont composées de données climatiques et radiométriques de 12 journées type de l'année et de divers paramètres physiques du système de séchage (annexe G). La notion de la journée type considère que tous les jours du mois sont identiques. Elle comporte des valeurs mensuelles moyennes journalières des données météorologiques et radiométriques pour chaque heure de la journée. Ces données sont des valeurs moyennes établies d'après les relevés météorologiques du site de Bouzaréah (Alger), pendant environ 20 années (période des mesures, 1987-2007) pour les données climatiques (température, humidité relative et vitesse du vent) et de 10 années

(période des mesures, 1997-2007) pour les données radiométriques (flux solaire direct, diffus et durée d'insolation).

4.2.1. Flux solaire global

Le flux solaire global capté par la couverture de l'insolateur est égale à la somme des flux direct et diffus reçus sur cette couverture inclinée de 40° par rapport à l'horizontale.

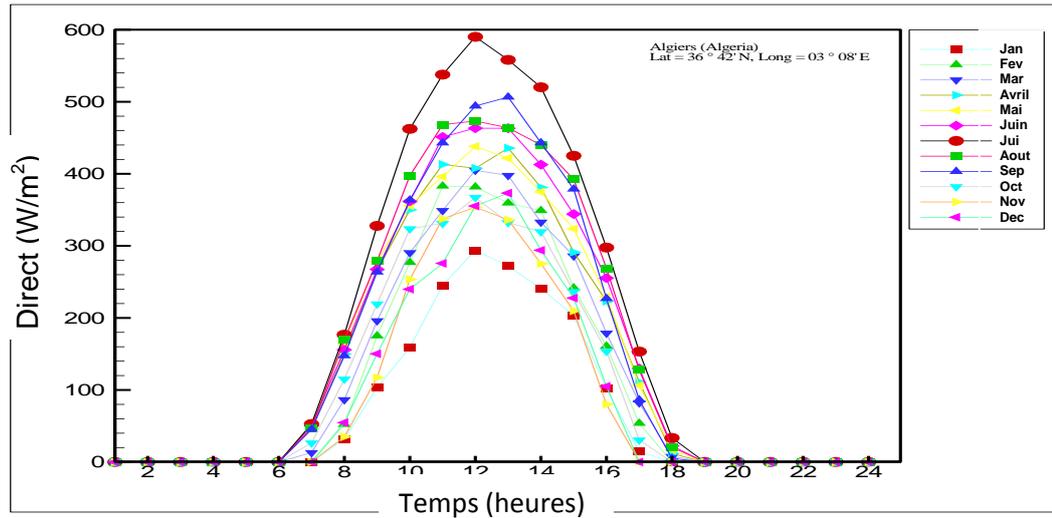


Figure 4.1 : Evolution horaire du flux solaire direct

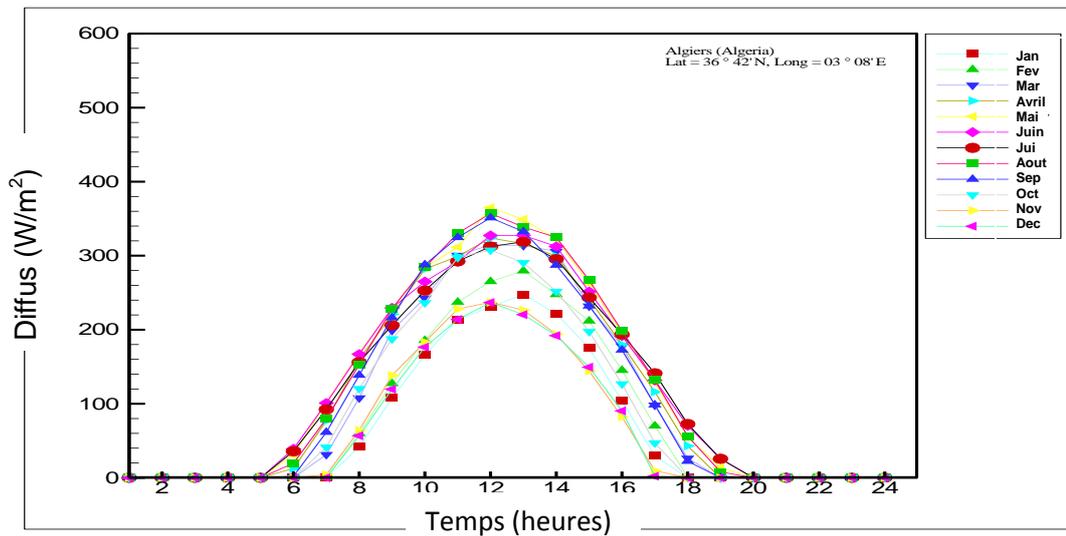


Figure 4.2 : Evolution horaire du flux solaire diffus.

4.2.2. Température de l'air

La température de l'air ambiant joue un rôle très important à différents niveaux (pertes extérieures et performances de l'isolateur et du séchoir). C'est pourquoi, nous utilisons, dans nos calculs, les données horaires pendant les 12 jours caractéristiques de l'année.

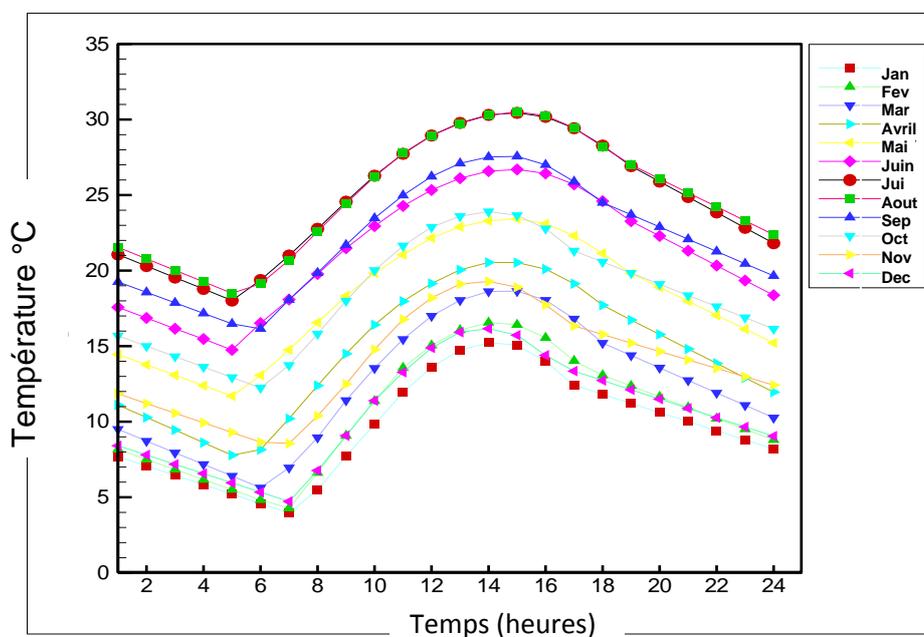


Figure 4.3 : Evolution horaire de la température de l'air ambiant (°C).

4.2.3. Humidité relative de l'air

La teneur en eau de l'air ambiant joue un rôle important sur le processus de séchage. Ainsi, le pouvoir évaporatoire de l'air asséchant est d'autant plus faible que son humidité relative est élevée (figure 4.4).

4.2.4. Vitesse du vent

La vitesse du vent est aléatoire au cours de la journée. C'est pourquoi nous avons considéré, dans nos calculs, les valeurs horaires moyennes durant 12 jours caractéristiques de l'année. La convection entre la couverture de l'isolateur et l'air ambiant est provoquée par la vitesse du vent, En effet, les déperditions thermique à travers le vitrage sont faibles pour les petites valeurs de la vitesse du vent (figure 4.5).

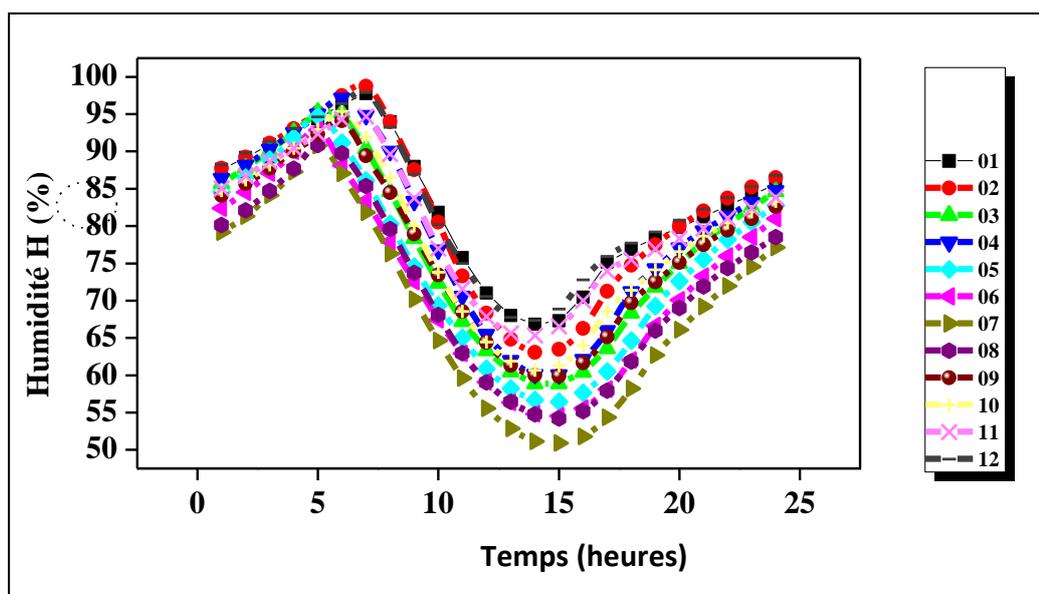


Figure 4.4 : Evolution horaire de l'humidité relative de l'air ambiant

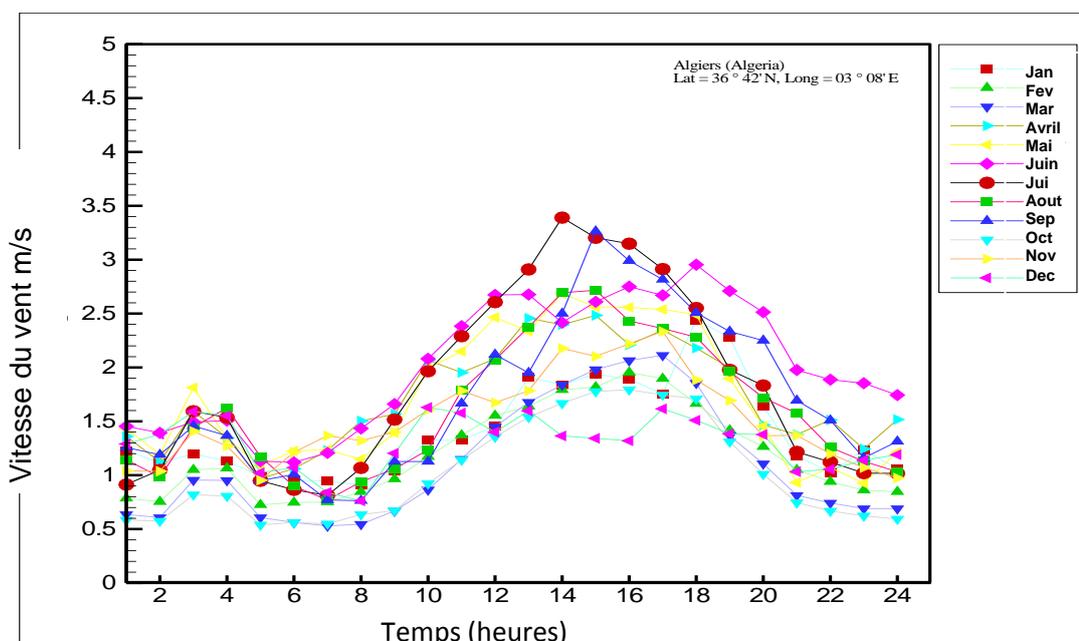


Figure 4.5 : Evolution mensuelle de la vitesse du vent (m/s).

4.3. Démarches et outils de simulation

Nous étudions l'influence de diverses, grandeurs, notamment la température, le débit de l'air asséchant et la masse du produit à sécher sur la durée du séchage, la couverture solaire et le rendement du séchoir. Nous analysons également les effets des taux de recyclage de l'air en utilisant trois valeurs 25 %, 50 % et 75 %.

Les simulations sont effectuées avec les conditions suivantes :

- Durant les 12 jours de l'année caractéristiques du mois, la durée d'une opération de séchage est, au maximum, égale à la durée entre le lever et le coucher du soleil pour la journée type sélectionnée afin de bénéficier de toute la chaleur solaire journalière. Ce mode de fonctionnement convient le mieux aux systèmes solaires sans stockage de chaleur.
- La température de l'air asséchant T_{reg} admissible pour les plantes aromatiques et médicinales, est $T_{reg} \leq 50$ °C. [62].
- un module de séchage polyvalent destiné à sécher 5 kg, 10 kg, 15 kg et 20kg de feuilles de menthe correspondant à plusieurs épaisseurs du produit de 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm respectivement.
- Le débit d'air asséchant varie de $0,14 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ à $0,30 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
- La teneur en eau initiale et finale du produit sont égale à $X_0=5$ (kg d'eau.kg⁻¹ ms) et $X_f=0,47$ (kg d'eau.kg⁻¹ ms).
- Le nombre d'insolateur à air, à simple passe entre l'absorbeur et l'isolant, varie de 1 à 5. L'aire de l'absorbeur est de 2 m² et la face avant est constituée d'une vitre. Ils sont associés suivant différents groupements parallèles/séries.
- Les données météorologiques utilisées sont celles de Bouzaréah d'Alger (Algérie) latitude 36 ° 35' N, longitude 3 ° 00' E et d'altitude 216 m. Elles regroupent les moyennes horaires de la journée type caractéristique du mois, à savoir la température ambiante, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et les flux solaire direct et diffus.
- L'opération de séchage est arrêtée lorsque la teneur en eau du produit devient inférieure à X_{eq} . La teneur en eau d'équilibre de la menthe (MENTHA SPICATA) est déterminée expérimentalement à partir des courbes d'adsorption (chapitre 3).
- Trois valeurs du taux de recyclage de l'air asséchant, T_R : 25 %, 50 % et 75%.
- La vitesse de séchage de la menthe est déterminée à partir de la courbe caractéristique de séchage obtenue par le lissage des courbes expérimentales. La vitesse de séchage initiale de la menthe est déduite à partir des températures de l'air asséchant et les coefficients caractérisant le produit sont déterminés à partir de la méthode de moindres carré [63].

4.4. Résultats et discussions

4.4.1. Durée de séchage

Les figures (4.6), (4.7,) et (4.8) montrent l'influence du débit massique d'air asséchant, de la masse des feuilles de menthe et de la température de l'air asséchant sur la durée de séchage pour trois taux de recyclage d'air (25, 50 et 75%). Nous constatons que la durée de séchage diminue avec l'accroissement du débit massique de l'air asséchant quelque soit l'épaisseur de la couche de feuilles de menthe et les valeurs de la température de l'air asséchant retenues dans ces calculs. En effet, les transferts de chaleur et de masse par convection entre les feuilles de menthe et l'air asséchant sont d'autant élevés que la vitesse de l'air est importante. Ainsi, la durée de séchage diminue de manière significative avec l'augmentation de la température de l'air asséchant. En effet, un accroissement de la température de l'air asséchant conduit à une augmentation de la pression de vapeur à la surface des feuilles de menthe et par conséquent du gradient de concentration de vapeur d'eau à la surface des feuilles de menthe. Il s'ensuit une évaporation d'autant plus élevée que la teneur en eau de l'air asséchant est faible et que celle des feuilles de menthe importante. Nous notons que ces résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre 2. L'augmentation du taux de recyclage de l'air entraîne une diminution de la durée de séchage notamment pour une faible masse de feuilles de menthe. Par conséquent, plusieurs scénarios sont éliminés, de sorte que la durée de séchage acceptable est inférieure à celle de la période d'insolation. Les figures (4.6), (4.7) et (4.8) montrent que pour toutes les valeurs de la masse des feuilles de menthe, les faibles valeurs de débit d'air, la durée de séchage est inférieure à la durée du jour pour des températures de l'air asséchant utilisées dans nos simulations.

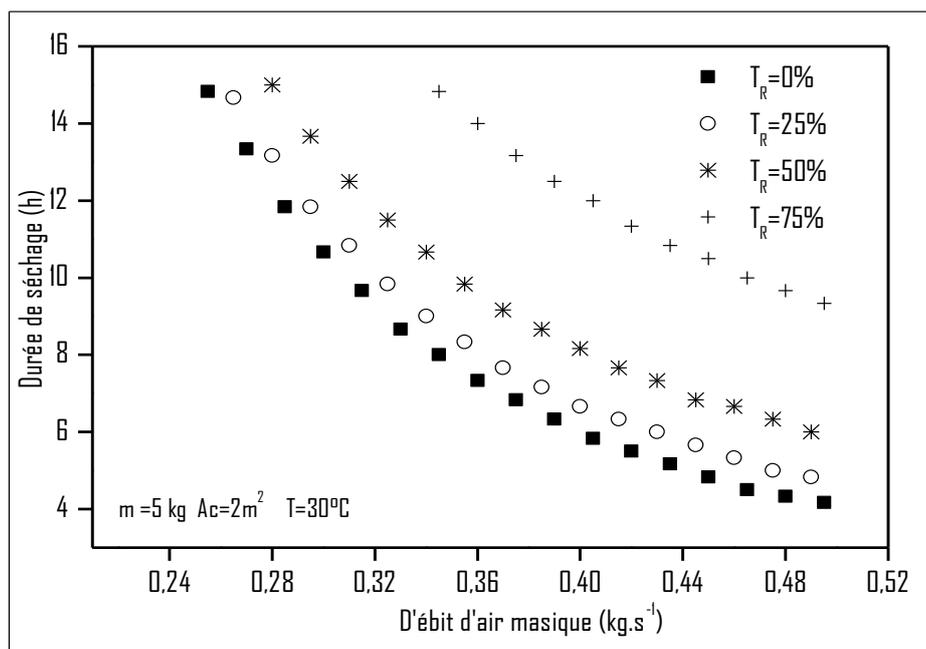


Figure 4.6: Evolution de la durée de séchage en fonction du débit massique d'air asséchant.

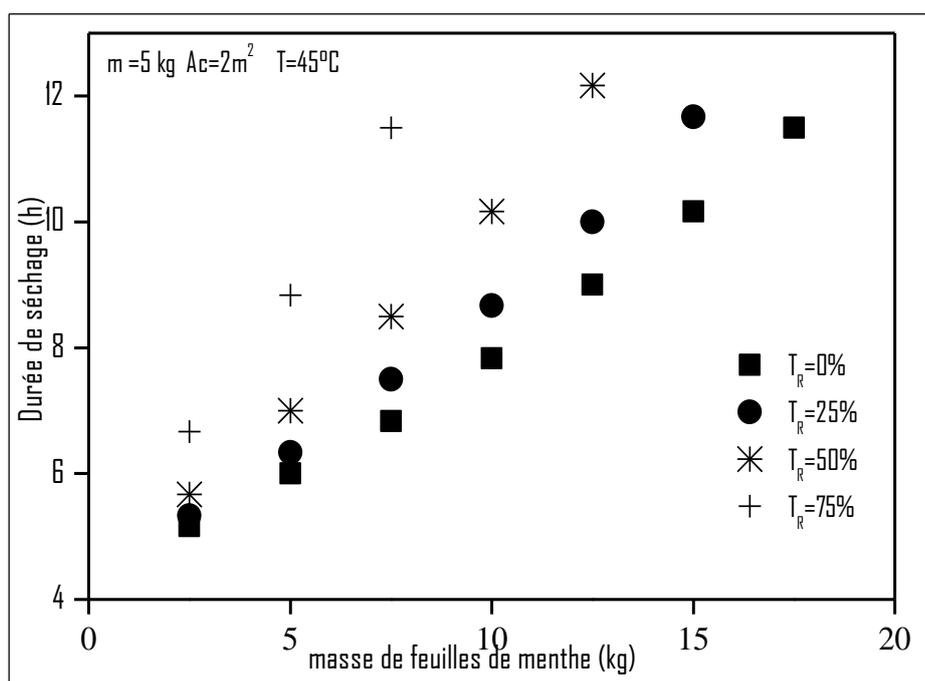


Figure 4.7: Evolution de la durée de séchage en fonction de la masse des feuilles de menthe.

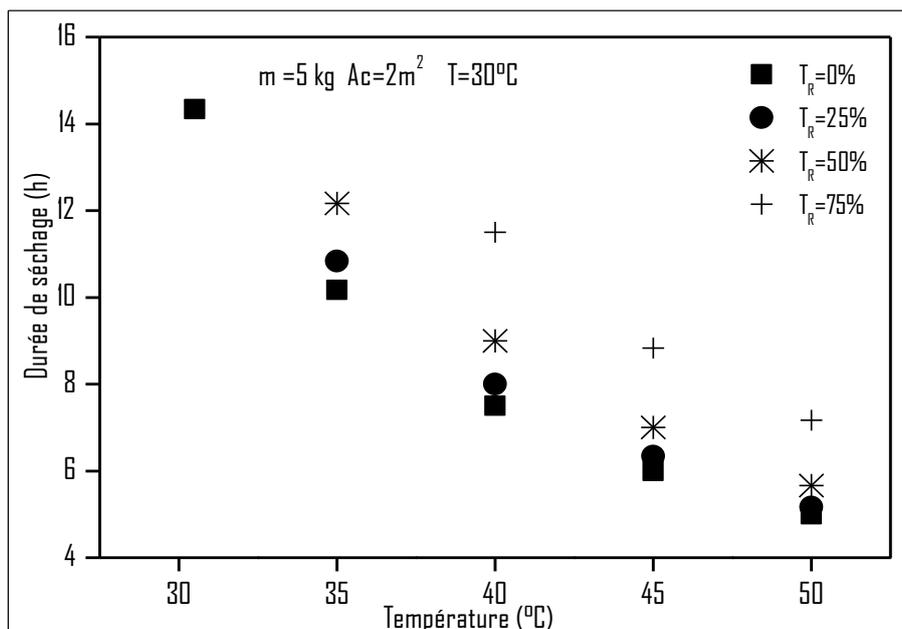


Figure 4.8: Evolution de la durée de séchage en fonction de la température de l'air asséchant.

4.4.2. Rendements de l'insolateur

En général, les paramètres les plus importants qui affectent la performance thermique de l'insolateur sont le débit massique d'air et l'aire de captation du flux solaire. L'influence de ces deux paramètres sur la température de sortie de l'air et le rendement de l'insolateur sont présentés par la figure (4.9). On constate que le rendement de l'insolateur est d'autant plus élevé que son aire de captation est faible. Le rendement de l'insolateur augmente avec le débit massique d'air et tend vers une valeur limite pour une aire de captation supérieure à 6 m^2 .

4.4.3. Rendement de séchage

La figure (4.10) illustre l'évolution mensuelle du rendement de séchage pour les 12 jours caractéristiques de l'année. Il est à noter que les valeurs maximales de ce rendement de séchage sont atteintes les jours d'été en raison des conditions météorologiques de la région d'Alger. En effet, ces conditions contribuent à une augmentation de l'évapotranspiration de la végétation et de l'évaporation de l'eau libre de cette région. L'accroissement du débit massique d'air asséchant provoque une augmentation du rendement du séchage puisque les coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection entre les

feuilles de menthe et l'air asséchant sont d'autant plus élevés que la vitesse de l'air est importante.

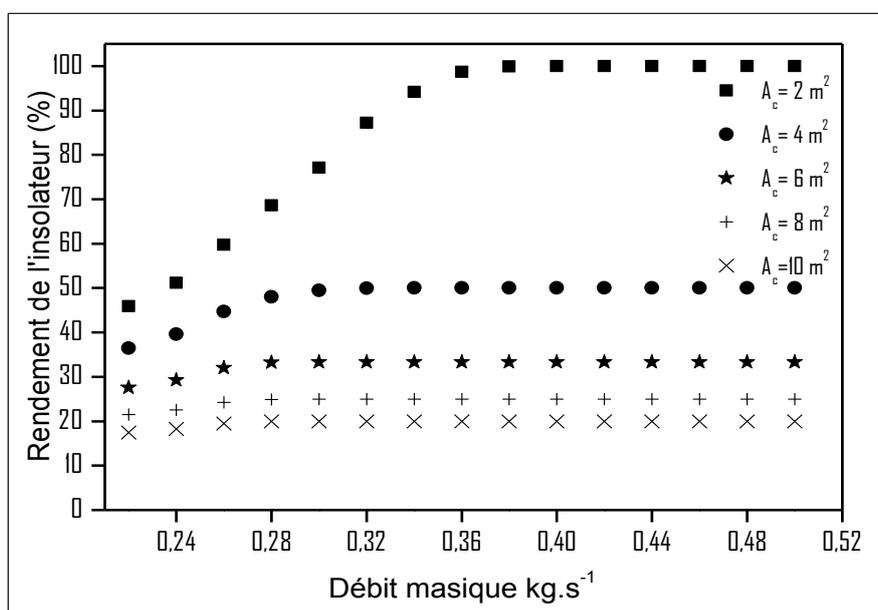


Figure 4.9 : Évolution du rendement de l'insolateur en fonction du débit d'air massique. Influence de l'aire de captation

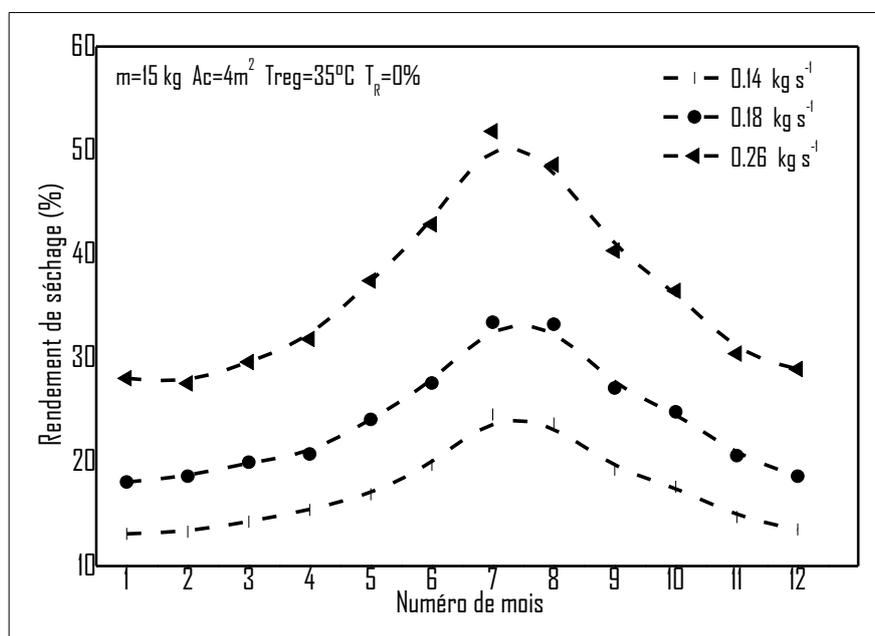


Figure 4.10: Evolution mensuelle du rendement d'évaporation. Influence du débit massique d'air asséchant

4.4.4. Couverture solaire

La couverture solaire est faible en hiver (figure 4.11). En effet, elle dépend de la durée du jour. Les durées diurnes les plus élevées sont celles des mois de juillet et d'août (15 heures). Pour ces journées, l'énergie solaire journalière par mètre carré de plan horizontal est d'environ $7,5 \text{ kWh}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. La couverture solaire est d'autant plus élevée que le débit massique d'air asséchant est faible. Aussi, est nécessaire de déterminer la valeur du débit d'air asséchant pour laquelle les valeurs de la couverture solaire et du rendement de séchage sont maximales. L'analyse de cette figure montre que, d'une part, la couverture solaire augmente avec l'aire de captation de l'insolateur et que d'autre part, l'augmentation de la masse de feuilles de menthe conduit à une diminution de la couverture solaire. En effet, la quantité de chaleur utile fournie par l'insolateur à l'air asséchant augmente avec l'aire de captation de l'insolateur. Cependant, nous constatons l'existence d'une valeur limite de l'air de captation à partir de laquelle la couverture solaire augmente lentement avec l'accroissement de cette aire. Aussi, il n'est pas nécessaire d'utiliser une aire de captation élevée pour accroître la couverture solaire. En outre, pour mener à bien le séchage dans une durée correspondant à celle de la période ensoleillée de la journée, il est nécessaire de fournir aux feuilles de menthe à sécher une quantité de chaleur d'autant plus élevée que la masse de ces feuilles de menthe est grande. Pour cela, il faut agir sur l'aire de captation de l'insolateur et le débit massique de l'air asséchant.

La Figure (4.12) illustre l'influence du taux de recyclage de l'air et du débit massique d'air asséchant sur la couverture solaire. Nous notons également que la couverture solaire augmente avec le débit massique d'air asséchant jusqu'à atteindre une valeur maximale qui dépend de la valeur du taux de recyclage de l'air, puis diminue avec l'augmentation du débit massique d'air asséchant. La fraction solaire est d'autant plus grande que la valeur du taux de recyclage de l'air asséchant est élevée. Nous avons tracé l'évolution de la valeur maximale de la couverture solaire (figure 4.11) en fonction du débit massique d'air asséchant (figure 4.13) et en fonction de la température de l'air asséchant (figure 4.14) pour une masse de 5 kg de feuilles de menthe. Il est à noter une valeur du débit massique de l'air asséchant pour laquelle la fraction solaire atteint une valeur maximale puis décroît avec l'augmentation du débit massique d'air asséchant.

Celle valeur maximale augmente avec le taux de recyclage de l'air asséchant et avec le débit massique d'air asséchant. Comme il a été indiqué précédemment la couverture solaire décroît avec l'augmentation du débit massique d'air. Il s'ensuit une diminution de la température de l'air à la sortie de l'insolateur. Aussi, la quantité de chaleur fournie au séchoir par la source auxiliaire pour mener à bien le séchage augmente avec la baisse de la température de l'air asséchant. Ces résultats montrent que la couverture solaire maximale est obtenue pour une faible masse de feuilles de menthe, une valeur élevée du taux de recyclage de l'air asséchant et une température de l'air asséchant de l'ordre de 30 ° C.

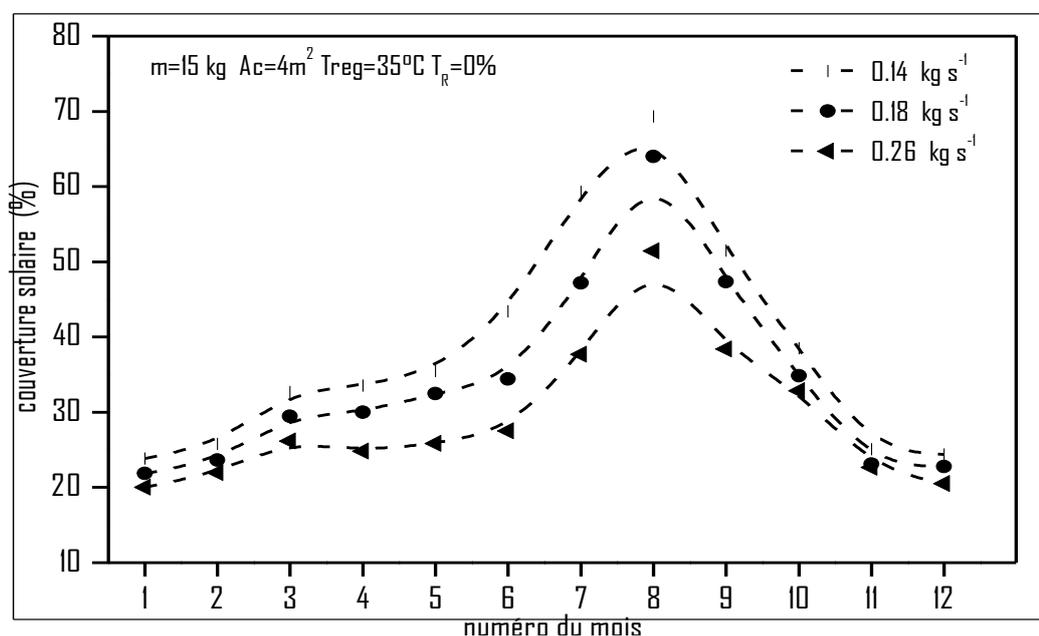


Figure 4.11 : Evolution mensuelle du taux de couverture solaire. Influence du débit massique d'air asséchant

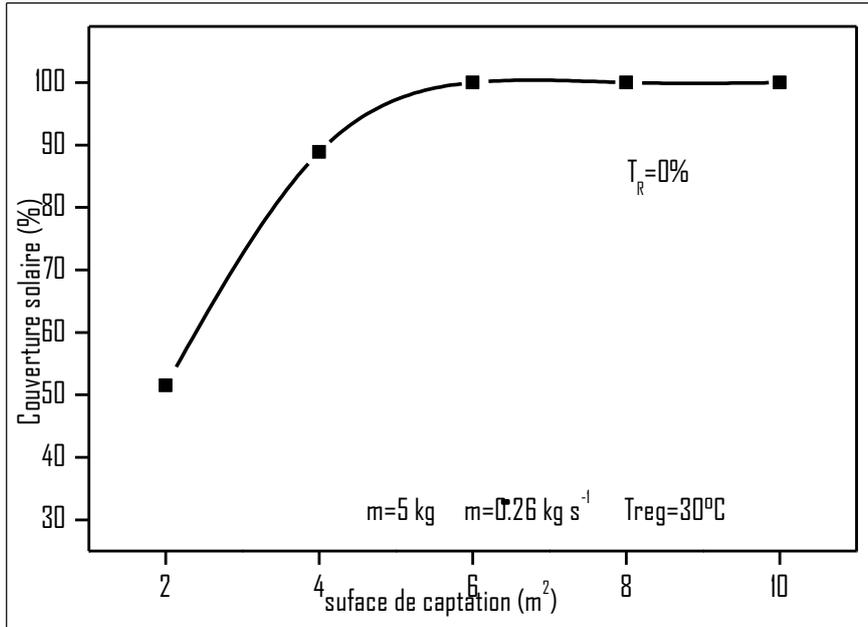


Figure 4.12 : Evolution de la couverture solaire en fonction de l'aire de captation.
Influence du débit massique d'air asséchant

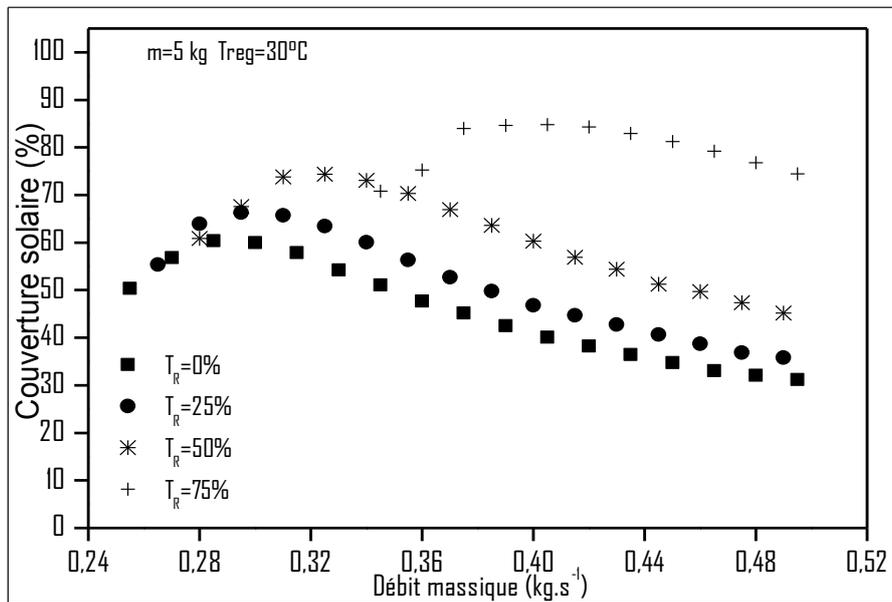


Figure 4.13 : Evolution du taux de couverture solaire en fonction du débit massique d'air asséchant. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant

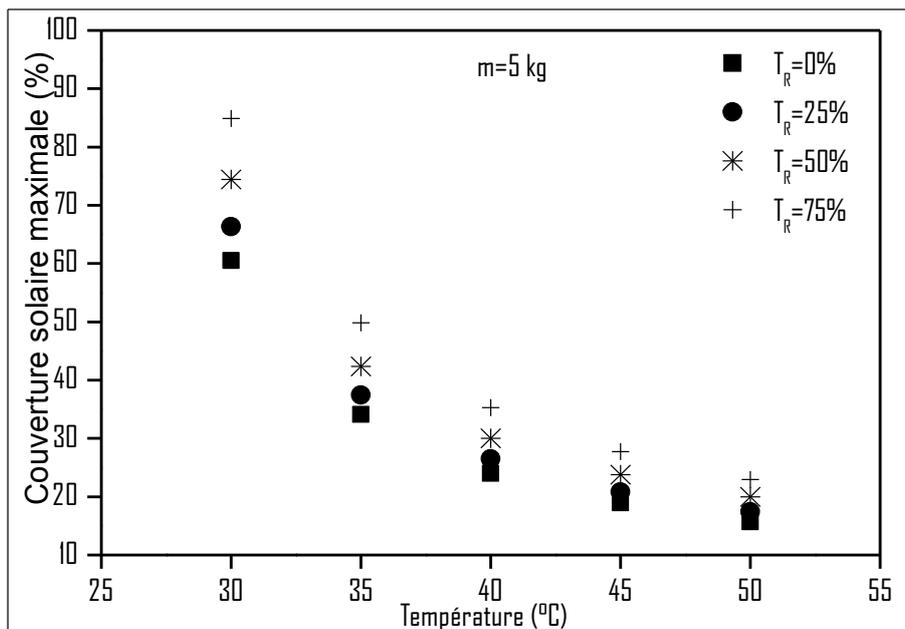


Figure 4.14 : Evolution de la couverture solaire maximale en fonction de la température de l'air asséchant. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant

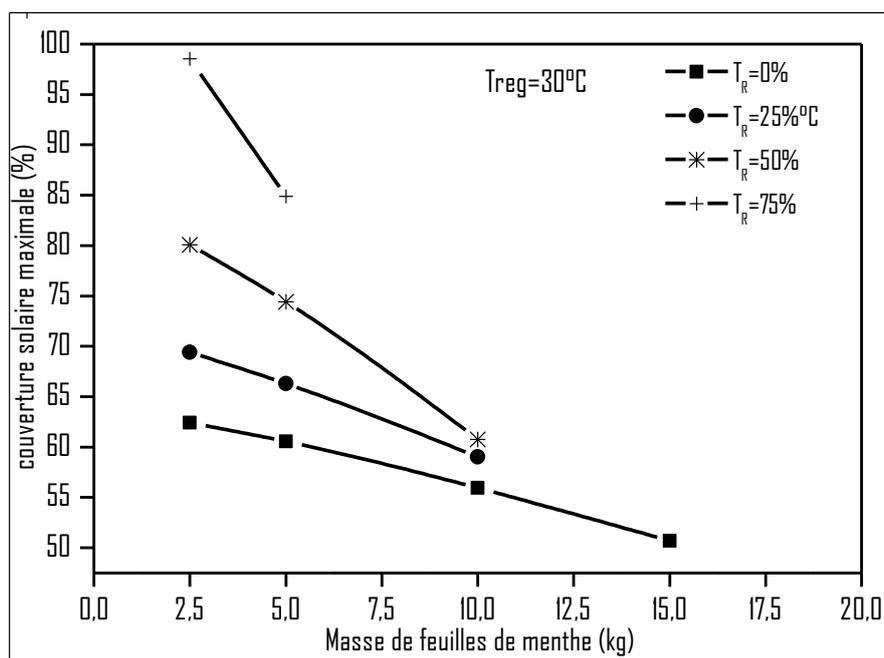


Figure 4.15 : Evolution de la couverture solaire maximale en fonction de la masse de feuilles de menthe. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant

4.5. Conclusion

La modélisation du fonctionnement du séchoir modulaire à chauffage partiellement solaire a permis de mettre en évidence l'importance de la température et du débit d'air asséchant ainsi que du taux de recyclage de l'air asséchant sur la durée du séchage. Ainsi, l'accroissement d'une part, du débit d'air asséchant et d'autre part, du taux de recyclage de l'air asséchant provoque une réduction de la durée de séchage. La simulation du fonctionnement du séchoir modulaire a été effectuée en utilisant les données climatiques de la région de Bouzaréah (Alger) et la notion de journée type. La durée de séchage est prise égale à celle de l'ensoleillement de la journée type. Les principaux résultats des simulations montrent que : les valeurs maximales du rendement du séchage sont obtenues pour les mois d'été et sont d'autant plus élevées que le débit massique d'air asséchant est important, la couverture solaire est maximale pendant les mois d'été et diminue avec l'accroissement du débit d'air asséchant. Elle augmente avec le taux de recyclage de l'air asséchant. Le chapitre suivant est consacré à une étude de faisabilité technico-économique du séchoir convectif modulaire indirect à chauffage partiellement solaire.

CHAPITRE 5

ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE & ETABLISSEMENT D'ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT

5.1. Introduction

Le dimensionnement d'un système de séchage solaire est, compte-tenu du grand nombre de paramètres caractérisant son fonctionnement (type d'insolateurs, débit et température de l'air asséchant, taux de recyclage de l'air asséchant, flux solaire, cinétique de séchage, etc.) très complexe. Il est basé sur une modélisation et une simulation de son fonctionnement et une étude de faisabilité technico-économique. Afin d'établir des corrélations exprimant le taux de couverture solaire et la fraction de l'énergie économisée en fonction de quelques variables caractéristiques du fonctionnement du séchoir, nous avons dans un premier temps, déterminé les conditions optimales de séchage (température, débit d'air asséchant, taux de recyclage, épaisseur de la couche de la produit) en considérant que la durée de séchage est égale à la durée d'insolation du jour type considéré, plus précisément égale à une valeur comprise entre 8 heures et 12 heures qui dépend du numéro de la journée considérée. Ensuite, les résultats de nombreuses simulations du fonctionnement du séchoir ont été exploités par des modèles de régressions polynômiales et présentés sous par des corrélations exprimant le taux de couverture solaire et la fraction d'énergie économisée en fonction de variables adimensionnelles caractéristiques du fonctionnement du séchoir.

5.2. Notions d'économie [58]:

5.2.1. Valeur temps de l'argent (valeur actuelle et valeur future)

- Actualisation

L'analyse du cycle de vie d'un système de séchage solaire consiste à d'évaluer tous les coûts et les gains engendrés par le système et son fonctionnement, au cours de sa durée de vie. Afin de pouvoir comparer les coûts actuels avec les coûts et bénéfices qui auront lieu dans le futur, il faut déterminer l'équivalent actuel des dépenses et les gains futurs. Autrement dit, il est nécessaire de connaître le montant qui doit être investi aujourd'hui afin de

disposer des fonds pour couvrir les dépenses futures. En effet, un flux de trésorerie d'aujourd'hui (F_a) à une valeur monétaire future élevée compte tenu du taux d'intérêt auquel il est placé. Un flux de trésorerie (F_n) survenant (n) ans à partir d'aujourd'hui est réduit à sa valeur actuelle (F_a) par l'expression suivante:

$$F_a = \frac{F_n}{(1+\Omega)^n} = F_n PW_n \quad (5.1)$$

L'expression (5.1) montre que la valeur actuelle d'un flux financier futur est obtenue en multipliant ce flux futur par le facteur d'actualisation :

$$PW_n = \frac{1}{(1+\Omega)^n} \quad (5.2)$$

- Capitalisation

En d'autres termes, la diminution de la valeur de la monnaie ou du pouvoir d'achat de la monnaie conduit à une augmentation du flux financier. Ainsi, une dépense (D_0) inflatée à un taux d'inflation annuel (ζ), égale (D_0) à la fin de la première année, égale à $D_0 (1 + i)$ à la fin de la deuxième année, égale $D_0 (1 + i)^2$ à la fin de la troisième année et ainsi de suite.

Le coût futur (F_n) à la fin de l'année (n) est déduit de l'expression suivante:

$$F_n = D_0 (1 + \zeta)^{n-1} \quad (5.3)$$

5.2.2. Description de la méthode d'analyse de cycle de vie

La méthode d'analyse de cycle de vie est une évaluation de tous les coûts et les gains liés au cycle de vie du système de séchage. Tous les coûts et gains sont projetés dans le future et les résultats obtenus à partir d'une telle analyse dépendent largement des prévisions futures de ces coûts et bénéfiques. Tous ces coûts sont ensuite actualisés à leurs valeurs actuelles afin de déterminer la somme de ces flux de trésorerie actualisés. En général, la valeur actuelle (actualisée) d'un investissement (C) à la fin de l'année (n) avec un taux d'actualisation (Ω) et un taux d'intérêt (i) est obtenue en combinant les expressions (5.1) et (5.3):

$$PW_n = C^1 \frac{(1+\xi)^{n-1}}{(1+\Omega)^n} \quad (5.4)$$

La relation (5.4) permet de déterminer la valeur actuelle d'un investissement ou d'un bénéfice futur soumis à des taux d'inflation et d'actualisation des paiements échus à la fin de la date (n) exprimée en années.

La valeur actuelle totale est obtenue en additionnant les (n) valeurs actualisées de flux de trésorerie futur :

$$TPW = C^1 \sum_{j=1}^n \frac{(1+\xi)^{j-1}}{(1+\Omega)^j} = C^1 PWF(n, \xi, \Omega) \quad (5.5)$$

Où $PWF(n, i, \Omega)$ représente le facteur d'actualisation à partir de la valeur future [58]:

$$PWF(n, i, \Omega) = \sum_{j=1}^n \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+\Omega)^j} = \begin{cases} \frac{1}{\Omega - \xi} \left[1 - \left(\frac{1+\xi}{1+\Omega} \right)^n \right] & \Omega \neq \xi \\ \frac{n}{1+\xi} & \Omega = \xi \end{cases} \quad (5.6)$$

Si on tient compte du taux d'intérêt d'emprunt (i), le taux d'inflation ξ dans l'expression (5.6) est remplacé par le taux d'intérêt effectif ξ' , le taux d'intérêt effectif est défini comme incluant le taux d'intérêt et le taux d'inflation (variation) qui est donné par la relation suivante:

$$\xi' = \frac{i+1}{\xi+1} - 1 = \frac{i-\xi}{1+\xi} \quad (5.7)$$

5.3. Analyse des coûts du système de séchage solaire

5.3.1. Coût d'investissement

Ce coût regroupe l'ensemble des dépenses engagées pour l'achat et l'installation d'un système de séchage solaire. Le coût initial est un paramètre essentiel du projet de séchage solaire. Il s'agit notamment du coût des équipements tels que les insolateurs, de l'unité de séchage, des ventilateurs, des dispositifs de contrôles (thermorégulateur, régulateur de débit, et régulateur

d'humidité), des conduits et du système de chauffage d'appoint et de divers frais (emprunt, impôt foncier, taxes, assurances, etc.).

- Calcul du coût initial du séchoir solaire

Le coût initial du séchoir solaire C_S , est donné par la somme de deux termes: C_C , dépendant de la surface de l'aire des insolateurs et C_I indépendant de l'aire des insolateurs.

$$C_S^0 = A_C C_C + C_I \quad (5.8)$$

Dans, notre cas, ce coût correspond au montant de l'emprunt effectué. Ce coût sera réparti sur (ne) années d'amortissement et le remboursement s'effectue à la fin de chaque année. Si l'on tient compte de l'inflation, le taux d'inflation (ζ_e) est remplacé par le taux d'inflation effectif (ξ'_e) .

La valeur de l'annuité constante à l'année (j) est donnée par :

$$\hat{C}_S^j = C_S^0 \frac{\xi'_e (1 + \xi'_e)^{ne}}{(1 + \xi'_e)^{ne} - 1} (1 + \Omega)^j \quad J=1 \text{ à } n_e \quad (5.9)$$

La valeur totale actualisée du remboursement \hat{C}_S durant la durée d'emprunt (ne) sera égale à :

$$\hat{C}_S = C_S^0 \frac{\xi'_e (1 + \xi'_e)^{ne}}{(1 + \xi'_e)^{ne} - 1} \sum_{j=1}^{ne} \frac{1}{(1 + \Omega)^j} = C_S^0 \frac{\xi'_e (1 + \xi'_e)^{ne}}{(1 + \xi'_e)^{ne} - 1} \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + \Omega} \right)^{ne}}{\Omega} \right] \quad (5.10)$$

$$\text{Avec } \xi'_e = \frac{i - \xi_e}{1 + \xi_e} \quad (5.11)$$

Pour un coût initial payé comptant, l'expression (5.10) se réduit à $\hat{C}_S = C_S^0$

- Calcul du coût d'assurance

Le coût d'assurance (C_A^0) , évalué pour l'année (0) , est égal au pourcentage du coût initial emprunté :

$$C_A^1 = \rho_A C_S^0 \quad (5.12)$$

La valeur actuelle totale \hat{C}_A des coûts d'assurance pendant la durée de vie du système est donnée par:

$$\hat{C}_A = \sum_{j=1}^n \hat{C}_A^j = \rho_A C_S^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1+\zeta_A)^{j-1}}{(1+\Omega)^{j-1}} = \rho_A C_S^0 \frac{(1+\Omega)}{\Omega - \xi_M} \left[1 - \left(\frac{1+\xi_M}{1+\Omega} \right)^n \right] \quad (5.13)$$

Le coût d'investissement pendant la durée de vie du système est donnée par: $\hat{C}_I = \hat{C}_S + \hat{C}_A$

$$\hat{C}_I = C_S^0 \frac{\zeta'_e (1+\zeta'_e)^{ne}}{(1+\zeta'_e)^{ne} - 1} \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1+\Omega} \right)^{ne}}{\Omega} \right] + \rho_A C_S^0 \frac{(1+\Omega)}{\Omega - \xi_M} \left[1 - \left(\frac{1+\xi_M}{1+\Omega} \right)^n \right] \quad (5.14)$$

5.3.2. Coût de fonctionnement

Ce coût rassemble l'ensemble des coûts mis en jeu après la mise en service du séchoir. Le coût de fonctionnement comprend les coûts d'exploitation (consommation d'énergie, achat des produits frais), coûts de la main-d'œuvre, couts de maintenance (couvre les frais d'entretien du système, et éventuellement le coût de transport). Le coût de fonctionnement pour l'année (0) se décompose comme suit:

$$C_f^0 = C_{AUX}^0 + C_{PF}^0 + C_{MO}^0 + C_M^0 \quad (5.15)$$

Dans lesquelles C_{aux}^0 , C_{PR}^0 , C_{MO}^0 et C_M^0 désignent respectivement les coûts d'énergie conventionnelle d'appoint, d'acquisition des produits frais, de la main d'œuvre et de la maintenance pendant l'année (0).

- Consommation électrique annuelle: $C_{AUX}^0 = Q_{AUX} C_{U-AUX}^0$, $Q_{AUX} = Q_{AUX_EL} + Q_{AUX_V}$
- Consommation électrique du ventilateur : $Q_{AUX_V} = R W$
- Consommation électrique de l'appoint : Q_{AUX_EL}
- Achat des produits frais : $C_{PF}^0 = M_{PF} C_{U_PF}^0$
- Dépenses liées à la main d'œuvre : $C_{MO}^0 = n_j D_{cy} C_{U_MO}$

- Coût de maintenance: $C_M^0 = C_S^0 \rho_m$

Les formules de capitalisation et d'actualisation permettent de sommer ce coût en valeur actualisée sur la durée de vie du système :

$$\begin{aligned}
\hat{C}_F &= C_{AUX}^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1 + \xi_{AUX})^{j-1}}{(1 + \Omega)^j} + C_{PF}^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1 + \xi_{PF})^{j-1}}{(1 + \Omega)^j} + C_{MO}^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1 + \xi_{MO})^{j-1}}{(1 + \Omega)^j} + \\
&+ C_M^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1 + \xi_M)^{j-1}}{(1 + \Omega)^j} = C_{AUX}^0 \frac{1}{\Omega - \xi_{AUX}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{AUX}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + \\
&+ C_{PF}^0 \frac{(1 + \Omega)}{\Omega - \xi_{PF}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{PF}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + C_{MO}^0 \frac{1}{\Omega - \xi_{MO}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{MO}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + \\
&+ C_M^0 \frac{1}{\Omega - \xi_M} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_M}{1 + \Omega} \right)^n \right]
\end{aligned} \tag{5.16}$$

5.3.3. Coût global du système

Le coût global du système pendant l'année (0) est égal aux différentes dépenses annuelles

$$C_g^0 = C_I^0 + C_F^0 \tag{5.17}$$

Le coût global actualisé \hat{C}_G du système pendant sa durée de vie N est égal à la somme des dépenses annuelles. Toutes ces dépenses, sont actualisées pour les ramener à l'année zéro où est réalisé l'investissement ($\hat{C}_G = \hat{C}_I + \hat{C}_F$).

$$\begin{aligned}
\hat{C}_G &= C_S^0 \frac{\xi_e' (1 + \xi_e')^{ne}}{(1 + \xi_e')^{ne} - 1} \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + \Omega} \right)^{ne}}{\Omega} \right] + \rho_A C_S^0 \frac{(1 + \Omega)}{\Omega - \xi_M} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_M}{1 + \Omega} \right)^n \right] + \\
&+ C_{AUX}^0 \frac{1}{\Omega - \xi_{AUX}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{AUX}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + C_{PF}^0 \frac{(1 + \Omega)}{\Omega - \xi_{PF}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{PF}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + \\
&+ C_{MO}^0 \frac{1}{\Omega - \xi_{MO}} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_{MO}}{1 + \Omega} \right)^n \right] + C_M^0 \frac{1}{\Omega - \xi_M} \left[1 - \left(\frac{1 + \xi_M}{1 + \Omega} \right)^n \right]
\end{aligned} \tag{5.18}$$

5.3.4. Economie réalisée

L'économie réalisée par l'insolateur, correspondant à la puissance utile Q_U délivrée par m^2 d'insolateurs. Dans le cas général, elle est exprimée par le produit de la fraction de la quantité de chaleur totale captée par les insolateurs ou couverture solaire (F) et la puissance totale consommée (Q_t).

Economie annuelle réalisée :

$$E_R^0 = C_{U-AUX}^1 \sum_{j=1}^{12} Q_U^j = C_{U-AUX}^1 \sum_{j=1}^{12} f_j Q_t^j \quad (5.19)$$

Economie mensuelle réalisée :

$$E_{réalisé}^0(j) = C_{u-aux}^0 Q_u(j) = C_{u-aux}^0 f(j) Q_t(j) \quad 1 \leq j \leq 12 \quad (5.20)$$

L'économie totale actualisée réalisée est donnée par l'équation suivante :

$$\hat{E}_R = \sum_{j=1}^n \hat{E}_j = E_R^0 \sum_{j=1}^n \frac{(1 + \zeta_{AUX})^{j-1}}{(1 + \Omega)^j} = E_R^0 \frac{1}{\Omega - \zeta_{AUX}} \left[1 - \left(\frac{1 + \zeta_{AUX}}{1 + \Omega} \right)^n \right] \quad (5.21)$$

5.3.5. Coût de la recette global

Le coût de la recette globale réalisée pendant la première année provient de la vente des produits secs. Elle dépend, par conséquent, de la quantité de produits et de leurs prix de vente. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} R_g^0 = \beta_s M_{pf} n_{cy} C_{u-ps}^1 \\ \beta_s = \frac{M_{ps}}{M_{pf}} \end{cases} \quad (5.22)$$

La recette globale actualisée sur la durée de vie du système sera :

$$\hat{R}_G = \sum_{j=1}^n \hat{R}_G^j = R_g^0 \sum_{i=1}^N \frac{(1 + \xi_{ps})^{i-1}}{(1 + \Omega)^i} = R_g^0 \frac{1 - \left(\frac{1 + \xi_{ps}}{1 + \Omega} \right)^n}{\Omega - \xi_{ps}} \quad (5.23)$$

5.3.6. Flux financier net (Bénéfice)

Bénéfice réalisé pendant l'année (0) :

$$F_{f-net}^0 = B^0 = R_g^0 - C_g^0 \quad (5.24)$$

Le mouvement de trésorerie est le solde des flux de caisse engendrés par un investissement à la fin de la durée de vie de système. En d'autres termes, il s'agit de la différence entre les entrées et les sorties monétaires au cours du cycle de vie. Il est donné par :

$$\hat{F}_{f_net} = \hat{B} = \hat{R}_G - \hat{C}_G \quad (5.25)$$

5.3.7. Coût du séchage

Pendant l'année (0), le coût de séchage par poids unitaire du produit séché est évalué par le rapport entre le coût global durant la première année et la quantité de produit séché par an [64]. Il peut être comparé à celui obtenu en utilisant une source d'énergie conventionnelle. Le coût de séchage est exprimé par la relation suivante :

$$C_{ps}^0 = \frac{\text{Coût total de la première année}}{\text{Quantité de produit séché par an}} = \frac{C_G^0}{240 \beta_s M_{PF}} \text{ (DA/kg)} \quad (5.26)$$

Le coût de séchage actualisé par kg de produit sec pendant toute la durée de vie du système vérifie l'expression suivante:

$$\hat{C}_{ps} = \frac{\hat{C}_G}{240 n \beta_s M_{PF}} \text{ (DA/kg)} \quad (5.27)$$

5.4. Paramètres économiques adimensionnels

Les paramètres économiques adimensionnels utilisés dans notre modélisation sont :

$$\text{- Rendement global des investissements actualisé } \hat{\eta} = \frac{\hat{B}}{\hat{C}_g} \quad (5.28)$$

$$\text{- Part du solaire dans le bénéfice actualisé } P_{SB} = \frac{\hat{E}_R}{\hat{B}} \quad (5.29)$$

$$\text{- Période de récupération: } P_R = \frac{\hat{C}_S}{R_g - (\hat{C}_A + \hat{C}_F + \hat{C}_M)} \quad (5.30)$$

5.5. Méthodologie

L'évaluation économique est basée sur le calcul de la valeur de l'aire de l'insolateur ($\frac{\partial C_S}{\partial A_c} = 0$) pour laquelle le coût du système de séchage et de son

fonctionnement sont optimaux. La durée d'amortissement est supposée atteinte lorsque la somme des gains financiers générés par le séchoir est égale au montant de l'investissement initial (Bénéfice actualisé= coût de l'investissement initial actualisé). Pour mener à bien ce calcul, nous avons développé un programme écrit en Fortran, basé sur l'organigramme présenté à l'annexe H. Les principales relations reportées ci-dessus (5.28, 5.29, 5.30), les formules d'actualisation / capitalisation et les données économiques reportées dans le tableau (5.1) :

Les relations (5.28, 5.29, 5.30) sont utilisées pour obtenir les résultats ci-dessous

Paramètres	symbole	valeur	Unité
Durée de vie	N	20	an
Cycle de crédit Ne	Ne	5	an
Cycle de séchage	ts	8-12	h
masse sèche/masse	β_s	0.127	/
Prix du produit frais	C_{u-pf}	20±10	DA/kg
Prix du produit séché	C_{u-ps}	350-500	DA/kg
Travail de l'employé	/	125	DA/h
Main-d'œuvre	/	1	homme
Taux d'utilisation	/	240	jours/an
Prix kWh	/	3.65	DA/kWh
Taux Maintenance/ C_0	M_M	4	%
Taux Assurance/ C_0	M_A	1	%
Taux de variation annuels			
Assurance	ζ^A	3	%
Produit séché	ζ^{ps}	-5	%
Produit frais	ζ^{pf}	5	%
Emprunt	ζ^e	0.03	%
Electricité	ζ^{el}	3	%
Taux d'inflation	i	5.3	%
Taux d'intérêt emprunt	i_e	16	%
Taux d'actualisation	Ω	8	%
coût des composants du système de séchage			
Insolateur simples	/	40.000	DA
conduits +régulation	/	5000	DA

Ventilateur	/	2.000	DA
Chauffage auxiliaire	/	3.000	DA
Chambre de séchage	/	20.000	DA
Coût total du capital	/	70.000	DA

Tableau 5.1 : Données utilisées dans les calculs

Les valeurs des paramètres économiques reportées dans le tableau (5.1) montrent que les insolateurs représentent la plus grande part de l'investissement de ce système de séchage solaire.

5.6. Résultats et discussion

Les calculs ont été effectués en supposant que la durée d'une opération de séchage est, au maximum, égale à celle de la durée d'ensoleillement. Les teneurs en eau initiale et finale de la menthe sont prises égales à 53 % (base humide) et 10 % (base humide). Les données météorologiques et radiométriques, basées sur la notion de journée type utilisées dans nos simulations sont celles d'Alger (Algérie). Nous avons analysé l'influence du débit de l'air asséchant ($0,14 \text{ kg.s}^{-1}$ à $0,30 \text{ kg.s}^{-1}$), de l'aire de l'insolateur (1 m^2 à 10 m^2) sur le rendement de l'insolateur et le taux de couverture solaire pour trois valeurs du taux de recyclage de l'air asséchant (25 %, 50 % et 75 %) à travers le séchoir. Les valeurs retenues pour les paramètres caractéristiques du modèle économique sont reportées dans le tableau (5.1).

5.6.1. Période d'amortissement

Le temps de retour sur investissement est une fonction de la quantité d'énergie économisée, des coûts de l'énergie nécessaire à son fonctionnement et du montant de l'investissement. La durée d'amortissement (ou délai de récupération) augmente avec la surface de captation du flux solaire, donc du nombre d'insolateur (figure 5.1). Il est à noter que la durée de cette période d'amortissement diminue avec l'augmentation du prix de vente de la menthe séchée. Ainsi, pour une aire de captation du flux solaire de 2 m^2 et les conditions optimales de fonctionnement (débit= 0.3 kg.s^{-1} , Température= $35 \text{ }^\circ\text{C}$, fraction de l'air recyclé 50 %) la période de fonctionnement est d'environ deux années. Le débit d'air asséchant et son taux de recyclage influencent de façon significative le délai d'amortissement (figure 5.2). Ainsi, une augmentation d'une part, du taux de

recyclage et d'autre part, du débit d'air asséchant conduisent à une diminution du délai d'amortissement. Ces résultats sont corroborés par ceux obtenus lors de l'analyse de l'influence du taux de recyclage de l'air asséchant et du débit d'air sur la durée de séchage et le rendement du séchoir.

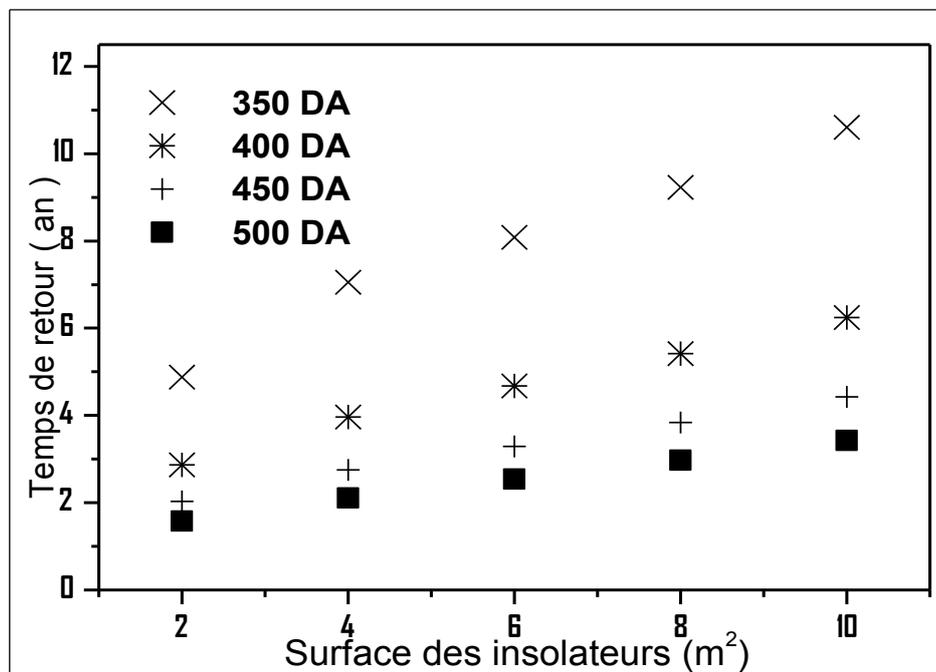


Figure 5.1 : Evolution du délai d'amortissement en fonction de l'aire des insolateurs.
Influence du prix de vente d'un kg de menthe sèche

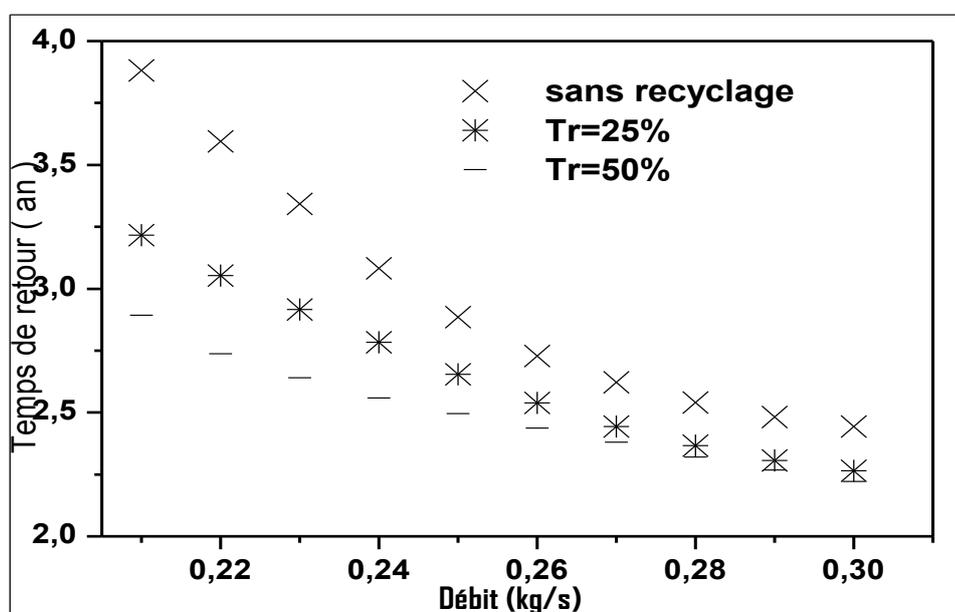


Figure 5.2 : Evolution du délai d'amortissement en fonction du débit d'air asséchant.
Influence du taux de recyclage

5.6.2. Flux financier net

L'accroissement de l'aire des insolateurs conduit naturellement à une augmentation du coût de séchage mensuel puisque le coût de l'investissement est d'autant plus élevé que le nombre d'insolateurs est important. Sur la figure (5.3), nous avons reporté l'évolution du flux financier net en fonction de l'aire des insolateurs. Nous observons que pour les valeurs des taux de recyclage considérées, ce flux passe par une valeur minimale pour une aire d'insolateur égale à 4 m². Il atteint des valeurs maximales qui dépendent du taux de recyclage de l'air asséchant. Ainsi, ces valeurs maximales sont obtenues pour une aire de 2m² pour un fonctionnement sans recyclage de l'air asséchant, pour une aire égale à 2 m² pour un fonctionnement avec un taux de recyclage égal à 25 % et 50 %.

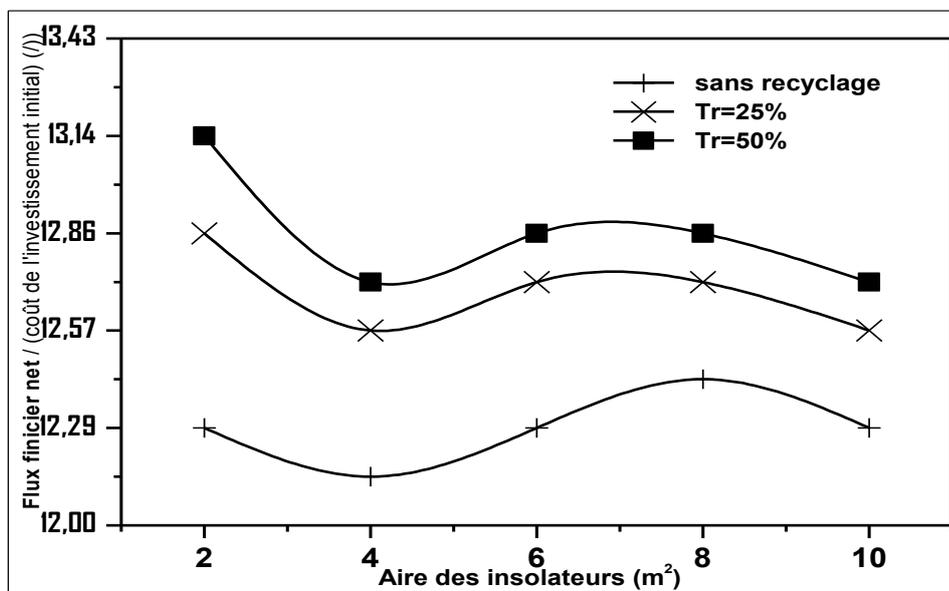


Figure 5.3 : Evolution du flux financier net en fonction de la surface des insolateurs. Influence du taux de recyclage de l'air asséchant.

5.6.3. Durée d'utilisation

Le taux d'utilisation du système de séchage est crucial pour sa rentabilité. La figure (5.4) montre la variation du temps de retour sur investissement pour l'achat du système de séchage, en fonction de son taux d'utilisation. Un taux d'utilisation supérieur à 5 mois/an conduit à un temps de retour inférieur à 5 ans. Un système utilisé moins de 3 à 4 mois par an ne sera donc pas rentable.

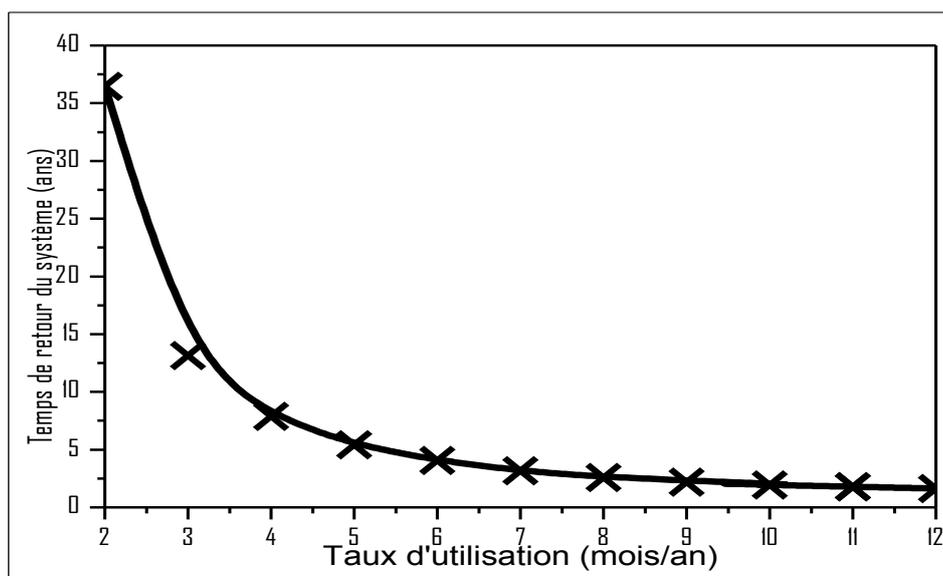


Figure 5.4 : Temps de retour de l'investissement du système de séchage en fonction du taux d'utilisation.

5.7 Abaques de dimensionnement

5.7.1 Méthode

Les différentes quantités de chaleurs en moyennes mensuelles sont données par (voir Chapitre 2) :

$$\dot{H}_G = A_c \int_{ti}^{tf} Q_s dt \quad (5.31)$$

$$\dot{Q}_u = \int_{ti}^{tf} \dot{m} C_p (T_{sc} - T_{ec}) dt \quad (5.32)$$

$$\dot{Q}_{recy} = \int_{ti}^{tf} \dot{m} C_p (T_{recy} - T_{am}) dt \quad (5.33)$$

$$\dot{Q}_{ven} = \int_{ti}^{tf} P_n dt \quad (5.34)$$

$$\dot{Q}_{ap} = \int_{ti}^{tf} \dot{m} C_p (T_{reg} - T_{sc}) dt \quad (5.35)$$

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{ap} + \dot{Q}_{ven} + \dot{Q}_{recy} = \int_{ti}^{tf} \dot{m} C_p (T_{reg} - T_{am}) dt + \dot{Q}_{ven} \quad (5.36)$$

La fraction de la quantité de chaleur économisée est définie comme étant le rapport entre la somme de la quantité de chaleur délivrée par l'insolateur et la

quantité de chaleur recyclée sur la quantité de chaleur totale nécessaire au séchage.

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{ap} + \dot{Q}_{ven} + \dot{Q}_{recy} = \int_{ti}^{tf} \dot{m} C_p (T_{reg} - T_{am}) dt + \dot{Q}_{ven} \quad (5.37)$$

Dans le cas où le recyclage de l'air asséchant n'est pas considéré ($Q_{recy}=0$), J représente la couverture solaire F [64]. Cette grandeur est définie comme étant le rapport entre la quantité de chaleur délivrée par l'insolateur à la somme de cette quantité de chaleur, de celle fournie par la source auxiliaire conventionnelle et celle utilisée pour le fonctionnement du ventilateur.

$$F = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_u + \dot{Q}_{ap} + \dot{Q}_{ven}} \quad (5.38)$$

Définissons deux paramètres adimensionnels Z et Z^*

$$Z = \frac{\bar{Q}_s}{A_c \bar{H}_G} \quad (5.39)$$

$$Z^* = \frac{\bar{Q}_s}{A_c \bar{H}_G} + T_R = Z + T_R \quad (5.40)$$

La méthode de dimensionnement est basée sur la recherche de relations semi-empiriques exprimant la couverture solaire $F(Z)$ en fonction du variable Z et la fraction de chaleur économisée $J(Z \text{ ou } Z^*)$ en fonction de Z ou Z^* .

5.7.2. Méthodologie numérique

Après avoir exposé quelques éléments de base nécessaires à la définition de variables, nous décrivons les démarches adoptées pour élaborer des outils de dimensionnement du séchoir modulatoire à chauffage partiellement solaire. La démarche utilisée pour établir ces outils consiste à effectuer des simulations pour analyser l'influence de plusieurs paramètres de séchage (température de l'air asséchant, débit massique d'air asséchant, masse du produit frais, taux de recyclage de l'air asséchant) sur les performances thermique du système de séchage. La durée de séchage est fixée à 8h durant les mois d'hiver et à 12 h

durant les mois d'été afin de réduire au maximum la consommation de l'énergie fournie par la source auxiliaire. Les simulations sont basées sur le concept du jour moyen. Pour prédire les performances thermiques moyennes à long terme des séchoirs solaires, nous effectuons donc l'intégration de (5.31 – 5.36) sur une période d'une journée pour chaque mois de l'année. Le pas d'intégration est d'une heure (3600 s). Comme il a été indiqué plus haut, le dimensionnement passe par la connaissance de la relation existant entre les paramètres caractérisant les performances thermiques du séchoir et l'aire de captation de l'insolateur. Nous avons utilisé le logiciel (Tablecurve 2d) qui intègre des outils d'ajustement de courbes permettant de trouver l'équation idéale pour décrire les nuages de points issues de la simulation du système de séchage. Dans certaines circonstances, les ajustements de ces tracés permettent de justifier ou d'améliorer le choix des variables caractéristiques. Dans la suite, nous allons chercher les variables appropriées pour représenter le mieux possible les corrélations tout en veillant à obtenir des outils de dimensionnement simples. L'organigramme (figure H.4) présenté à l'annexe H illustre les différents paramètres définissant le système de séchage et la méthode de détermination des relations polynômiales de dimensionnement respectivement.

5.7.3. Résultats

5.7.3.1 Débit d'air asséchant optimum

Des simulations ont été effectuées pour les valeurs des températures de consigne de l'air asséchant comprises entre 30 et 55°C, des débits d'air massique de l'air asséchant entre 0.05 kg.s⁻¹ et 0.25 kg.s⁻¹, de masse de produits frais variant entre 5 kg et 20 kg et un taux de recyclage d'air asséchant compris entre 10 % et 60 %. Nous avons utilisé Microsoft Excel pour sélectionner les résultats des simulations selon le critère de la durée du cycle de séchage. Ce critère permet d'éliminer les valeurs de débits d'air pour lesquelles la durée du séchage est supérieure à celle retenue dans nos simulations. La figure (5.5) montre que pour que cette durée de séchage soit conforme aux valeurs présentées ci-dessus, le débit d'air optimal de l'air asséchant doit être compris entre 0,07 kg.s⁻¹ et 0,084kg.s⁻¹. Ainsi, pour une durée de séchage égale à 10h, le débit d'air asséchant moyen est de l'ordre de 0,077 kg.s⁻¹.

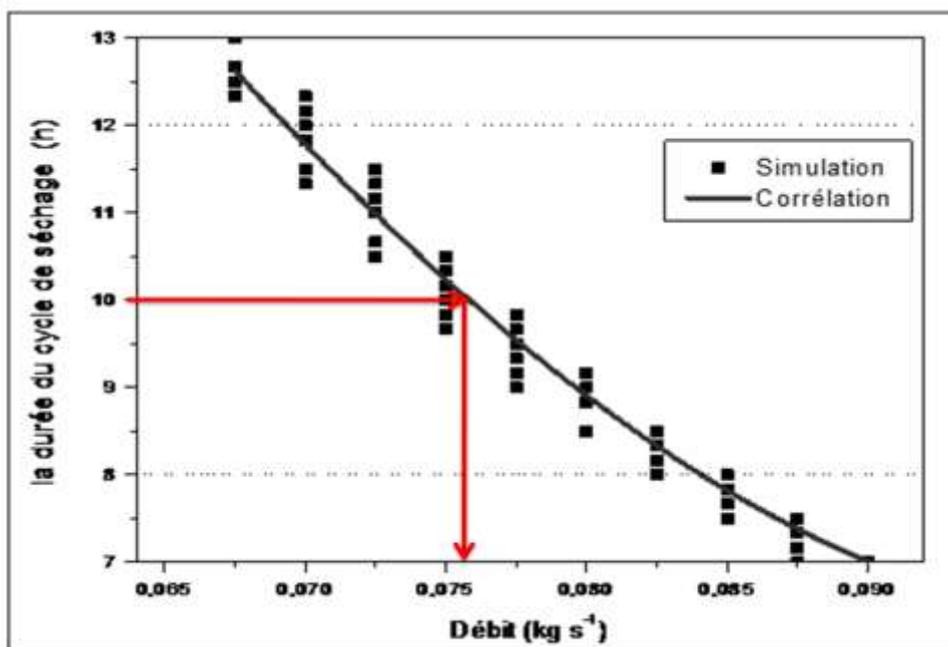


Figure 5.5 : Détermination du débit optimal d'air asséchant

La durée du cycle de séchage peut être estimée par la relation empirique suivante :

$$t_s = 38.74594 - 241.78934 \dot{m}_s - 4907.07149 \dot{m}_s^2 + 55065.95552 \dot{m}_s^3 \quad (5.41)$$

$$0.065 \leq \dot{m}_s \leq 0.09 \quad R^2=0.974$$

5.7.3.2 Couverture solaire

Les résultats des simulations, peuvent être exprimés par une relation entre la couverture solaire et la variable Z pour le séchage des feuilles de menthe sans recyclage pour différents aires d'insolateur, comme présenté sur la figure (5.6). Chaque courbe correspond à une aire donnée d'insolateur. La variable Z représente le déphasage entre la moyenne journalière du besoin énergétique pour le séchage et la moyenne journalière du flux solaire capté par les insolateurs. Pour une aire d'insolateur de 2 m^2 la fraction solaire moyenne varie entre 10 % et 70 % et, la variable Z entre 1 et 3. Les besoins en énergie pour le séchage sont de 1 à 3 fois le flux solaire captée par les insolateurs. La couverture solaire est d'autant plus élevée que la température de l'air asséchant est faible. Ainsi pour une aire d'insolateur égale à 2 m^2 et une température de l'air asséchant de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ la couverture solaire est maximale et atteint 70 %.

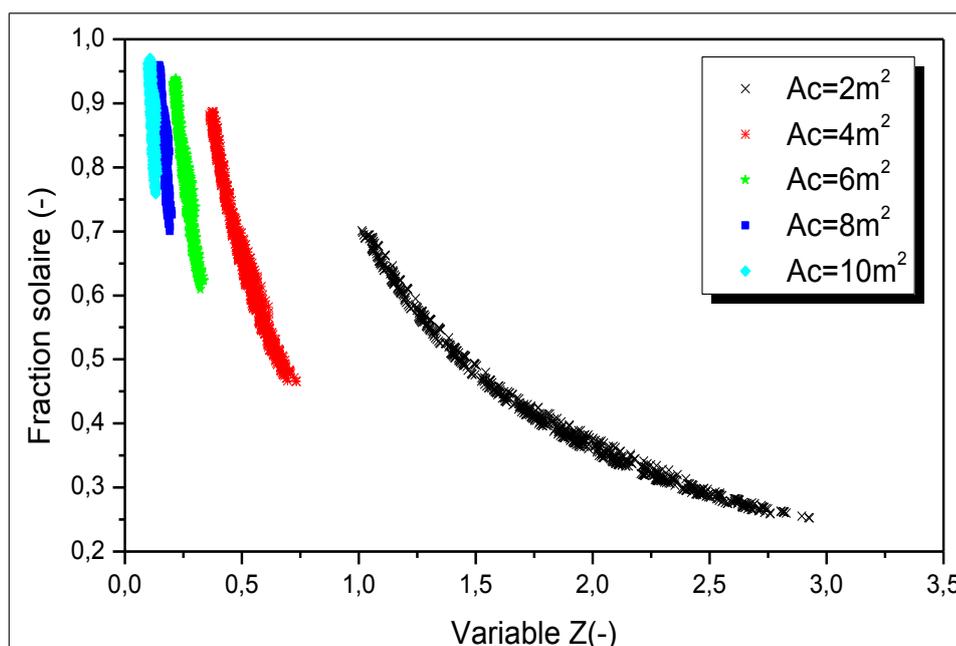


Figure 5.6 : Relation entre la couverture solaire et la variable Z pour le séchage des feuilles de menthe sans recyclage

Le tracer des courbes de la figure (5.6) est basé sur un lissage des courbes de points de coordonnées (F, Z) , issus des simulations. On constate que la fonction $F=g(Z)$ n'est pas linéaire pour des valeurs élevées de la variable Z. On note toutefois qu'une très bonne correspondance entre la relation $F=g(Z)$ et les données de simulation.

A_c	a_0	a_1	a_2	a_3	ES	R^2
2 m ²	1.690	-1.435	0.5245	-0.069	0.002	0.99664
4 m ²	2.303	-5.987	6.8785	-2.939	0.781	0.981927
6 m ²	0.748	7.731	-47.1358	67.934	0.581	0.953982
8 m ²	-	107.600	-680.1668	1371.3	0.681	0.938896
10 m ²	-	354.500	-	8854.5	0.581	0.923362

Tableau 5.2 : Équations de régression de la couverture solaire et de la variable Z pour différents aire d'insolateur

$$F = a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + a_3 Z^3 \quad 0 \leq Z \leq 3 \quad (5.42)$$

5.7.3.3. Fraction de chaleur économisée

La fraction d'énergie économisée est une fonction décroissante de Z (Figure 5.7). Notons qu'elle est d'autant plus élevée que le temps de recyclage est important

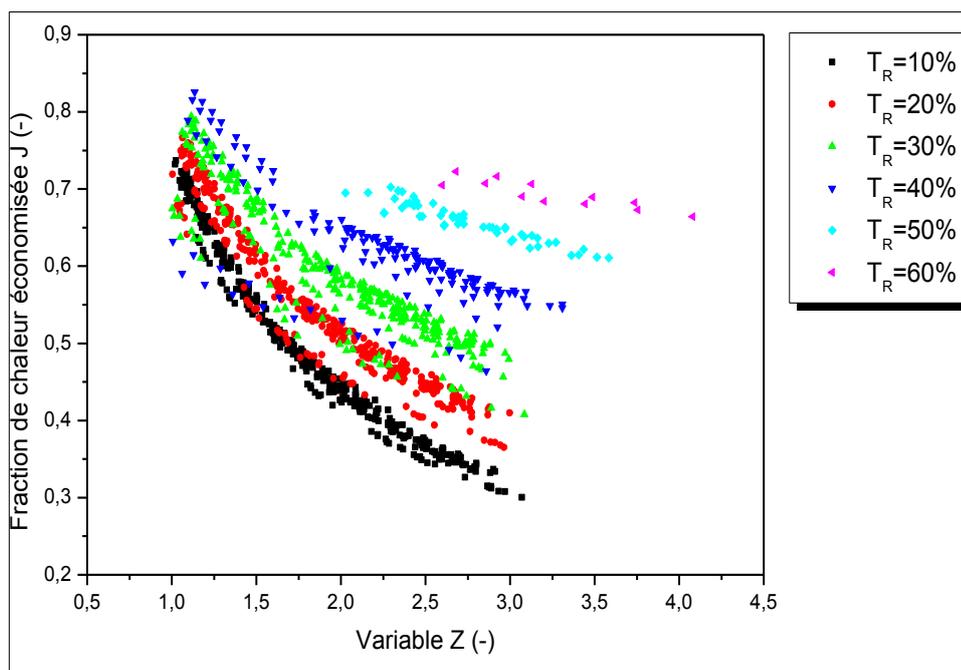


Figure 5.7 : Fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z pour plusieurs taux de recyclage de l'air asséchant

TR(%)	a_0	a_1	a_2	a_3	ES	R^2
10%	1.5387	-1.145	0.39977	-0.051	0.002	0.98937
20%	1.4085	-0.911	0.31076	-0.040	0.043	0.95525
30%	1.2663	-0.671	0.21715	-0.027	0.112	0.97189
40%	1.0397	-0.323	0.07493	-0.009	0.011	0.97518
50%	0.41974	0.381	-0.15836	0.01862	0.083	0.99929
60%	0.6427	0.1318	-0.05303	0.0053	0.012	0.95321

Tableau 5.3 : Équations de régression de la fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z pour plusieurs taux de recyclage de l'air asséchant :

$$J = a_0 + a_1Z + a_2Z^2 + a_3Z^3 \quad 1 \leq Z^* \leq 3 \quad (5.43)$$

En utilisant la variable Z^* , on obtient une relation présentée par la figure(5.8). Des renseignements intéressants peuvent être tirés de cette figure. Ainsi en modifiant la variable donnée par l'équation (5.44), on obtient une courbe unique. Malgré une légère dispersion des points qui correspond aux taux de recyclage élevés (figure 5.8). Toutes fois, là encore, cette dispersion n'est pas importante et on peut considérer que la corrélation est acceptable.

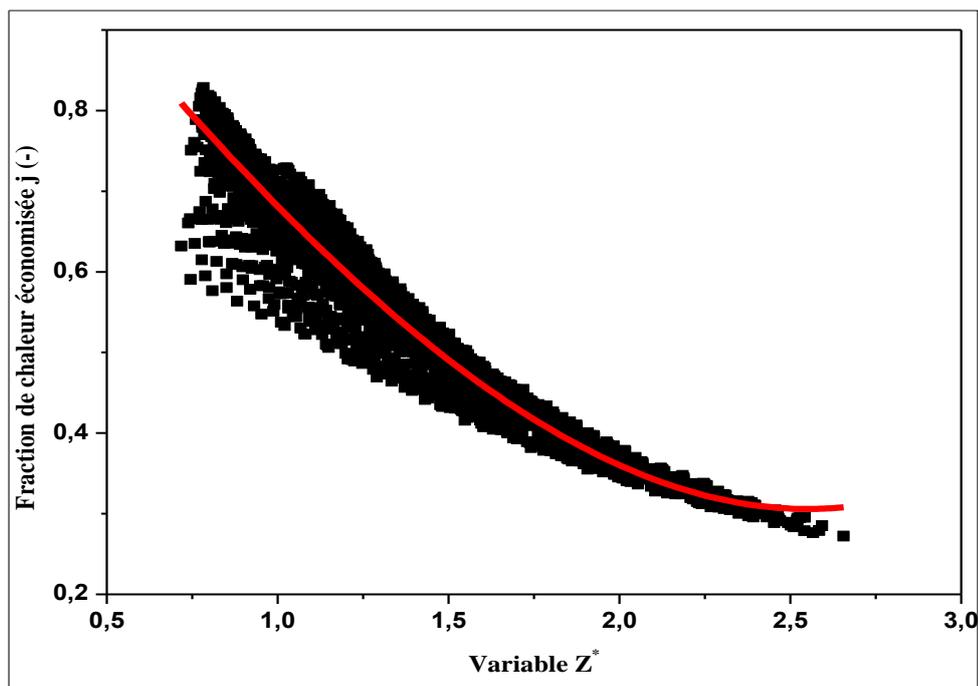


Figure 5.8 : Fraction de l'énergie économisée en fonction de la variable Z^*

La relation présentée sur la figure (5.8) peut être exprimé par la relation empirique suivante :

$$J = 1.17545 - 0.53561 Z^* - 0.01919 Z^{*2} + 0.02241 Z^{*3} \quad 0.75 \leq Z^* \leq 2.5 \quad R^2 = 0.94562 \quad (5.44)$$

Notons que pour exploiter les corrélations reportées ci-dessus, il suffit de connaître le flux solaire journalier, en moyenne mensuelle capté par l'insolateur pour un site donné; de déterminer la quantité de chaleur totale nécessaire au séchage du produit; de fixer une valeur de la couverture solaire pour en déduire ensuite d'une manière simple l'aire des insolateurs A_c . Le taux de recyclage approprié conduit à la connaissance de la fraction de la quantité de chaleur économisée.

5.8. Conclusion

Nous avons procédé à une analyse sommaire de la faisabilité thermo-économique d'un système de séchage modulaire. Nous avons montré que :

- Le taux de couverture solaire et le rendement de l'insolateur sont respectivement égaux à 60% et 75% et que le temps de retour sur investissement est de 2 ans pour un prix de vente de la menthe séchée de 400 Da/kg. Pendant l'été, où la température extérieure de l'air est voisine de 30°C, la couverture solaire

peut atteindre 80% et le coût de séchage peut être très compétitif pour des quantités importantes de produit.

- Le flux financier net est d'autant plus important que le taux de recyclage est élevé et il existe une même valeur pour laquelle ce flux financier est minimal.

- La rentabilité du système de séchage solaire est incontestable pour une utilisation annuelle supérieure à 8 mois.

Nous avons établi également des corrélations pour le dimensionnement d'un séchoir solaire pour des feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*). Les conditions optimales de séchage ont été déterminées en imposant une durée de séchage inférieure ou égale à la durée de l'ensoleillement du jour type moyen du mois considéré, soit une valeur comprise entre 8h en et 12h. Ces corrélations représentées par des expressions polynômiales du taux de couverture solaire et de la fraction d'énergie économisée en fonction des variables adimensionnelles respectivement Z et Z^* . Nous disposons ainsi d'une méthode simple de dimensionnement des systèmes de séchage à chauffage partiellement solaire. Cette méthode peut être appliquée à d'autres produits aromatiques et médicinaux pour lesquels les mêmes conditions de séchage sont similaires.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons procédé à une modélisation et une simulation du fonctionnement d'un système de séchage modulaire à chauffage partiellement solaire pour les feuilles de menthe (*MENTHA SPICATA*) et déterminé expérimentalement la cinétique de séchage de ce produit notamment les isothermes de désorption et la courbe caractéristique de séchage. L'une des finalités de ce travail est de proposer un outil simple de dimensionnement d'un système de séchage modulaire pour feuilles de menthe.

Les équations qui régissent les transferts dans l'insolateur plan à air et l'enceinte de séchage, dans laquelle les feuilles de menthe sont disposées en couches minces ont été déduites de bilans thermique et massique établis pour chaque composant de l'insolateur et du séchoir. Ces équations sont résolues par un schéma implicite aux différences finies et la méthode "Diabolo-Sablier". Nous avons élaboré un programme informatique, écrit en langage Fortran, pour modéliser et simuler le fonctionnement du système de séchage. Le programme permet de déterminer les principales grandeurs caractéristiques du séchage telles que la température de l'air à la sortie de l'insolateur, la durée de séchage, la couverture solaire, les rendements de l'insolateur et du séchoir, etc. Pour simuler le fonctionnement de ce système de séchage nous avons utilisé les données météorologiques de la région d'Alger et la notion de journée type. La durée du séchage est prise égale à celle de la durée de l'ensoleillement de la journée considérée.

Nous avons réalisé une étude expérimentale sur ce système de séchage conçu et réalisé à l'EPST/CDER. (Alger). Cette étude expérimentale, combinée à d'autres études effectuées en laboratoire, nous ont permis de déterminer la vitesse de séchage, la courbe caractéristique de séchage (CSS), l'isotherme de sorption, le coefficient de diffusion effective, l'énergie d'activation pour les feuilles de menthe. Nous avons montré d'une part, que la diffusion diminue avec l'accroissement de la durée de séchage et que d'autre part, l'énergie d'activation de la menthe est voisine de celles des plantes aromatique et médicinales.

Les mesures de la vitesse de séchage pour plusieurs débits d'air et températures de l'air asséchant ont conduit à l'élaboration de la courbe

caractéristique de séchage des feuilles de menthe en fonction de la teneur en eau réduite du produit. Cette courbe est présentée sous la forme d'une expression polynômiale de la teneur en eau réduite des feuilles de menthe. Les mesures de l'évolution au cours du temps de la teneur en eau réduite ont été lissées et présentées sous la forme d'une expression fonction du temps. Nous avons constaté que la température et le débit d'air de l'air asséchant n'ont pas d'effet significatif sur le retrait. Cependant, le coefficient de diffusivité effective de l'eau du produit dépend fortement du retrait de la feuille de menthe. Nous avons exprimé le retrait de la surface feuilles de menthe par une expression polynômiale de la teneur en eau réduite. L'expression de la vitesse de séchage, de celle du retrait des feuilles de menthe lors du séchage et de l'isotherme de désorption, basée sur le modèle GAB, nous ont permis de compléter le modèle mathématique du séchoir et de modéliser et simuler le fonctionnement du séchoir.

Nous avons également montré que l'aire des insolateurs a un effet non négligeable sur le taux de couverture solaire. Ainsi, pour une masse de feuilles de menthe égale à 10 kg, une aire d'insolateur égale à 2 m², le taux de couverture solaire et le rendement de l'insolateur sont égaux 60% et 50% respectivement. Pour une aire d'insolateur donnée, le taux de couverture solaire est d'autant plus élevé, que le débit d'air asséchant est faible. L'augmentation de la température et du débit d'air asséchant réduit la durée de séchage. Ce dernier augmente avec la masse de produit frais.

Une analyse technico-économique sommaire de ce système de séchage montre qu'un taux de recyclage de l'air asséchant à travers l'enceinte de séchage contribue à une économie non négligeable de la quantité d'énergie nécessaire au séchage. Nous avons montré que ce système de séchage partiellement solaire est rentable compte tenu des prix actuels des feuilles de menthe séchées ainsi que du coût estimé de l'insolateur et de l'enceinte de séchage. Ainsi, pour une couverture solaire et un rendement de l'insolateur égaux respectivement à 60% et 75%, le temps de retour est de 2 ans pour un prix de vente de la menthe séchée de 400 DA/kg. Le flux financier net est d'autant plus important que le taux de recyclage de l'air asséchant à travers l'enceinte de séchage est élevé.

Les corrélations pour le dimensionnement de ce système de séchage sont basées sur des expressions polynômiales de la couverture solaire et de la fraction

d'énergie économisée en fonction de deux variables adimensionnelles caractéristique du fonctionnement du séchoir solaire à chauffage partiellement solaire. Cette méthode simple de dimensionnement peut être appliquée à d'autres produits aromatiques et médicinaux pour lesquels les mêmes conditions de séchage sont similaires.

Ce travail suggère quelques perspectives telles que :

- Une modélisation mathématique du rétrécissement 3D des feuilles de menthe lors du séchage,
- Une modélisation et une simulation du fonctionnement du système de séchage en régime turbulent,
- Une amélioration de l'analyse technico-économique
- Une détermination expérimentale des coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection entre les feuilles.

Annexe

A. SECHOIRS SOLAIRES

A.1. Introduction

Généralement, tous les dispositifs développés pour le séchage solaire sont basés sur l'établissement d'un flux d'air chaud sur les produits à sécher. Les principaux éléments qui composent les séchoirs solaires sont les suivants [65] :

l'insolateur ou le dispositif de transfert du flux solaire à l'air asséchant et/ ou produit ;

- L'armoire de séchage où l'on place le produit à sécher
- Un dispositif assurant l'écoulement de l'air asséchant;
- L'unité de stockage de chaleur (facultative) ;
- L'équipement de mesure et de contrôle (facultatif)
- Les éléments annexes tels que les conduites et autres accessoires.

Le design identifie au sein d'un système les différents éléments constitutifs du séchoir solaire qui dépend de la quantité du type, et de la classification du produit à sécher. La recherche scientifique dans ce domaine a permis de mettre l'accent sur les conditions qui contribuent à améliorer le processus de séchage. Parmi ces conditions nous citons :

- Augmentation de la quantité d'énergie récupérée par effet de serre ;
- Amélioration de l'écoulement d'air asséchant (par exemple l'effet cheminée est associée au séchage par convection naturelle.)

Nous avons choisi de présenter quelques types de séchoirs solaires que nous avons rencontrés dans la bibliographie (figures A.1-A.6).



Figure A.1 : Séchoir solaire indirect
CDER, Alger



Figure A.2 : Séchoir solaire indirect réalisé à
l'UDES, Tipaza



Figure A.3 : Séchoir solaire direct
développé à l'UDES, Tipaza



Figure A.4 : Séchoir solaire indirect à
convection naturelle (développé
par (L.E.N.R.E.Z.A.) de l'Université
d'Ouargla)



Figure A.5 : Système de séchage solaire indirect réalisé à l'U.R.A.E.R, Ghardaïa



Figure A.6 : Séchoir solaire indirect de type coquillage élaboré à l'institut national d'agronomie I.N.A, Alger

B. PROPRIETES DE L'AIR HUMIDE

B.1. Propriétés thermo-physiques de l'air humide

L'air est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. L'air sec est composé de :

- Azote (N₂) :78%
- Oxygène (O₂) :21%
- Argon (Ar), Dioxyde de carbone (CO₂), Hydrogène (H₂)
- Gaz rares (Néon, Hélium, Krypton, Xénon)

L'air et la vapeur d'eau peuvent être décrits indépendamment l'un de l'autre, en supposant qu'il se comporte comme des gaz parfaits. L'air humide est ensuite décrit en caractérisant le mélange de ces deux gaz en fonction du pourcentage de vapeur d'eau présent dans l'air. Nous présentons dans ce paragraphe quelques corrélations pour le calcul des principales propriétés thermo-physiques physiques de l'air. Ces corrélations ont été établies à l'aide de données bibliographiques et nous les avons utilisées pour résoudre les équations de transfert de masse et de chaleur établies dans la première partie de ce manuscrit.

B.1.1. Caractéristiques de l'air sec

- Pression

L'air se comporte comme un gaz parfait, d'où :

$$P_{as} V_{\infty} = n_{as} R T_{\infty} \quad \text{avec} \quad n_{as} = \frac{m_{as}}{M_{as}} \quad (\text{B.1})$$

R est la constante des gaz parfaits, m_{as} la masse d'air considérée et M_{as} la masse molaire de l'air, soit : $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $M_{as} = 29 \text{ g/mol}$

On peut donc déduire la pression d'air sec sous la forme :

$$P_{as} = 287 \frac{m_{as} T_{\infty}}{V_{\infty}} \quad (\text{pascal, Pa}) \quad (\text{B.2})$$

Les grandeurs thermo physiques caractérisant l'air sec, et dont la connaissance est utile pour notre modélisation, sont :

- La masse volumique ρ_{as} en kg.m^{-3}
- La chaleur massique Cp_{as} en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

A l'aide des données bibliographique [66], nous avons établi les relations suivantes :

$$\rho_{as} = 10^{-15}.T^6 - 10^{-12}.T^5 + 4.10^{-10}.T^4 - 8.10^{-8}.T^3 + 0.00001.T^2 - 0.0043.T + 1.2825 \quad (T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad (\text{B.3})$$

$$Cp_{as} = 0.0004.T^2 - 0.0104.T + 1007,2 \quad (T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad 0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C} \quad (\text{B.4})$$

B.1.2. Caractérisation de la vapeur d'eau

Pression de vapeur d'eau et pression de vapeur d'eau saturante

La vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait. Sa pression obéit à l'expression suivante :

$$P_v V_\infty = \frac{m_v}{M_v} RT_\infty \quad \text{avec} \quad M_v = M(H_2O) = 18 \text{ g/mol et } T_\infty \text{ en kelvin} \quad (\text{B.5})$$

$$P_v = 462 \rho_v T_\infty \quad (Pa) \quad \text{et} \quad T_\infty \text{ en Kelvin} \quad (\text{B.6})$$

La quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir est limitée par sa pression de vapeur d'eau. En effet celle-ci ne peut être supérieure à la pression d'équilibre eau/vapeur à la température considérée. Nous avons choisi une expression de la pression de vapeur saturante à partir de données de l'air obtenues par Weast et al. [66].

$$P_{vsat} = e^{(a_1.T^2 + a_2.T + a_3)} \quad (\text{B.7})$$

$$a_1 = -1,92080927475106.10^{-4} \quad a_2 = 0,174589580408824 \quad a_3 = -26,901827411920$$

On retiendra, pour la masse volumique de la vapeur d'eau :

$$\rho_v = \frac{P_v}{462 T_\infty} \quad (kg.m^{-3}) \quad \text{et} \quad T_\infty \text{ en Kelvin} \quad (\text{B.8})$$

$$Cp_v = 1960 \quad (J.kg^{-1}.^\circ\text{C}^{-1}) \quad (\text{B.9})$$

Pour la masse volumique et la chaleur spécifique de l'eau liquide on retiendra [23] :

$$\rho_e = 0,00380.T^2 - 0,0505.T + 1002,6 \quad (kg.m^{-3}) \quad \text{avec} \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad 0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C} \quad (\text{B.10})$$

$$Cp_e = -0,00015.T^3 + 0,039.T^2 - 2,45T + 4218,5 \quad (J.kg^{-1}.^\circ\text{C}^{-1}) \quad (\text{B.11})$$

B.2. Caractérisation de l'air humide

Outre les grandeurs spécifiques associées à l'air humide (humidité absolue w_∞ , humidité relative HR_∞ , température de rosée $T_\infty^{rosée}$) dont les définitions sont rappelées en annexe D, il est nécessaire d'explicitier les relations utilisées pour les données thermophysiques du mélange air sec-vapeur d'eau. Certaines d'entre elles sont déduites des lois physiques caractérisant les mélanges; d'autres sont obtenues en corrélant les valeurs données dans la littérature en fonction de la température.

- Pression totale

L'air environnant est à la pression atmosphérique $P=1,013$ bars. Chaque constituant de l'air contribue pour sa part à cette pression. Il existe, en effet une loi d'additivité (loi de Dalton) sur les pressions dites partielles de chaque constituant occupant le même volume, soit :

$$P_\infty = P_{atm} = P_{as} + P_v \quad (\text{B.12})$$

- Masse volumique

La masse volumique de l'air humide pourrait se déduire des équations () puisque

$$\rho_\infty = \rho_{as} + \rho_v \quad (\text{B.13})$$

En remplaçant ρ_{as} et ρ_v par leur définition, il vient

$$\rho_\infty = \rho_{as} + \rho_v = \frac{P_{as}}{287T_\infty} + \frac{P_v}{462T_\infty} \quad (\text{B.14})$$

$$\rho_\infty = \rho_{as} + \rho_v = \frac{P_\infty}{287T_\infty} + 1,32 \cdot 10^{-3} \frac{P_v}{T_\infty} \quad (\text{B.15})$$

En remplaçant P_∞ par sa valeur, on constate que, pour des températures comprises entre 0 et 100 °C, le second terme de l'équation est négligeable. Par conséquent, on utilisera pour l'expression de la masse volumique de l'air humide :

$$\rho_\infty = \frac{353}{T_\infty + 273} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)} \quad (\text{B.16})$$

- Chaleur massique C_{p_∞}

La chaleur massique se déduit de la loi de mélange. Elle peut être exprimée par kilo d'air sec ou par kilo d'air humide. Dans les relations proposées, $C_{p_{as}}$ et C_{p_v} peuvent être remplacés par leurs expressions respectives :

$$C_{p_\infty}^* = C_{p_{as}} + w_\infty C_{p_v} / \text{kg d'air sec} \quad (\text{B.17})$$

$$C_{p_\infty} = \frac{C_{p_{as}} + w C_{p_v}}{1 + w} / \text{kg d'air humide} \quad (\text{B.18})$$

- Conductivité thermique λ_∞

Son évolution en fonction de la température est établie à partir de données bibliographiques [23]:

$$\lambda_\infty = 6,5 \cdot 10^{-5} T + 0,0238 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (\text{B.19})$$

- Viscosité dynamique μ_∞

$$\mu_\infty = 10^{-5} (0,0047 T + 1,705) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (\text{B.20})$$

La définition de la viscosité cinématique de l'air humide « ν » est donnée par

$$\nu = \frac{\mu_\infty}{\rho_\infty} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (\text{B.21})$$

et la diffusivité thermique « a » par :

$$a = \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} \right) \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (\text{B.22})$$

C. CINETIQUES DE SECHAGE

C.1. Introduction

De nombreuses études ont été publiées concernant le dispositif expérimental utilisé afin de suivre l'évolution et la cinétique de séchage et plusieurs travaux portent sur la présentation des résultats expérimentaux de divers produits agroalimentaires. Cependant, les données obtenues à partir des expériences de cinétique de séchage sont affectées d'erreurs de mesure, etc. Il est important de réduire ces erreurs afin d'obtenir une courbe lissée qui peut être utilisée pour la conception ou/et la modélisation du processus de séchage. Cependant, il est important de tenir compte de quelques informations importantes déduites de l'analyse de certains points expérimentaux. En effet, le meilleur ajustement possible sur ces données expérimentales permet une caractérisation précise de la cinétique de séchage.

C.2. Etablissement des courbes de séchage

Afin de suivre l'évolution de la cinétique de séchage, les courbes de séchage sont généralement décrites par :

- la masse du produit $m(t)$ en fonction du temps (t) (figure C.1) ;
- la teneur en eau du produit X (kg d'eau/kg MS) ($X = \frac{m(t) - m_s}{m_s}$) en fonction du temps (t) (figure C.2 a)
- la vitesse de séchage du produit ($-\frac{dX}{dt}$) en fonction du X (figure C.2 b) (courbe de Krisher [67]) .
- la teneur en eau réduite $X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$ en fonction de temps t , et $X_{cri} \cong X_0$ pour les produits agroalimentaires.
- le rapport de la vitesse de séchage à un instant t , $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ à la vitesse de première phase, $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_i \cong \left(-\frac{dX}{dt}\right)_0$ en fonction de la teneur en eau réduite X^* ,

$$f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0} = F(X^*) \text{ (Van Meel [68])} \quad (\text{C.1})$$

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (\text{C.2})$$

$$\text{Ordonnée : } f = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0} = \frac{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t}{\left(-\frac{dX}{dt}\right)_t} \quad (\text{C.3})$$

Cette courbe caractéristique de séchage (figure C.3) vise à donner une courbe unique (CCS) des points caractéristiques en fonction de plusieurs conditions de séchage, vitesse V , humidité relative HR et température T de l'air asséchant.

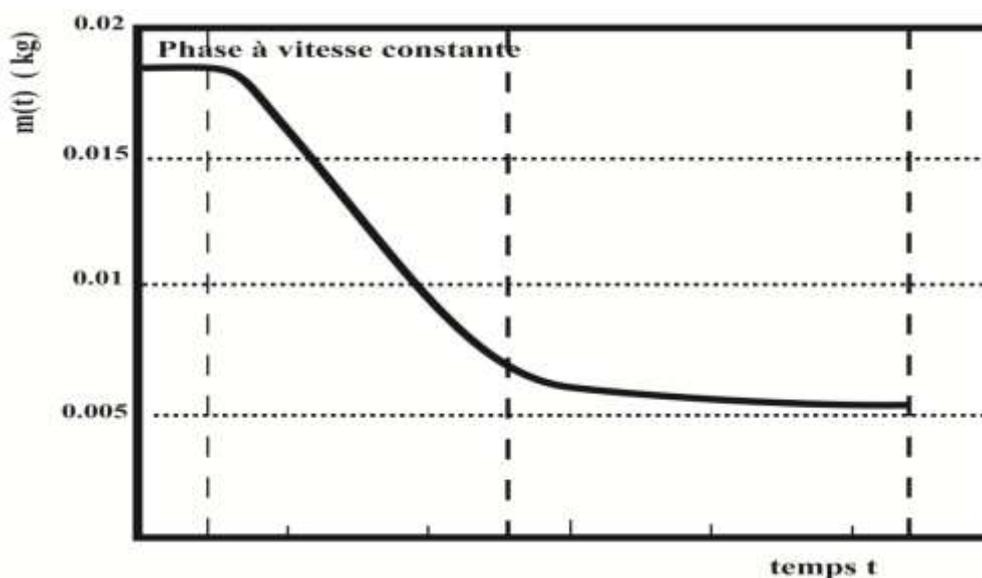


Figure C.1 : Courbe de séchage : $m(t)$

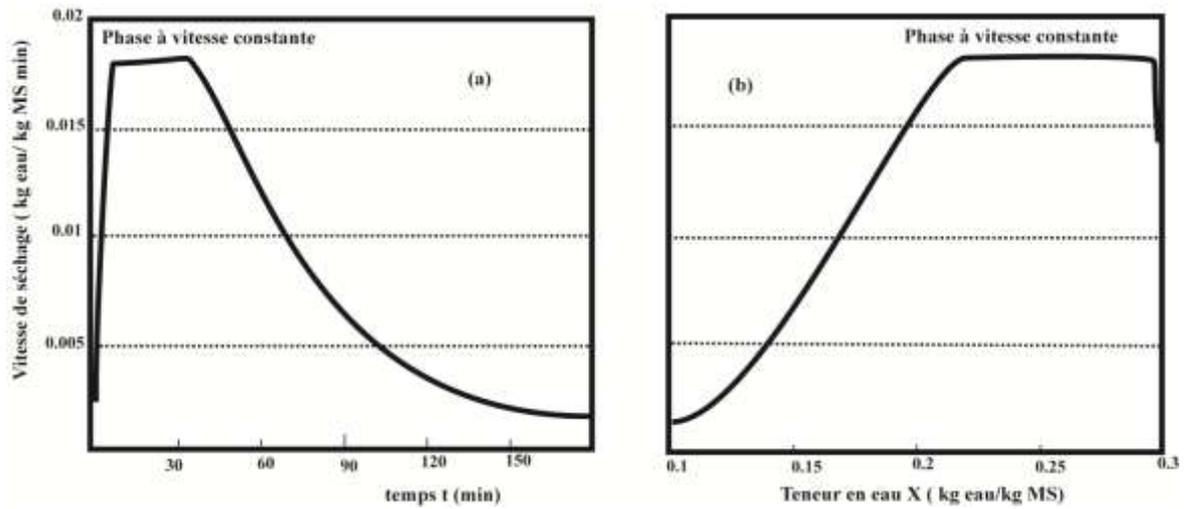


Figure C.2 : Courbes de séchage. (a) vitesse de séchage en fonction de time, (b) vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau X (Courbe de Krischer).

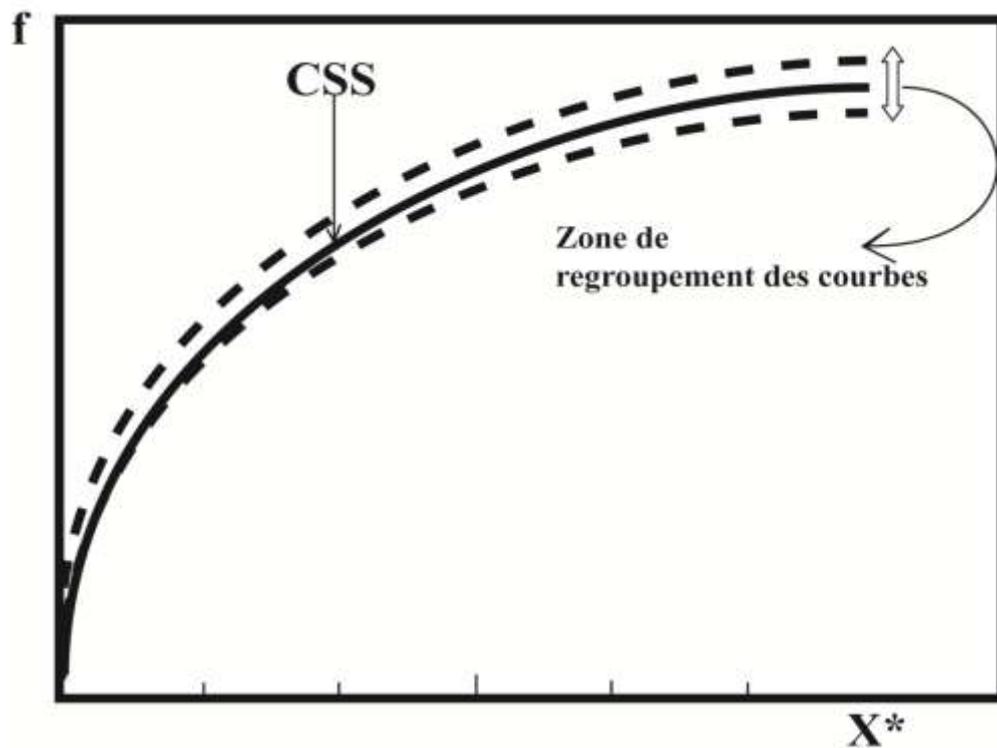


Figure C.3 : Courbe caractéristique de séchage (CCS)

C.3. Modèles semi théoriques de séchage en couche mince

L'exploitation des résultats expérimentaux conduit à la recherche du modèle régression qui décrit au mieux la cinétique de séchage du produit ; c'est-à-dire l'évolution de la teneur en eau réduite X^* (% MS) en fonction du temps de séchage (t). Nous présentons dans le tableau (C.1) qui suit quelques modèles de régression afin de décrire la variation de la teneur en eau réduite

Modèle	Expression du modèle	Référence
Lewis	$X^* = \exp(-kt)$	Lewis, 1921 [69]
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	Page, 1949 [70]
Page modifié I	$X^* = \exp(-(kt)^n)$	Overhults et al., 1973 [71]
Page modifié II	$X^* = \exp((-kt)^n)$	White et al., 1981 [72]
Henderson et Pabis	$X^* = a \exp(-kt)$	Chinnan, 1984 [73]
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al., 1999 [74]
Two-term	$X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Henderson, 1974 [91]
Two-term exponentiel	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden et al., 1980 [91]
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	Wang et Singh, 1978 [92]
Approximation de la diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Kassem, 1998 [77]
Henderson et Pabis modifié	$X^* = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	Karathanos, 1999 [78]
Verma <i>et al.</i>	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_0t)$	Verma et al., 1985 [79]
Midilli-Kucuk	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., 2002 [75][76]

Tableau C.1: Modèles semi théoriques de séchage en couche mince décrivant le comportement des cinétiques de séchage

Où a, b, c, k, k_0, k_1, n désignent les coefficients des modèles.

C.4. Critères statistiques

Nous définissons les paramètres statistiques suivants [48] :

- R^2 coefficient de corrélation

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X^*_{i,pre} - \bar{X}^*_{i,exe})}{\sum_{i=1}^n (X^*_{i,exe} - \bar{X}^*_{i,exe})} \quad (C.4)$$

- EST erreur systématique moyenne

$$EST = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X^*_{pre,i} - X^*_{exp,i}) \quad (C.5)$$

- χ^2 khi carré

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2}{N - n} \quad (C.6)$$

Avec :

- $X^*_{i,exp}$: ième teneur en eau réduite expérimentale,
- $X^*_{i,pre}$: ième teneur en eau réduite prédite par le modèle,
- N : nombre de points expérimentaux,
- n : nombre de variables de chaque modèle.

C.5. Calcul du coefficient effectif de diffusion

Pour notre calcul, nous faisons les hypothèses suivantes :

- le produit conserve sa forme initiale,
- le transfert de matière est unidirectionnel,
- la teneur en eau initiale est homogène dans le produit,
- la résistance au transfert de matière externe est négligeable.

La teneur en eau réduite, mesurée dans une expérience de séchage, est donnée par la relation suivante :

$$X^* \cong \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (C.7)$$

Où L est la demi-épaisseur de produit (m)

L'équation (C.7) peut s'écrire :

$$\ln(X^*) \cong \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (C.8)$$

La diffusivité effective D_{eff} est typiquement calculée par la méthode graphique en représentant les données expérimentales de séchage en terme du logarithme népérien de la teneur en eau réduite X^* en fonction du temps de séchage. Le résultat est une droite de pente $\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)$, ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif pour différentes conditions de séchage.

C.6. Détermination de l'énergie d'activation

La diffusion est donc thermiquement activée, et le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (C.9)$$

Où D_0 est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius ($m^2.s^{-1}$), E_a est l'énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$), R est la constante des gaz parfaits ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$) et T est la température de l'air asséchant en K.

L'équation 6 peut être réarrangée sous la forme :

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (C.10)$$

L'énergie d'activation est calculée en représentant le logarithme népérien des valeurs expérimentales de la diffusivité effective D_{eff} en fonction de l'inverse de la température. C'est une droite qui indique la dépendance d'Arrhenius dans la gamme de températures étudiées.

D. GRANDEURS HYGROMETRIQUES

D.1. Introduction

Les caractéristiques liées à l'eau dans le produit sont sa teneur en eau l'activité de l'eau dans le produit.

D.2. Teneur en eau

Tout produit agroalimentaire contient de l'eau. Tout produit de masse totale $m(t)$ de :

- Une masse m_e d'eau,
- Une masse anhydre ou masse sèche $m_s = m(t) - m_e$.

- La teneur en eau du produit (en base sèche) :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (D.1)$$

- La teneur en eau en base humide :

$$X_h(t) = \frac{m(t) - m_s}{m(t)} \quad (D.2)$$

- Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X(t) = \frac{X_h(t)}{1 - X_h(t)} \quad (D.3)$$

$$X_h(t) = \frac{X(t)}{1 + X(t)} \quad (D.4)$$

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche, lorsque l'on parlera de teneur en eau sans autre précision.

D.3. Activité de l'eau dans un produit

L'eau contenue dans un produit est plus ou moins disponible. Cette disponibilité est quantifiée par l'activité de l'eau du produit, définie pour une température donnée comme étant le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau à la surface de produit et la pression de l'air saturé :

$$a_w = \frac{HR(\%)}{100} = \left(\frac{P_v}{P_{vsat}} \right)_T = \left(\frac{P_{vp}}{P_{vsat}} \right)_T \quad (D.5)$$

Où :

a_w : Activité de l'eau (-)

HR : Humidité relative de l'air (%)

P_{vsat} : Pression partielle de vapeur d'eau saturante à la température de l'équilibre (Pa)

P_{vp} : Pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa)

P_v : Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air asséchant (Pa)

R : Constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$)

T : Température (K)

- Humidité relative : L'humidité relative (HR) varie entre 0 % et 100 % et l'activité de l'eau (a_w) entre 0 et 1.

Lorsque l'équilibre hygroscopique est atteint, on a :

$$a_w = \frac{HRE(\%)}{100} \quad (\text{D.6})$$

HRE : humidité relative de l'air en équilibre avec le produit (%)

Lorsque l'on souhaite conserver un produit séché, il est nécessaire de connaître la teneur en eau du produit liée à sa stabilité. Dans le domaine hygroscopique, il existe une relation macroscopique entre la teneur en eau d'équilibre du produit et l'humidité relative de l'environnement. Ainsi, la connaissance de la teneur en eau d'équilibre adéquate du produit, conduit à la valeur de l'humidité relative de l'air ambiant à respecter pour sa bonne conservation. La relation qui lie la teneur en eau à l'humidité relative du milieu à une température donnée est appelée isotherme de sorption.

E.ISOTHERMES DE SORPTION

E.1. Introduction

Les isothermes de sorption (adsorption et désorption) sont des courbes d'équilibre qui lient, à une température constante, les teneurs en eau du produit et leurs activités de l'eau (qui sont égales à l'humidité relative de l'environnement HR à l'équilibre hygroscopique).

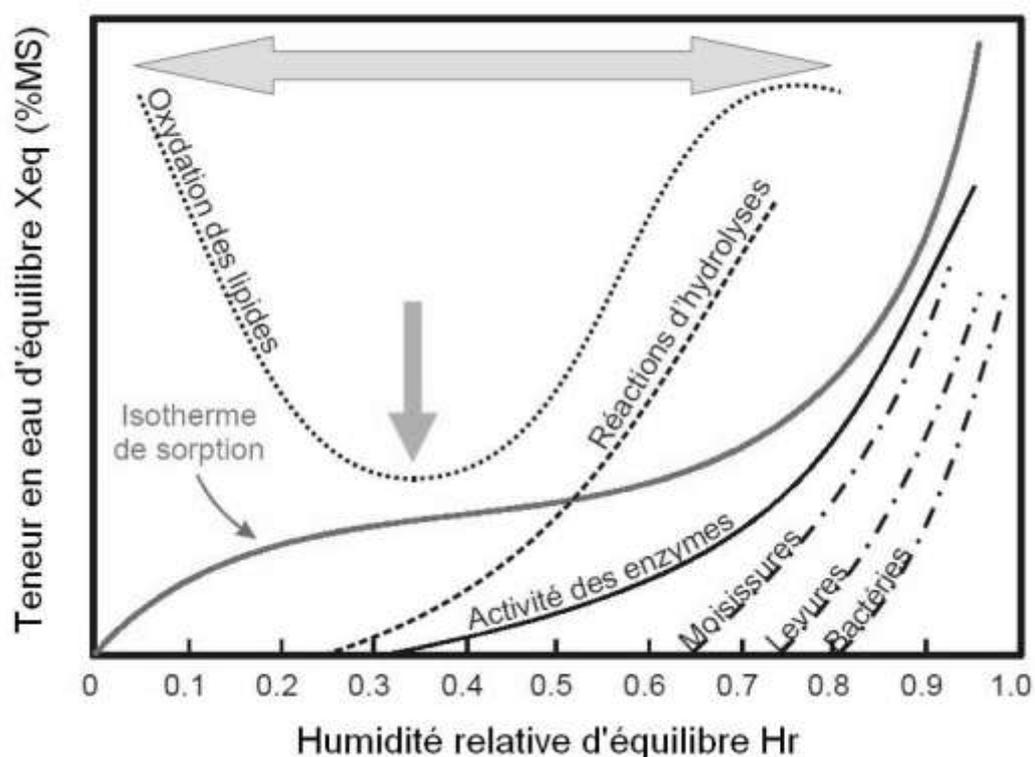


Figure E.1 : Influence de l'activité de l'eau sur la conservation des qualités des produits.

Les phénomènes de désorption et d'adsorption font appel à un certain nombre de phénomènes physiques : nature et état hygroscopique du produit, nature des liaisons des molécules d'eau et de la matrice solide du produit.

E.2. Modélisation semi-empirique des isothermes de sorption

De nombreuses expressions, ont été proposées pour la modélisation des isothermes de sorption. Certaines, se basent sur un modèle théorique d'adsorption (modèle de GAB), et d'autres sont de nature empirique. Un

inconvenient de toutes ces expressions, est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Nous allons présenter dans le (E.1), les modèles les plus couramment utilisés.

Auteurs	Equation du modèle	Références
Henderson modifié	$1 - a_w = \exp \left[-A(\theta + B) X_{eq}^C \right]$	[80][81]
Chung-Pfost modifié	$a_w = \exp \left[\frac{-A}{\theta + B} \exp(-CX_{eq}) \right]$	[82]
Oswin modifié	$X_{eq} = (A + B\theta) \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^C$	[83]
Halsey modifié	$a_w = \exp \left[\frac{-\exp(A + B\theta)}{X_{eq}^C} \right]$	[84]
GAB	$X_{eq} = \frac{ABCa_w}{[1 - Ba_w][1 - Ba_w + BCa_w]}$ $B = B_0 \exp\left(\frac{h_1}{R\theta}\right), C = C_0 \exp\left(\frac{h_2}{R\theta}\right)$	[85]

Tableau E.1: Modèles de lissage mathématiques utilisés pour prédire les isothermes de sorption des feuilles de Menthe

Avec :

h_1 : Chaleur de condensation de la vapeur d'eau pure (kJ/mol)

h_2 : Chaleur intégrale de sorption des couches d'eau supplémentaire (kJ/mol)

C_0 et B_0 : constantes

Les modèles de régressions sont comparés en se basant sur leurs coefficients de corrélation (R^2), l'erreur moyenne relative (EMR) et l'erreur systématique moyenne du produit (ESM) La plus grande valeur de R^2 , les plus petites valeurs de (EMR) et de (ESM) sont les critères qui justifient le choix du modèle le plus adéquat pour la description des isothermes de sorption.

Ces paramètres statistiques sont calculés comme suit :

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eq,i,exp} - X_{eq,i,pre}}{X_{eq,i,exp}} \right| \quad (E.1)$$

$$ESM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq,i,exp} - X_{eq,i,pre})^2}{N - n}} \quad (E.2)$$

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

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

N : nombre de points expérimentaux

d_f : degré de liberté de la régression du modèle.

E.3. Phénomène d'Hystérésis

Lorsque l'on superpose les isothermes de désorption et d'adsorption pour une même température sur le même graphique, nous pouvons observer que le phénomène désorption-adsorption n'est pas réversible. En effet, il existe un phénomène d'hystérésis

E.4. Conditions optimales de stockage

L'étude des isothermes de sorption permet de connaître l'humidité relative optimale d'équilibre pour la conservation d'un produit. L'ensemble des points expérimentaux sont rassemblés sur un graphique. On peut alors modéliser l'isotherme de sorption par une fonction du 3^{ème} degré. Une partie proche de l'horizontalité correspond à la zone de meilleure stabilité du produit.

E.5. Chaleur isostérique

C'est la quantité d'énergie nécessaire pour libérer les molécules d'eau liées au produit. Elle est également appelée enthalpie différentielle de sorption. La chaleur isostérique nette de l'adsorption, (q_{st}), est définie par l'équation suivante :

$$q_{st} = Q_{st} - L_v \quad (E.3)$$

L'entropie différentielle peut être calculée à partir de l'équation de Gibbs-Helmholtz (Equation E.4) où l'énergie libre de Gibbs est calculée par l'équation (E.5).

$$\Delta S = \frac{q_{st} - \Delta G}{T} \quad (E.4)$$

$$\Delta G = RT \ln(a_w) \quad (E.5)$$

En substituant l'équation (E.5) dans l'équation (E.4) et en arrangeant le résultat, nous obtenons l'équation (E.6):

$$\ln(a_w) = \frac{-q_{st}}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (E.6)$$

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{-q_{st}}{R} \quad (E.7)$$

La chaleur isostérique nette de sorption n'est autre que le coefficient directeur de la courbe représentant $\ln(a_w)$ en fonction de $\left(\frac{1}{T}\right)$ pour une teneur en constante du produit. L'entropie différentielle, quant à elle, représente l'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées à R près.

E.6. Entropie différentielle de sorption

Cette grandeur mesure le degré de désordre du produit au niveau microscopique. En effet, plus l'entropie est élevée, plus les éléments sont désordonnés. Cette valeur est calculée en intégrant la relation de Clausius-Clapeyron :

$$\ln(a_w) = \frac{-q_{st}}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (E.8)$$

Il est à noter que les variations de l'entropie de sorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre sont similaires à celles de la chaleur isostérique de sorption. Cette propriété donne lieu à la théorie de compensation.

E.7. Théorie de compensation

Il existe une relation qui lie la chaleur isostérique à l'entropie différentielle de sorption, celle-ci est appelée théorie de compensation enthalpie-entropie. Elle permet de mieux comprendre la structure de l'eau dans le produit étudié :

$$q_{st} = T_{\beta} \Delta S + \Delta G_{\beta} \quad (\text{E.9})$$

E.8. Typologie des courbes de sorption

Les isothermes de sorption peuvent être classées selon différents types comme le montre le schéma ci-dessous. Cette classification est habituellement utilisée pour caractériser les isothermes d'adsorption, de désorption d'azote mais a été naturellement étendue aux isothermes de vapeur d'eau, considérant que la vapeur d'eau est un gaz particulier. Elles sont caractéristiques des nombreuses interactions qui ont lieu à l'échelle microscopique entre le squelette solide et les molécules d'eau :

- Isotherme type I : Elle est observée lorsque le solide absorbe une seule couche d'adsorbat.
- Isotherme type II : Elle est appelée sigmoïde. Elle correspond à l'adsorption multicouche. C'est le cas le plus fréquent.
- Isotherme type III : Elle reflète un manque d'affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant et des interactions adsorbat-adsorbant relativement fortes. C'est le cas de l'adsorption de l'eau sur des surfaces hydrophobes.
- Isotherme type IV : Elle peut résulter de la combinaison d'une isotherme de type I (adsorption forte mais limitée) et de type V.
- Isotherme type V : Elle reflète une forte interaction entre les adsorbats.
- Isotherme type VI : Elle présente des marches caractéristiques d'une adsorption multicouche sur une surface non poreuse très homogène.

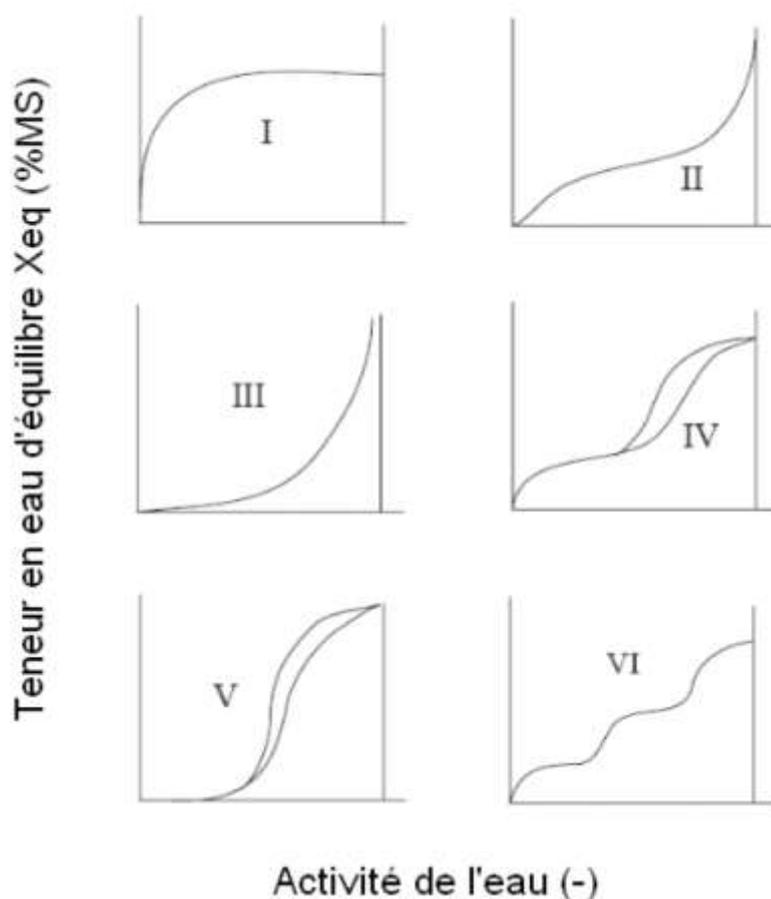


Figure E.2 : Typologie des courbes de sorption

L'allure générale des isothermes de sorption de l'eau dans les produits agroalimentaires et les plantes médicinales est de forme sigmoïdale (type II). C'est également le cas pour les feuilles de menthe (*Mentha spicata*) :

Les isothermes de sorption des feuilles de menthe et des plantes aromatiques et médicinales sont, en général, composées de 3 zones.

Zone A : faible pression partielle de vapeur d'eau, fixation d'une première couche de molécules d'eau sur le squelette solide du produit. L'énergie de liaison est très forte.

Zone B : pression partielle de vapeur d'eau élevée, la pente de la courbe de sorption augmente, différentes couches se forment (l'adsorption est multicouche). L'énergie de liaison est plus faible.

Zone C : pression de vapeur d'eau proche de la pression de vapeur d'eau saturante, la pente augmente fortement. Les dernières molécules d'eau se fixent sur les irrégularités de la surface du produit.

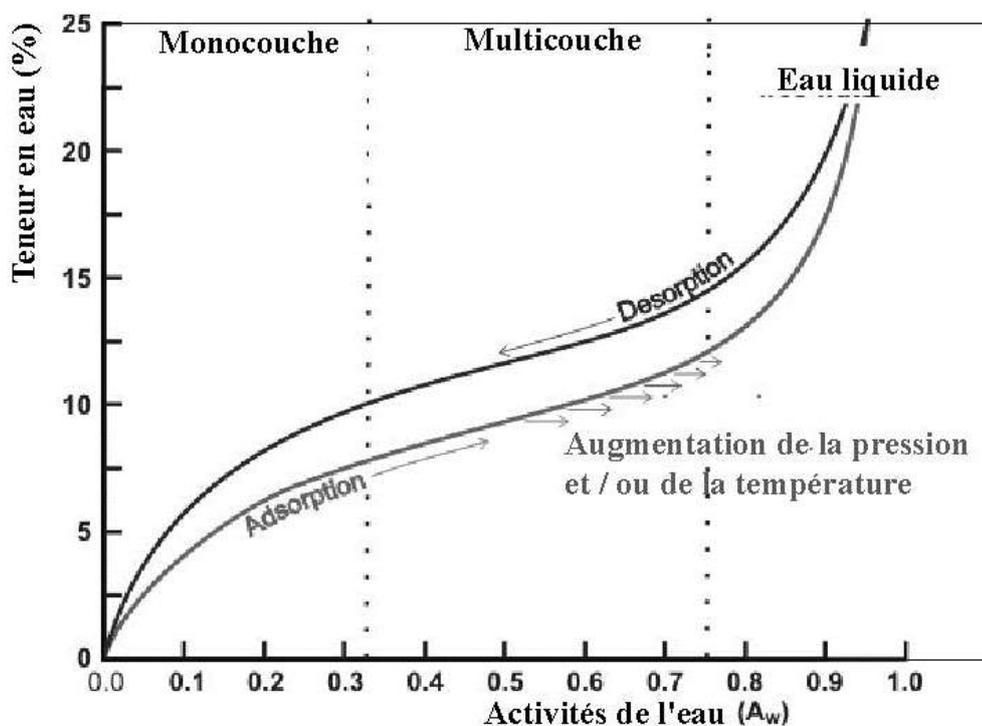


Figure E.3 : Isothermes d'absorption et désorption

C'est la condensation capillaire et l'énergie de liaison est très faible. Le phénomène d'hystérésis est plus ou moins prononcé pour chaque produit.

Différentes théories ont été énoncées pour expliquer ce phénomène. La plus facile à comprendre et à mettre en application dans la vie courante est la comparaison avec une éponge. Lorsque l'on cherche à mouiller en totalité une éponge, il nous faut écraser cette dernière pour libérer l'air coincé dans ses pores. Si nous n'évacuons pas cet air, l'eau ne pourra remplir la totalité des pores. Il en est de même pour les plantes et les produits agroalimentaires. En effet, après adsorption, il restera toujours une certaine quantité d'air dans les pores. La teneur en eau sera donc plus faible que lors de la désorption.

L'IUPAC (1984) a classé les différentes boucles d'hystérésis en 4 types [86] (figure E.4).

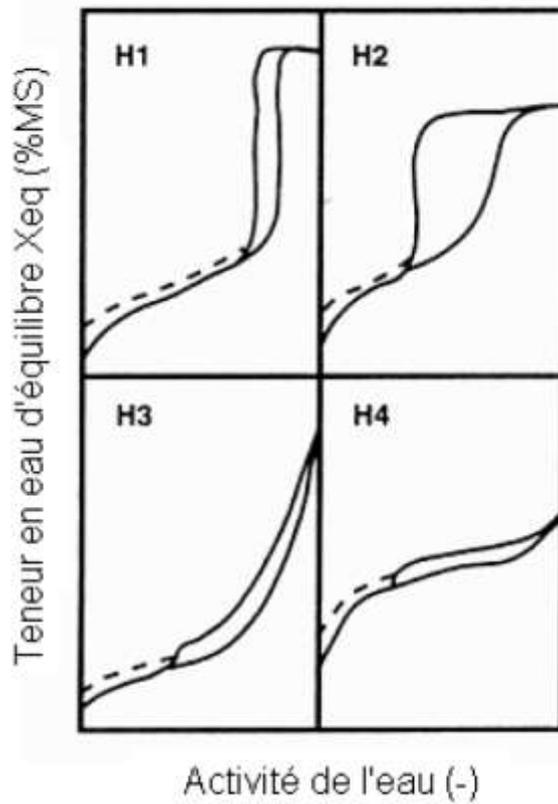


Figure E.4 : type d'hystérésis

F. MODELISATION DU COMPORTEMENT ENERGETIQUE D'UN SYSTEME DE SECHAGE

F.1. Introduction

Il existe diverses méthodes pour la modélisation d'un système de séchage :

- La méthode de Hottel, Whillier et Bliss [23]. Elle suppose que le régime est permanent et que les différents éléments de l'insolateur se trouvent à une température moyenne constante. Par ailleurs, Liu et Jordan (1963), Whillier et Saluja (1965) et Gupta et Garge (1968) ont proposé une procédure simple pour prédire les performances à long terme d'un insolateur en ne prenant en compte qu'une seule journée type soumise au flux solaire moyen du mois et basée sur les coefficients F' et U_L déterminés par Hottel, Whillier et Bliss [23]
- La méthode dynamique dite nodale [23]. Elle consiste à découper l'insolateur/ enceinte de séchage en tranches et à établir les bilans thermiques dans chacun des composants de ces tranches considérées séparément les unes des autres. La résolution, par une méthode appropriée des équations ainsi établies, permet de déterminer l'évolution au cours du temps des températures des composants de l'insolateur/chambre de séchage.

F.2. Etablissement de la modélisation dynamique

La méthode dite nodale basée sur les analogies entre les transferts de chaleur et les transferts électriques repose sur un découpage fictif de l'insolateur et de l'enceinte de séchage en un certain nombre de tranches perpendiculaires à la direction de l'écoulement de l'air. Pour chaque nœud d'un composant d'une tranche considérée comme une entité indépendante des autres tranches, l'écriture des bilans thermique en ce nœud conduit à une équation qui peut être écrite sous la forme générale suivante:

$$\frac{m_j C_{pj}}{S} \frac{dT_j}{dt} = \sigma_{sj} + \sum_{k=1}^n \left(h_{r,j-k} + h_{c,j-k} + h_{d,j-k} \right) (T_k - T_j) \quad (F.1)$$

Avec :

m_j : masse de l'élément considéré (kg)

Cp_j : capacité calorifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

T_j : température du nœud j (K)

σ_j : densité de flux de chaleur au niveau du nœud j (W)

$h_{r,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les nœuds j et k ($W\ K^{-1}$)

$h_{c,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre les nœuds j et k ($W\ K^{-1}$)

$h_{d,j-k}$: Coefficient de transfert de chaleur par conduction entre les nœuds j et k ($W\ K^{-1}$)

S : aire de la section de l'isolateur (m^2)

L'analogie entre les transferts thermiques et le transfert de chaleur a conduit à exprimer le flux de chaleur échangé entre deux nœuds par la relation :

$$\Phi = \frac{T_k - T_j}{R_{k-j}} \quad (F.2)$$

R_{k-j} : résistance thermique existante ; elle est fonction du type de transfert mis en cause, des matériaux, etc.

Le Tableau (F.1) illustre les différentes équivalences entre les paramètres thermique et électriques.

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Conductivité thermique λ ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	Conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)
Différence de température (K)	Différence de potentiel (V)
Densité de flux de chaleur ($W\ m^{-2}$)	Densité de courant ($A.m^{-2}$)
Conductance thermique G_{th} ($W\ K^{-1}$)	Résistance électrique G (Ω^{-1})
Flux de chaleur Φ (w)	Générateur de courant I (A)
Capacité thermique $C_{th}=m\ Cp$ ($J\ K^{-1}$)	Capacité électrique C(F)

Tableau F.1 : équivalences

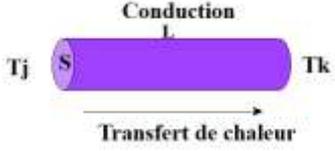
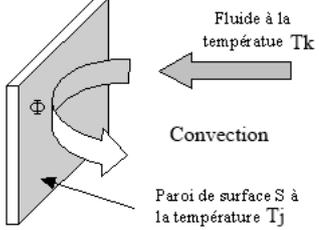
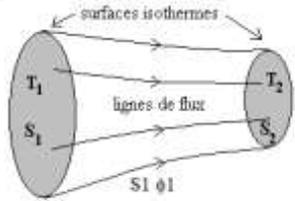
Mode de transfert			
Conduction	$\phi_{k-j} = \frac{T_k - T_j}{R_t}$	$R_t = \frac{1}{h_{cond}}$ $h_d = \frac{L}{\lambda S}$	
Convection	$\phi_{k-j} = \frac{T_k - T_j}{R_t}$	$R_t = \frac{1}{S h_{conv}}$	
Rayonnement	$\phi_{k-j} = \frac{T_k - T_j}{R_t}$	$R_t = \frac{1}{h_r}$ $h_r = \frac{1}{S_1 F_{12}} = \frac{1}{S_2 F_{21}}$	

Tableau F.2 : différents modes de transferts [23]

Conduction - Convection	Séries	$R_t = R_d + R_c$
Conduction - Rayonnement	Parallèle	$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_r}$
Convection - Rayonnement	Parallèle	$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r}$

Tableau F.3 : Combinaison des modes de transfert de chaleurs [23]

Les termes en

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}$$
(F.3)

Avec \vec{V} vecteur vitesse de la particule

Pour la couverture, l'isolant et l'absorbeur, la dérivée totale de la température se réduit à la dérivée partielle par rapport au temps :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t}$$
(F.4)

Pour le fluide :

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + V_f \frac{\partial T_f}{\partial x}$$
(F.5)

La discrétisation par une méthode implicite aux différences finies de l'équation (F.1), compte tenu de (F.4) et (F.5) conduit à un système d'équations algébriques qui peut être présenté sous une forme matricielle :

$$[B][X] = [C]$$
(F.6)

G. REALISATION ET ETUDE EXPERIMENTALE

G.1. Séchoir solaire modulaire

Cette annexe est consacrée à la description du protocole expérimental ainsi que des instruments de mesures utilisés pour analyser la cinétique de séchage de la menthe (*MENTHA SPICATA*). L'évolution au cours du temps de la masse du produit est obtenue par un système conçu à l'EPST/CDER (claire suspendue à une balance par un fil métallique). Le relevé des grandeurs mesurées se fait avec une acquisition de données portative de série d'hydre reliée à un ordinateur.



Figure G.1 : Photo du séchoir solaire réalisé au CDER (Benaouda et al.)

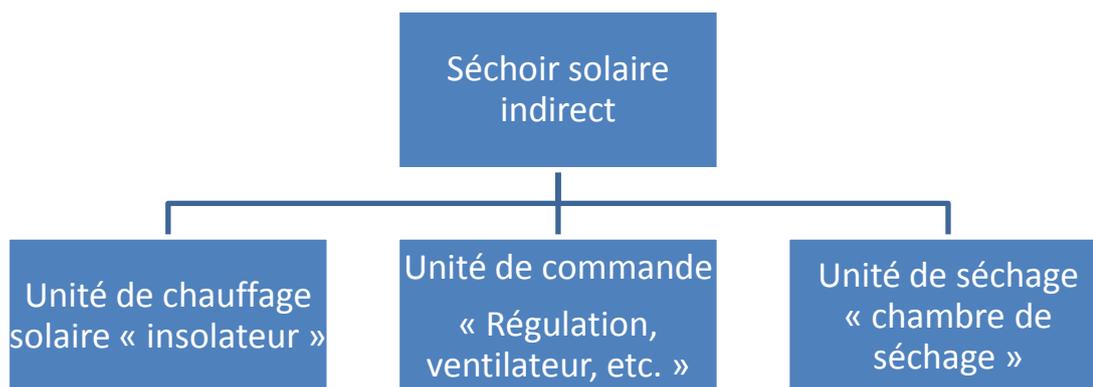


Figure G.2 : Organigramme du séchoir solaire

G.2. Séchoir solaire amélioré

Le séchoir est muni d'un dispositif de recyclage de l'air asséchant réglable, d'un système de régulation (débit et température) et d'un chauffage d'air auxiliaire.



Figure G.3 : insolateur

L'unité de chauffage solaire est composée d'un insolateur à simple circulation et à simple vitrage, de surface 2 m^2 ($2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), incliné de 40° par rapport à l'horizontal et orienté plein sud.



Figure G.4 : Armoire de séchage des Plantes aromatique et médicinales.

<u>Insolateur</u> <u>Caisson</u> Surface = 2 m ² Matériel: fer galvanisé Épaisseur: 0,5 mm <u>Vitrage</u> Épaisseur = 4 mm Indice de réfraction = 1,5 <u>Absorbeur</u> Matériel: fer galvanisé peint en noir Conductivité thermique = 54 W/m ² K Surface = 2 m ²	<u>Isolation</u> Matériau: Mousse de polyuréthane Conductivité thermique = 330,10 ⁻⁴ W / m K Épaisseur = 40 mm <u>Tuyères</u> Nombre = 02 Lieu: entrée et sortie de l'insolateur à air <u>Ventilateur</u> Nombre = 01 <u>Localisation</u> : sortie
Armoire de séchage Dimensions 0.80m x 0.60m x 1.20 m <u>Claies</u> : Structure en bois grillagée Nombre : 05 <u>Chauffage d'appoint</u> Type : électrique Puissance : 4Kw	<u>Isolation</u> Matériau: Mousse de polyuréthane Conductivité thermique = 330,10 ⁻⁴ W / m K Épaisseur = 40 mm

Tableau G.1: Données du séchoir utilisé dans la simulation

G.3. Matériels du séchoir

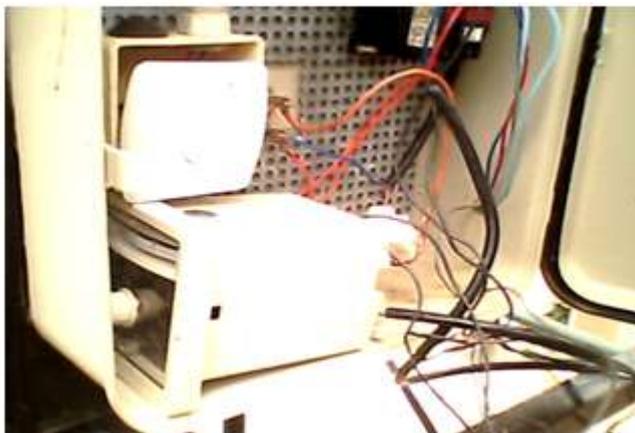


Figure G.5 : Unité de commande, qui permet de piloter le ventilateur et l'appoint électrique (résistance de chauffage électrique).



Figure G.6 : Ventilateur placé en amont de l'appoint de chauffage dans l'armoire de séchage



Figure G.7 : Résistance chauffante à ailettes (2Kw)

La résistance chauffante à ailettes est particulièrement adaptée au chauffage d'air en convection naturelle ou forcée. La température admissible maximale est égale à 100°C.



Figure G.8 : Sonde de régulation de la température de l'air asséchant placée à l'intérieur de l'armoire.



Figure G.9 : Claie de séchage

G.4. Instruments de mesure



Figure G.10 : Thermo-hygromètre

- Le thermo-hygromètre permet la mesure simultanée de la température (généralement en °C) et de l'humidité relative (en % du seuil de saturation). La mesure se fait au moyen de sondes adaptées, éventuellement à distance. (Température de 0°C à 100°C, Erreur : 0.01°C, précision : $\pm 1^\circ\text{C}$, Relative humidité de 10% à 95 % RH, Erreur : 0.01%, précision : $\pm 3\%$)



Figure G.11 : Anémomètre METEO DIGIT III (Mesure de la vitesse d'air, Intervalle: 0,7 m/s à 40 m/s, précision ± 0.2 m/s)



Figure G.12 : Acquisition Fluke 2620A Hydra Data Acquisition Logger + Input Module



Figure G.13 : Pointeur électrique type SONEGAZ pour mesurer la consommation énergétique de la source auxiliaire



Figure G.14 : Balance de précision haute résolution avec afficheur amovible pour une flexibilité maximale (PCD 3000, Portée max 3500 g, lecture 0.01g, linéarité ± 0.05)

Le dispositif expérimental est placé sur la plate-forme expérimentale de la division solaire thermique et géothermie, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER BP. 62 Route de l'Observatoire Bouzaréah, 16340, Alger, Algérie

- Détermination de la masse de matière sèche

La détermination de la matière sèche d'un produit consiste en principe à éliminer la totalité de l'eau sans entraîner les substances volatiles initialement présentes ou formées au cours du séchage par la dégradation de composés labiles. Pour déterminer la masse de matière sèche contenue dans un échantillon de produit frais de masse initial connue, il est placé pendant 24 h celui-ci dans une étuve de séchage à contrôle thermostatique (Mettler UFE 400), équipée d'un système de ventilation et permettant le maintien d'une température à 105°C. Nous avons déterminé la masse de produit sec qui correspond à celle de l'échantillon par utilisation d'une balance de précision.

- Mesures effectuées

L'acquisition des mesures de température et d'humidité relative a été réalisée à l'aide d'une centrale de mesure Fluke (2620A) couplée à un ordinateur portable Acer Aspire 5315 pour un transfert des données en temps réel. L'ensemble permet la sauvegarde de 12 canaux de mesure de manière quasi illimitée dans le temps avec une période d'acquisition que nous avons fixé à 15 minutes. La centrale permet l'utilisation de thermocouples de type K et d'hygromètre pour la mesure de l'humidité relative. Le débit d'air asséchant est réglé par un variateur de vitesse, la température de l'air asséchant est ajustée par un appoint en énergie électrique afin d'assurer une température de consigne constante. A la sortie du séchoir, l'air est soit évacué vers l'extérieur, soit recyclé à travers le conduit d'aspiration (figure G.15).

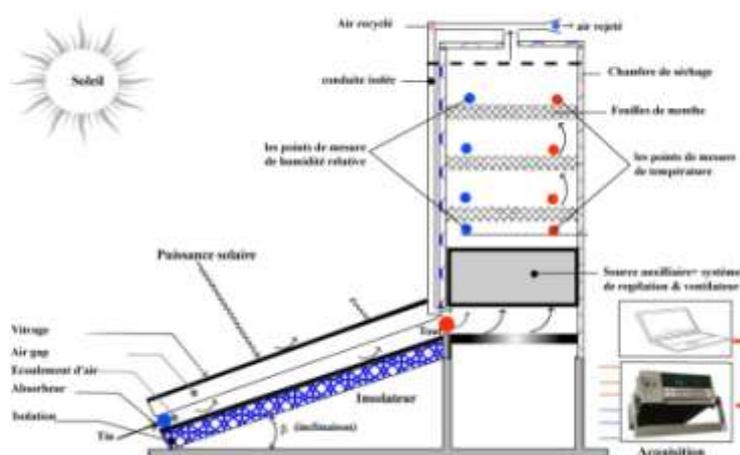


Figure G.15 : les différents points de mesures

- Détermination de la vitesse de séchage

Après avoir tracé le profil de la teneur en eau du produit X, en fonction de temps, nous avons procédé au découpage de l'échelle du temps en certain nombre d'intervalles correspondant à un quart-heures en début de séchage jusqu'à une heure en fin de séchage (figure G.16).

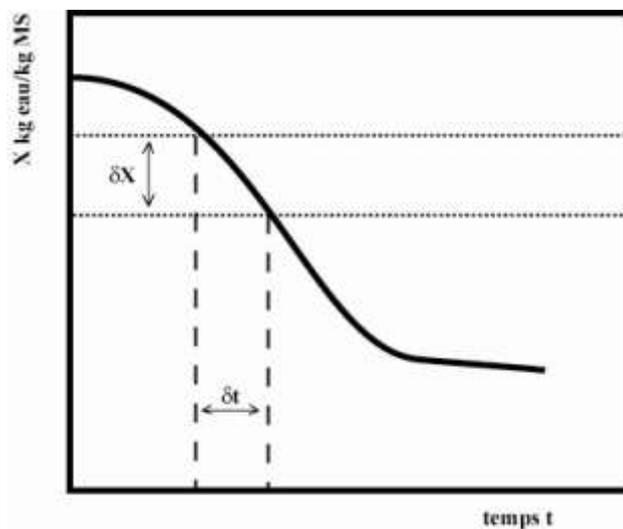


Figure G.16 : Détermination de la vitesse de séchage

En supposant que, dans chaque intervalle ainsi déterminé, le profile de la courbe $X=f(t)$ est linéaire, la vitesse de séchage est donnée par l'expression $dX/dt=\delta X/\delta t$. en procédant de la même manière pour tous les intervalles, nous obtenons ainsi autant de valeurs de la vitesse de séchage que d'intervalles

H. Organigrammes de programmation

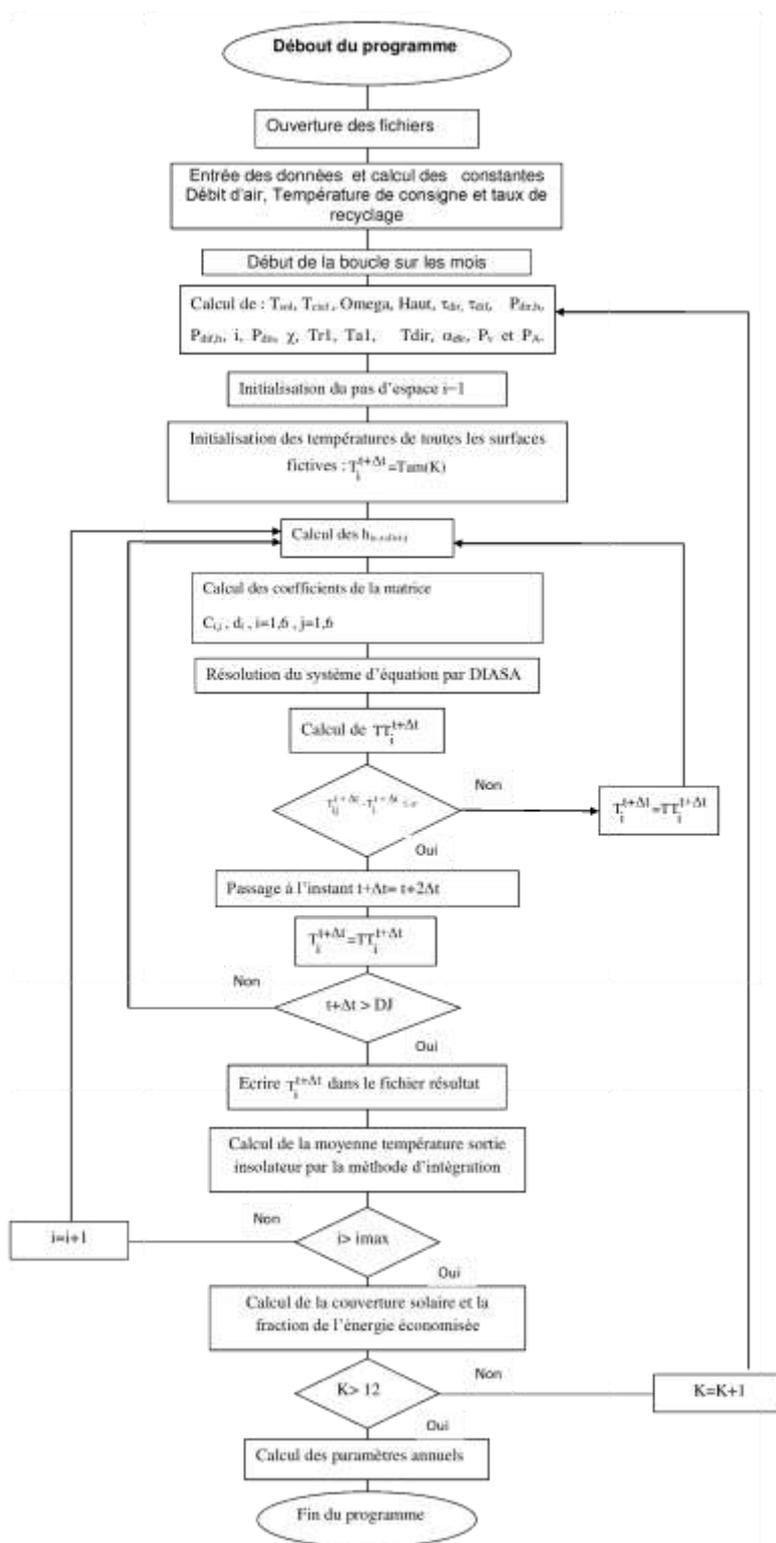


Figure H.1 : Organigramme du programme informatique pour la modélisation et la simulation du fonctionnement de l'insolateur

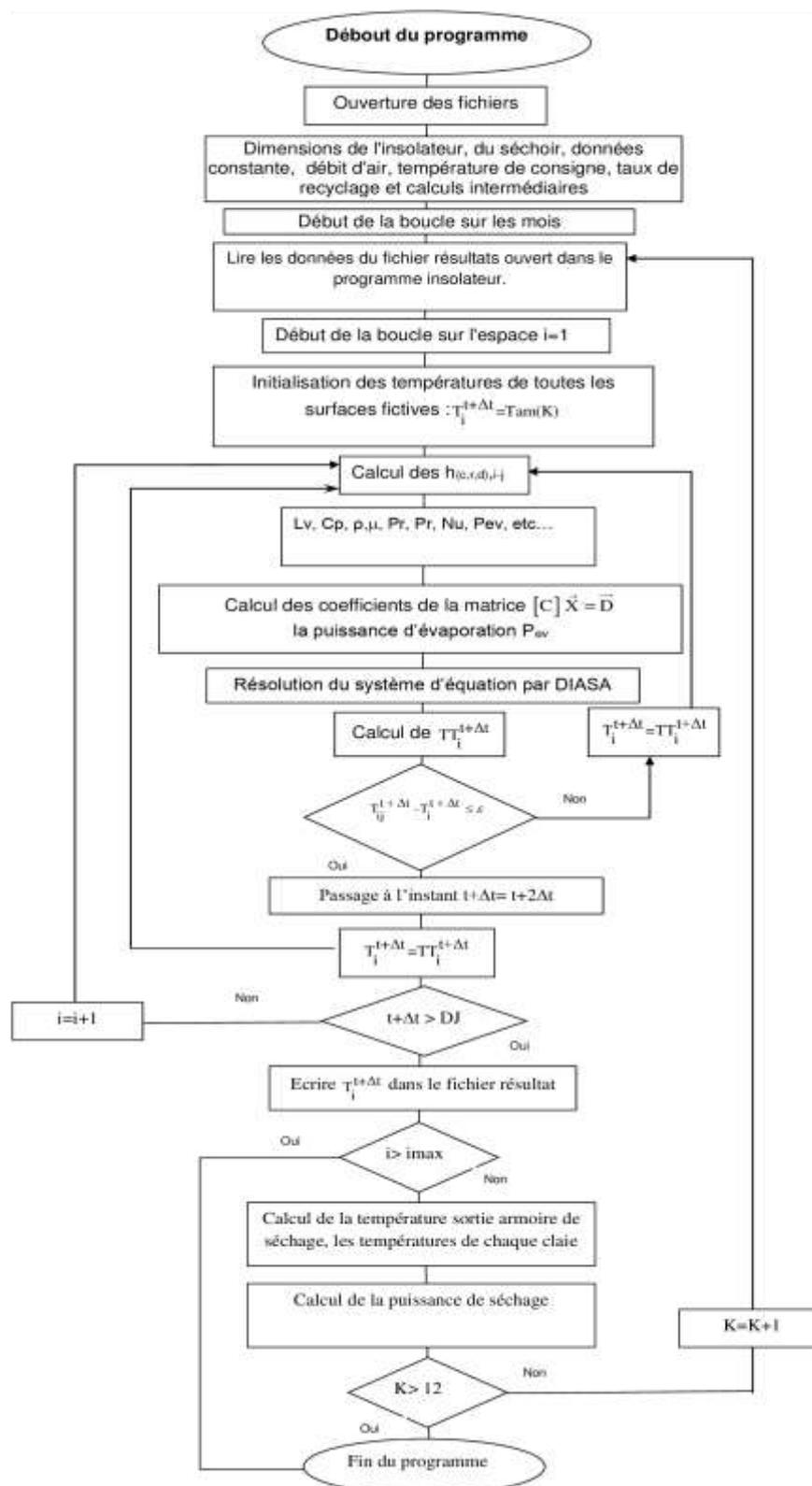


Figure H.2 : Organigramme du programme informatique pour la modélisation et la simulation du fonctionnement de la chambre de séchage

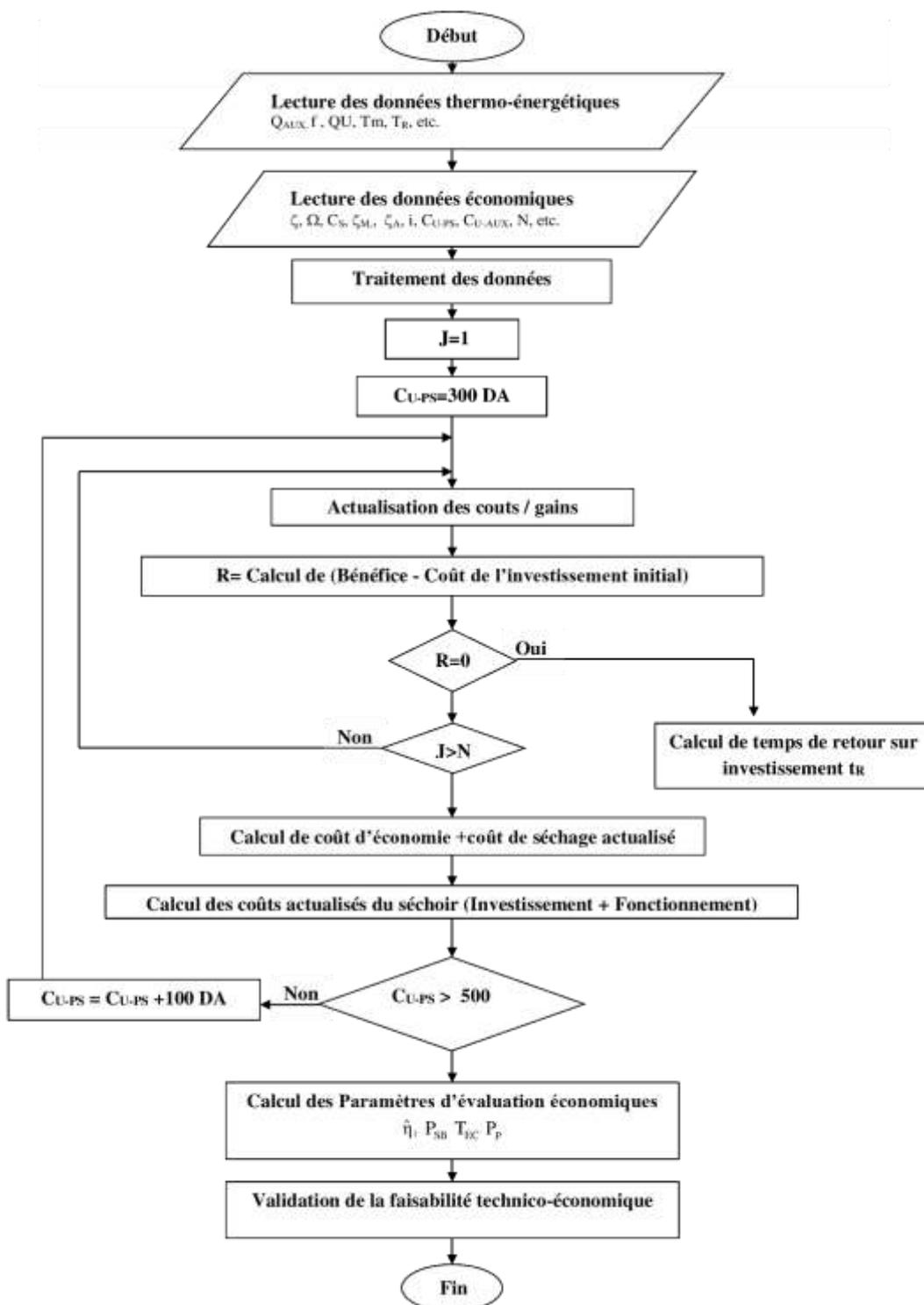


Figure H.3 : Organigramme de calcul. Modélisation technico-économique

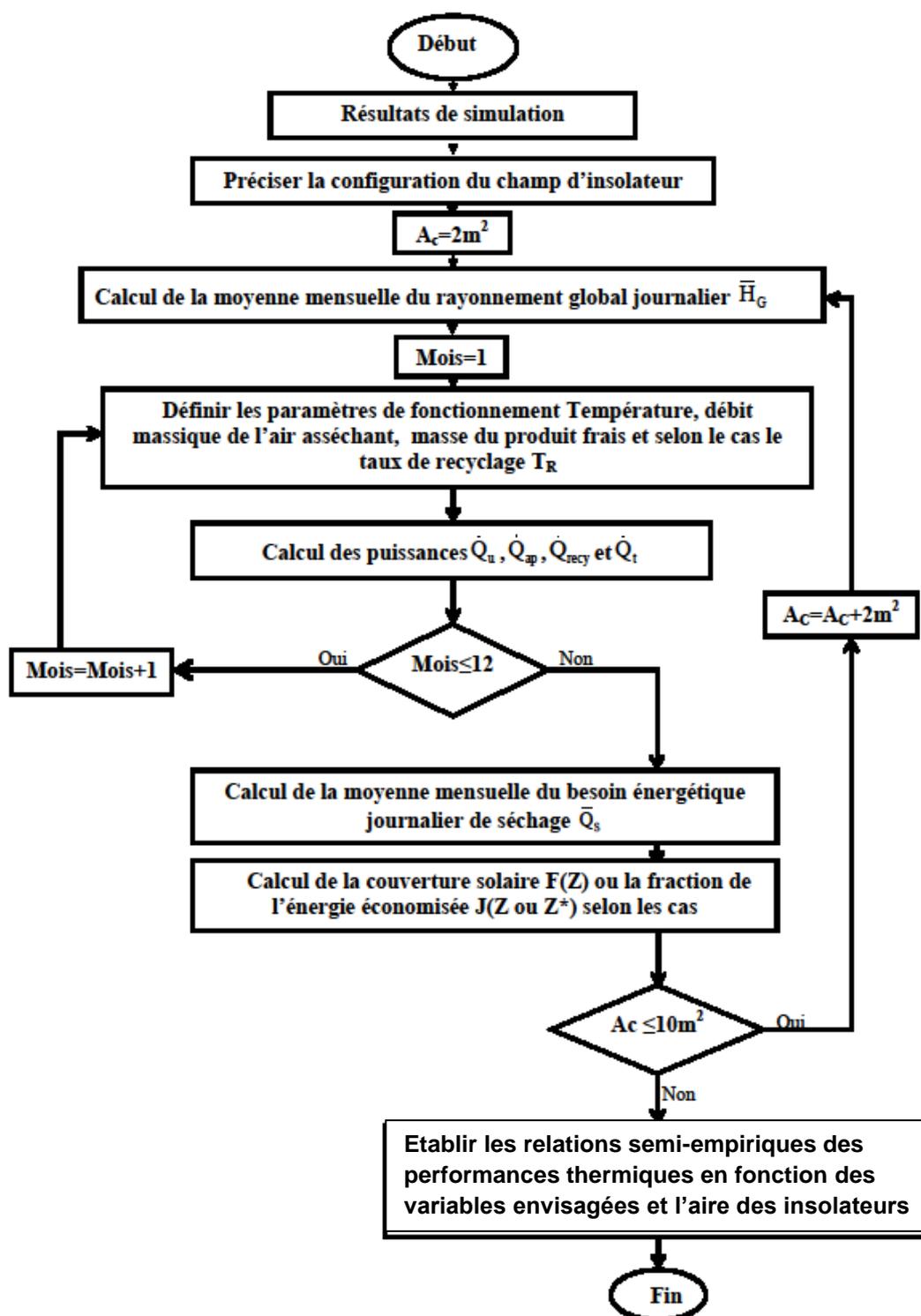


Figure H.4 : Organigramme d'établissement des relations semi-empiriques de dimensionnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Karoui, R., "Le séchage", En ligne http://tech-alim.univ-lille1.fr/sechage/co/Chapitre1_4.html, 2015.
2. Bakshi, A.S., Singh, R.P., "Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling", J.Food sci, (1980),45-1387.
3. Parry, J.L., "Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying", Journal of Agricultural Engineering Research, V.32, ,(1985), 1-29.
4. Henderson, S.M., "A basic concept of equilibrium moisture", Agricultural Engineering for January, (1952),29-32.
5. Akambi, C.T., Adeyemi, R.S., Ojo, A., "Drying characteristic and sorption isotherm of tomato slices", J. of food engineering, V.73,n°2, (2006),157 163.
6. Labuza, T.P., "Sorption phenomena in foods", Food technol., V.22, (1968), 263p.
7. Ajibola, O.O., Adams, B.A., "Desorption equilibrium moisture content of cassava at several temperatures", Inter. Agrophysics, V.2, (1986), 235-239.
8. Desmorieux, H., "Le séchage en zone subsaharienne : une analyse technique à partir des réalités géographiques et humaines", Thèse de doctorat de l'INPL, Spécialité Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Lorraine (1992), 234 p.
9. Ahouannou, C., Jannot, Y., Lips, B., Lallemand, A., "Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo", Sc. des aliments, V.20, (2000), 413-432.
10. Jowitt, R., Escher, F., Hallström, B., Meffert, H.F.Th., Spiess, W.-E.L. et Vos, G., "Physical properties of foods", Appl. Sci. Publishers, London/New York (1983).
11. Irving, Israel Ruiz-López., Córdova, A. V., Rodriguez-Jimenes, G., García-Alvarado, M. A., "Moisture and temperature evolution during food drying: Effect of variable properties", Journal of Food Engineering ,V.63, n°1, (2004), 117-124.
12. Lagunez-Rivera, L., Ruiz-López, I.I., García-Alvarado, M.A., Salgado-Cervantes, M. A., "Mathematical Simulation of the Effective Diffusivity of Water

- during Drying of Papaya", , Drying Technology, V.25, n°10, (October 2007), 1633-1638
13. Srikiatden, J., Roberts, J.S., "Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity", Journal of Food Engineering, V. 84, n°4 , (2008), 516-525.
 14. Hernández, J.A., Pavón, G., García, M.A, "Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics", Journal of Food Engineering, V.45, n°1, (2000), 1-10.
 15. May, B., Perré, P., "The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs", Journal of Food Engineering, V.54, n°4, (2002), 271-282.
 16. Ratti C., "Shrinkage during drying of foodstuffs", Journal of Food Engineering, V. 23, n°1, (1994), 91-105.
 17. Manalu L.P., Harianto, S., and Armansyah, H.T., "Influence of Shrinkage during Drying on Curcuma Effective Diffusivity with 2D Image Analysis", Progress and Communication in Sciences, Project: Drying, (January 2017).
 18. Simate, I.N., "Optimization of mixed-mode and indirect-natural convection solar dryers", Renewable Energy, V.28, (2003), 435–453.
 19. Forso F.K., Nazha M.A.A., Rajakaruna H., "Modeling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop-dryer", Sol Energy; V.81, (2007), 346-357.
 20. Sodha, M.S., Bansal, N.K., Kumar A., Bansal P.K., Malik, A.E., "In solar crop drying", CRC Press Florida, V II, 1987
 21. Oztekin, S., Bascetincelik, A., Soysal, Y., "Crop drying program in Turkey", Renewable Energy, V.16, (1999), 789-794.
 22. Yaldiz, O., Ertekin, C., "Thin layer solar drying of some different vegetables", Drying Technology, V.19, n°3, (2001), 583–596.
 23. Daguinet, M., "Les Séchoirs Solaires : Théorie et Pratique", UNESCO, (1985), 578 p..
 24. Sanchez, D. L., "Modélisation et conception préliminaire d'un séchoir solaire pour bois de pin avec stockage d'énergie", thèse de doctorat, école doctorale n°432, Sciences des métiers de l'ingénieur, Arts et Métiers ParisTech, (juillet 2008).

25. Pratoto, A., Daguinet, M., Zeghmati, B., "A Simplified Technique for Sizing Solar-assisted Fixed-bed Batch Dryers: Application to Granulated Natural Rubber", *Energy Conversion and Management*, V.39, n°9, (1998), 963–971.
26. Belghit, A., Belahmidi, M., Bennis, A., Boutaleb, B. C., Benet, S. "Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée", *Revue Générale de Thermique*, V.36, n°11, (1997), 837–850.
27. Simate, N. "Optimization of Mixed-mode and Indirect mode Natural Convection Solar Dryers", *Renewable Energy*, V.28, n°3, (2003), 435–453.
28. Bennamoun, L., Belhamri, A. "Design and Simulation of a Solar Dryer for Agriculture Products", *Journal of Food Engineering* V.59 n°(2–3), (2003), 259–266.
29. Smitabhindu, R., Janjai, S., Chankong, V. "Optimization of a Solar-assisted Drying System for Drying Bananas", *Renewable Energy* V.33, n°7, (2008), 1523–1531.
30. Janjai, S., Srisittipokakun, N., Bala, B.K., "Experimental and Modelling Performances of a Roof-integrated Solar Drying System for Drying Herbs and Spices", *Energy* V.33, n°1, (2008), 91–103.
31. Sarsavadia, P. N., "Development of a Solar-assisted Dryer and Evaluation of Energy Requirement for the Drying of Onion." *Renewable Energy* V.32, n°15, (2007), 2529–2547.
32. Palsingh, P., Singh, S., Dhaliwal S., "Multi-shelf Domestic Solar Dryer." *Energy Conversion and Management* V.47: 2006, 1799–1815.
33. Satcunanathan, S., Deonarine, S., "A two pass solar air heater", *solar energy*, (1973), 15-41.
34. Abdi, H., Aït Messaoudène, N., "Etude Expérimentale et Théorique des Performances de deux Capteurs Plans à Contact Direct Eau-Plaque d'Absorption", *Rev. Energ. Ren, Chemss* 2000, 53-60
35. Dang, A., Bansal, N.K., "Economic analysis of solar systems", *Energy Convers. Mgmt*, V.25, n°2, (1985), 159-169.
36. Sreekumar A., "Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables", *Energy Conversion and Management*, V.51, (2010), 2230–2238.
37. Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., D. Bechki, "Crop drying by indirect active hybrid solar –

- Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara", *Solar Energy*, V.83, (2009), 2223–2232.
38. Radajewski, W., Jolly, P., Abawi, G. Y., "Optimization of Solar Grain Drying in a Continuous Flow Dryer", *J. agric. Engng Res*, V.38, (1987), 127-144.
 39. Simate, I.N., "Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers", *Renewable Energy*, V.28, (2003), 435–453.
 40. Tshewang, Lhendup., "Technical and financial feasibility of a solar dryer in Bhutan", *Energy for Sustainable Development V.IX,k, n°4*, (2005), 17-24.
 41. Luikov, A.V., "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review)", *International Journal of Heat and Mass Transfer V.18*, (1975), 1–14.
 42. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W., "Drying Cereal grains", AVI Pub. Co., (1974), 265 p.
 43. Ekechukwu, O.V., "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory", *Energy Conversion & Management*, V.40,(1999),593–613.
 44. Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*, 2nd Edition, McGraw Hill, New York, (1968)
 45. Diamante, L.M., Munro, P.A., "Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices", *Solar Energy V.51*, (1993), 271–276.
 46. Akpınar, E.K., "Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits", *Journal of Food Engineering V.73*, (2006), 75–84.
 47. Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., "Thin-layer drying characteristics of garlic slices", *Journal of Food Engineering V.29*, (1996), 75–97.
 48. Özdemir, M., Devres, Y.O., "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting", *Journal of Food Engineering. V.42*, (1999), 225–233.
 49. Henderson, S.M., "Progress in developing the thin layer drying equation", *Trans. ASAE. V.17*, (1974), 1167–1172.
 50. Suarez, C., Viollaz, P., Chirife, J., "Kinetics of Soybean Drying", In: *Drying'80.. Mujumdar, A.S. Eds. Hemisphere Publishing Company, Washington DC*, (1980), 251–255

51. Bruce, D.M., "Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C", *Journal of Agricultural Engineering Research* V.32, (1985),337–347.
52. Parti, M., "Selection of mathematical models for drying in thin layers", *Journal of Agricultural Engineering Research*. V.54, (1993), 339–352.
53. Whitaker, T., Barre, H.J., Hamdy, M.Y., "Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with variable diffusion coefficient", *Trans. ASAE* V.11, (1969), 668–672.
54. Fortes, M., Okos, M.R., "Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels", *Trans. ASAE* V.22, (1981), 761–769.
55. Parti, M., " Selection of mathematical models for drying in thin layers", *Journal of Agricultural Engineering Research* V.54, (1993), 339–352.
56. Keey, R.B., "Introduction. In: *Drying Principles and Practice*", Keey, R.B. Eds., Pergamon Press, Oxford, (1972),1–18
57. Benaouda, N., Zeghmami, B., Khellaf, A., " experimental study and simulation of a solar dryer for spearmint leaves (MENTHA SPICATA) ", *international journal of ambient energy* V.34, n°5,; sep 2013,1-15.
58. Duffie, J.A., Beckman, W.A., "Solar Energy Thermal Processes", Wiley-Interscience New York, 4 editions, 2013.
59. Wikipédia, "MENTHA " En ligne, http://fr.wikipedia.org/wiki/Mentha_spicata
60. Bahloul, N., Boudhrioua, N., Kechaou, N., "Moisture desorption–adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.)", *Industrial crops and products*, V.28, n°2, (September 2008,), 162-176
61. Bizot, H., Multon, J.L., "Méthode de référence pour la mesure de l'activité de l'eau dans les produits alimentaires», *Ann. Technol Agri* V.27, n°2, (1978),441.
62. Müller, Joachim., and Heindl, Albert., "drying of medicinal plants", R.J. Bogers, L.E. Craker and D. Lange (eds.), chapter 17, *Medicinal and Aromatic Plants*, Springer, (2006), 237-252.
63. Benaouda, N.; Bennamoun, L.; Khellaf,A., "Empirical and Artificial Neural Network Approach for Determination of Constant Drying Rate Phase of Medicinal and Aromatic Plants", *International Journal of Energy Engineering* V.4, n°2A, (2014),1-7, DOI: 10.5923/j.ijee.201401.01 *

64. Benaouda, N., Zeghmami, B., "Analyse technico-économique d'un séchoir à chauffage partiellement solaire pour Plantes Aromatiques et Médicinales (PAM) ", 16èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013
65. Arun, S., Mujumdar., "Handbook of Industrial Drying", Third Edition. Edited by CRC Press, (2006).
66. Weast, R.C. (Ed)., "CRC handbook of chemistry and physics", (1985).
67. Krischer, O., "Les bases scientifiques de la technique du séchage", livre, 1963, 599p.
68. Van Meel, D.A., "Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air", Chemical Engineering Science, V. 9, n°1, (1958), 36 - 44,.
69. Lewis, W.K., "The rate of drying of solid materials", Journal of Industrial and Engineering Chemistry V.13, (1921), 427-432.
70. ASAE, "Thin-Layer Drying of Grains and Crops", American Society of Agricultural Engineers Standards, ASAE D448 DEC93 ASAE, St. Joseph, MI, (1995).
71. Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E. and Ross, I. J., "Drying soybeans with heated air", Trans. of the ASAE, (1973), 112p
72. White, G.M., Bridges, T.C., Loewer, O.J; and Ross, I.J., "Thin layer drying model for Soybeans", Trans ASAE, (1981), 1643-1646.
73. Chhinnan, M.S, , "evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans", Trans.ASAE, (1984), 610-615.
74. Yagcioglu, A, A Degirmencioglu, F Cagatay, "Drying characteristic of laurel leaves under different conditions", Proceeding of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy, (1999), 565-569.
75. Sharaf-elden, Y.I.; Blaisdell, J.L.; Hamdy, M.Y, "A model for ear corn drying", Transactions of the ASAE, V.5, n°4, (1980) ,1261-1265.
76. Wang, C.Y.; Singh, R.P, "Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying", Transactions of the ASAE, V.78, n°6, (1978), 6505p.
77. Kassem, A.S, "Comparative studies on thin layer drying models for wheat" In 13th International Congress on Agricultural Engineering, , Rabat – Morocco, V.6, (1998), 2-6.
78. Karathanos, V. T., "Determination of water content of dried fruits by drying kinetics", Journal of Food Engineering, V.39, (1999), 337-344.

79. Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T, "Effects of drying air parameters on rice drying models", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, V.28, (1985), 296–301.
80. Midilli, A, Kucuk, H, Yapar, Z, "A new model for single layer drying", Dry Technol, V.7, (2002), 1503-1513.
81. Thompson, T. L., Peart, R. M., & Foster, G. H., "Mathematical simulation of corn drying, a new model", Transactions of the American Society of Association Executives, V.11, (1986), 582–586.
82. Pfof, H. B., Maurer, S. G., Chung, D. S., & Milliken, G. A., "Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains", American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA, V.76, (1976), 3520.
83. Oswin, C. R., "The kinetics of package life III. The isotherm", Journal of Chemical Technology and Biotechnology", V.65, n°12, (1946), 419–421.
84. Iglesias, H. A. and L. Chirife., "An equation for fitting uncommon water sorption isotherm in foods", Lebensmittel - wiss. u-Technol, V.14, (1981), 105-109.
85. Van den Berg, C., and S. Bruin., "Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects", L. B. Rockland, & G. E. Stewart (Eds.), Water Activity; Influence on Food Quality, New York: Academic Press, (1981), 45p
86. Sing, Kenneth S.W. and Williams, Ruth T., "Physisorption hysteresis loops and the characterization of nanoporous materials", Adsorption Science and Technology, V.22, n°10, (2004), 773–782.

« Quand on se retourne pour voir le chemin parcouru, on rit à la pensée des cailloux dont on s'était fait des montagnes »

Anonyme